Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (http://www.ub.tuwien.ac.at).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/).

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

VIENNA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Institut für Tragkonstruktionen - Stahlbau

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Josef Fink

Karlsplatz 13 / E212, A-1040 Wien

Diplomarbeit zum Thema

Numerische Untersuchungen zu neuartigen Schubverbindern

Master's Thesis

ausgeführt am

Institut für Tragkonstruktionen - Stahlbau

Technische Universität Wien

unter der Anleitung von

Univ. Ass. Dipl.-Ing. Thomas Petraschek

Univ. Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lubomir Ondris

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Josef Fink

Verfasst von

Mario Iwancsics

Reihergraben 9, A - 3400 Klosterneuburg

E 610 / 0125514

Wien, im Mai 2007 Unterschrift:

Kurzfassung

An der Technischen Universität Wien am Institut für Tragkonstruktionen – Stahlbau wurden Untersuchungen an alternativen Schubverbinderleisten für Stahl-Beton-Verbundkonstruktionen durchgeführt. Zur Beurteilung von deren Trag- und Verformungsverhalten standen experimentelle Untersuchungen mittels Push-Out Körpern zur Verfügung. Aufgabenstellung dieser Arbeit war die Modellierung dieser Versuchskörper mit dem FE-Programm ABAQUS und eine anschließende Gegenüberstellung der numerisch generierten Ergebnisse mit jenen der Versuche und eine daraus abgeleitete Bestätigung der numerischen Modellbildung.

Um numerische Analysen durchführen zu können, mussten Parameter zur Beschreibung der Materialen und mechanische Zusammenhänge festgelegt werden, die nicht durch Versuche bestimmt wurden. Der Dilation Angle ψ, erforderlich zur plastischen Materialbeschreibung des Betons, und der Reibungskoeffizient f zwischen Beton und Stahl sind die beiden Parameter, deren Einfluss auf das Berechnungsergebnis anhand einer umfangreichen Parameterstudie untersucht wurde.

Es zeigt sich, dass anhand der FE – Analyse einerseits die Traglast und andererseits die Duktilität des Verbundmittels und das damit verbundene Nachbruchverhalten der Konstruktion dargestellt werden kann.

Mit Hilfe dieser FE – Simulationen kann die Funktionsweise eines Kronendübels mit Parametern studiert werden, welche bei experimentellen Versuchen nicht analysiert werden können. Neben dem Verzerrungs- und Spannungszustand innerhalb des Modellkörpers können Überlegungen zur analytischen Berechnung des Kronendübels angestellt werden.

In weiterer Folge kann die Analyse auf weitere Parameter ausgedehnt werden und die entwickelten Schubverbinder in ihrem Trag- und Verformungsverhalten verbessert werden.

Abstract

The Institut of Steel Constructions at the Technical Universitiy of Vienna tested new shapes of shear connectors for composite steel and concrete.

To verify the load-bearing capacity and ductility of this alternative shear connectors physical experiments on the basis of push-out tests have been carried out. Additional to the physical experiments numerical analysis with the Finite Element Method Program ABAQUS has been started.

Some parameters of the FE – Modell have not been identified in physical experiments. However one of those parameters is the Dilation Angle ψ, which is used to describe the inelastic behavior of concrete.

A second parameter is the friction coefficient f between shear connector and concrete. These parameters have been identified in parametric studies.

With the help of the generated FE – Modell the load capacity, ductility and post cracking of the structure can be analysed.

Another point is the discussion of the working principle of the shear connector by analyzing the strains and stresses inside the structure.

In additional numerical analyses another parameters of the structure can be studied without carrying out very extensive experimental investigations.

Dankesworte

an

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Josef Fink
für die herausfordernde Themenstellung und Betreuung,

Univ. Ass. Dipl.-Ing. Thomas Petraschek
für die ständige Betreuung und Hilfestellung während der Arbeiten,

Univ. Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lubomir Ondirs
für Beratung und Unterstützung bei der Arbeit mit ABAQUS,

StudienkollegInnen und FreundInnen
für die Stunden während und abseits des Studiums,

meiner Familie, besonders meiner Frau
für die Geduld und Unterstützung.

Inhalt

Kurzfassung I
Abstract II
Dankesworte III
1. Einleitung 4
1.1 Allgemein 4
1.2 Aufbau der Arbeit 5
2. Problemstellung und Zielsetzung 6
2.1 Problemstellung 6
2.2 Zielsetzung 10
3. Erstellung eines FE – Modells zur Analyse des Kronedübels 12
3.1 PARTS – Teile der Geometrie eines FE – Modells 12
3.1.1 Allgemein 12
3.1.2 Anwendung für den Kronendübel 15
3.1.2.1 Dübelblech 15
3.1.2.2 Beton 16
3.1.2.3 Bewehrung, Anker 16
3.1.2.4 Auflager 17
3.2 PROPERTY – Materialmodell 18
3.2.1 Allgemein 18
3.2.1.1 Materialdefinition 18
3.2.1.2 Concrete Damage Plasticity 20
3.2.1.3 Concrete Smeared Cracking 21
3.2.2 Anwendung für den Kronendübel 22
3.3 Assembly – Zusammenfügen aller Parts zu einem Gesamtmodell 28
3.3.1 Allgemein 28
3.3.2 Anwendung für den Kronendübel 28
3.4 STEP – Berechnungsverfahren 31
3.4.1 Allgemein 31

3.4.1.1 STATIC, RIKS ... 32
3.4.1.2 DYNAMIC, EXPLICIT ... 33
3.4.2 Anwendung für den Kronendübel ... 34
3.5 Interaction – Beziehungen zwischen Parts ... 35
3.5.1 Allgemein ... 35
3.5.2 Anwendung für den Kronendübel ... 38
3.6 LOAD – Belastungen und Randbedingungen ... 40
3.6.1 Allgemein ... 40
3.6.2 Anwendung für den Kronendübel ... 41
3.7 FE – Netz (MESH) ... 42
3.7.1 Allgemein ... 42
3.7.2 Anwendung für den Kronendübel ... 46
3.8 Job – Erstellung des Input File ... 49
3.9 Visualization – Darstellung der Ergebnisse ... 49
3.9.1 Allgemein ... 49
3.9.2 Anwendung für den Kronendübel ... 50
4. Untersuchung der inneren Abläufe der Modellkörper ... 51
4.1 Allgemein ... 51
4.2 Modellkörper „Krone Kurz“ ... 54
4.2.1 Dübelkennlinie ... 54
4.2.2 Spannungs- und Verzerrungsanalyse ... 59
4.2.3 Abhebekennlinie ... 62
4.2.4 Fachwerkmodell ... 62
4.2.5 Bewehrung ... 65
4.3 Modellkörper „Krone Lang“ ... 66
4.3.1 Dübelkennlinie ... 66
4.3.2 Spannungs – und Verzerrungsanalyse ... 67
4.3.3 Abhebekennlinie ... 70
4.3.4 Fachwerkmodell ... 71
4.3.5 Bewehrung ... 73

4.4 Modellkörper „Krone Rund“ 74
4.4.1 Dübelkennlinie 74
4.4.2 Spannungs – und Verzerrungsanalyse 75
4.4.4 Abhebekennlinie 78
4.4.5 Fachwerk 79
4.4.6 Bewehrung 81
4.5 Gegenüberstellung der Ergebnisse aller drei Kronendübel 82
4.6 Dübel der zweiten Versuchsserie 87
5. Zusammenfassung/Ausblick 89
6. Literaturverzeichnis 92
7. Abbildungsverzeichnis 93
8. Tabellenverzeichnis 95
9. Diagrammverzeichnis 96
Anhang A – Software I
Anhang B – Pläne III
Anhang C – Materialbeschreibung für die zweite Dübelserie XII
Anhang D – Beispiel eines *.inp – file XIII

1. Einleitung

1.1 Allgemein

Die Methode der Finiten Elemente hat sich zu einem unentbehrlichen Werkzeug zur Lösung von Problemstellungen aus den verschiedensten Disziplinen entwickelt. Wie der Name schon sagt, wird das Problem in kleine endliche (finit) Elemente zerlegt.

Durch die Formulierung von Ansatzfunktionen an den Elementen wird ein globales Gleichungssystem zur Lösung erstellt. Anhand des gelösten Gleichungssystems werden die erforderlichen Ergebnisse berechnet.

Die Vielzahl der Anwendungsmöglichkeiten und die Flexibilität bei der Erstellung mathematischer Modelle für komplizierte Strukturen zählen zu den Stärken der Finite Elemente Methode. Das Gebiet reicht von der Technik über die Medizin bis hin zu Wettervorhersagen und dem Verhalten von Karosserieteilen bei Unfällen.

Aufgrund einer Vielzahl von FEM – Programmen wurden die Anwendbarkeit wesentlich erleichtert und gleichzeitig die Fehlerquellen bei der Eingabe erhöht. Neben dem Elementtyp, der Elementgröße, der unterschiedlichsten Berechnungsverfahren, der möglichen Materialbeschreibungen und der zu definierenden Randbedingungen ist ein grundlegendes Verständnis der FE – Methode für eine richtige Anwendung notwendig.

In der vorliegenden Arbeit wird versucht, auf der Grundlage der Finite Elemente Methode mit dem Programmpaket ABAQUS ein Problem aus dem Verbundbau zu lösen.

Dabei werden verschiedene Methoden der numerischen Abbildung angewendet. Die erhaltenen Ergebnisse werden mit jenen von experimentellen Versuchen verifiziert.

1.2 Aufbau der Arbeit

Um die Motivation für die Erstellung dieser Arbeit festzulegen, werden im Kapitel „Problemstellung und Zielsetzung“ allgemeine Grundlagen der vorliegenden Problematik behandelt und die prinzipielle Vorgehensweise der Lösungsfindung beschrieben.

Bevor mit der Darstellung der Ergebnisse begonnen werden kann, wird in Kapitel 3 die Erstellung des FE – Modells in einer nachzuvollziehenden Weise an einem exemplarischem Beispiel beschrieben.

Auf Grundlage dieses Kapitels können nun die Ergebnisse der FE – Modellierung beschrieben werden. Anhand von Spannungs- und Verzerrungsuntersuchungen soll die Wirkungsweise eines Kronendübels durchleuchtet werden. Zusätzlich werden auch Nachweise erbracht, welche laut den gültigen Richtlinien durchzuführen sind.

Eine Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse und die weiterführenden Arbeiten mit diesen werden im nächsten Teil der Arbeit diskutiert.

Abschließend werden sämtliche Verzeichnisse sowie Anhänge angeführt.

2. Problemstellung und Zielsetzung

2.1 Problemstellung

Ein Verbundquerschnitt entsteht durch die Kopplung eines Stahl- und Stahlbetonelements (siehe Abbildung 1). Dabei sollen die beiden Werkstoffe Stahl und Beton bezüglich ihrer günstigen spezifischen Eigenschaften eingesetzt werden. Dies bedeutet, dass der Beton vorwiegend im Druckbereich und Stahl hauptsächlich im Zugbereich eingesetzt wird.

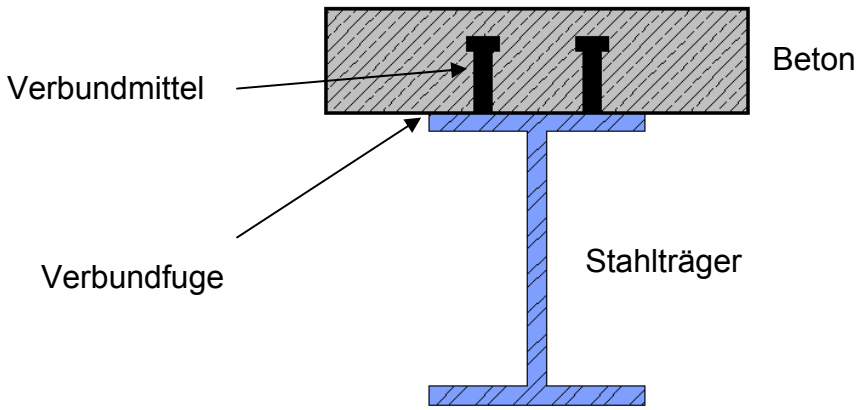


Abbildung 1: Prinzipdarstellung eines Verbundquerschnitts

Um die Tragwirkung einer Verbundkonstruktion sicherzustellen, muss die Aufnahme des Schubflusses in der Verbundfuge zwischen Stahl- und Betonteil gewährleistet sein. Dies erfolgt mittels Verdübelung der beiden Werkstoffe durch ein geeignetes Verbundmittel. Heutzutage wird zur Verdübelung weltweit fast ausschließlich der Kopfbolzendübel eingesetzt. Grund dafür sind seine günstigen Eigenschaften hinsichtlich Tragfähigkeit und Steifigkeit. Weiters besitzt der Kopfbolzendübel gute Eigenschaften bezüglich der Duktilität.

Wirtschaftliche Überlegungen führten zu Forschungstätigkeiten an alternativen Schubverbindern. Diese Alternativen zum Kopfbolzendübel müssen mindestens dieselben Anforderungen erfüllen und in der Praxis anwendbar sein.

Die Bemessung und Nachweisführung für die Anwendung des Kopfbolzendübels wird anhand eines gültigen Regelwerkes (EC4) durchgeführt. Für alternative Schubverbinder ist das Trag- und Verformungsverhalten mit Abscherversuchen zu ermitteln. Versuchsanordnung, Ablauf und Auswertung dieser sind in [1]

festgelegt. Die Gültigkeit der Regelwerke bezieht sich auf Verbindungsmittel, welche unter anderem als duktil gelten. Das bedeutet, diese müssen das Duktilitätskriterium erfüllen. Für den Kopfbolzendübel gilt diese Anforderung als erfüllt. Die Auswertung erfolgt nach Abbildung 2 anhand einer Dübelkennlinie. Eine Dübelkennlinie ist ein Last – Verschiebungs – Diagramm, die aus Abscherversuchen resultiert. Solche Abscherversuche werden als Push – Out Versuche bezeichnet.

Maßgebende Kenngrößen sind die maximale Traglast P_{max}, 90% der Traglast P_{Rk} und die Relativverschiebung δ_{uk} bei Wiederreichen von P_{Rk}. Das Duktilitätskriterium gilt als erfüllt, wenn δ_{uk} nicht geringer als 6 mm ist.

Neben der Duktilität ist ebenfalls der Widerstand gegen Abheben der Betonplatte nachzuweisen. Der Nachweis gilt als erbracht, wenn unter einer Belastung von 80% der Maximallast die gemessene Abhebung kleiner als die Hälfte der Relativverschiebung zwischen Stahlträger und Betonteil ist [1].

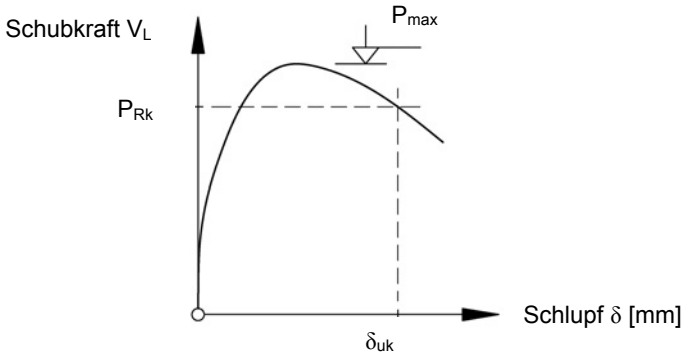
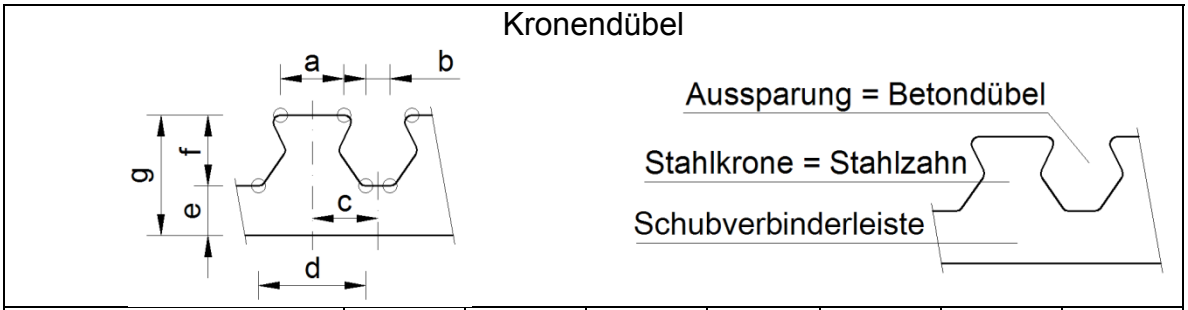


Abbildung 2: Dübelkennlinie, Definition der Duktilität [2]

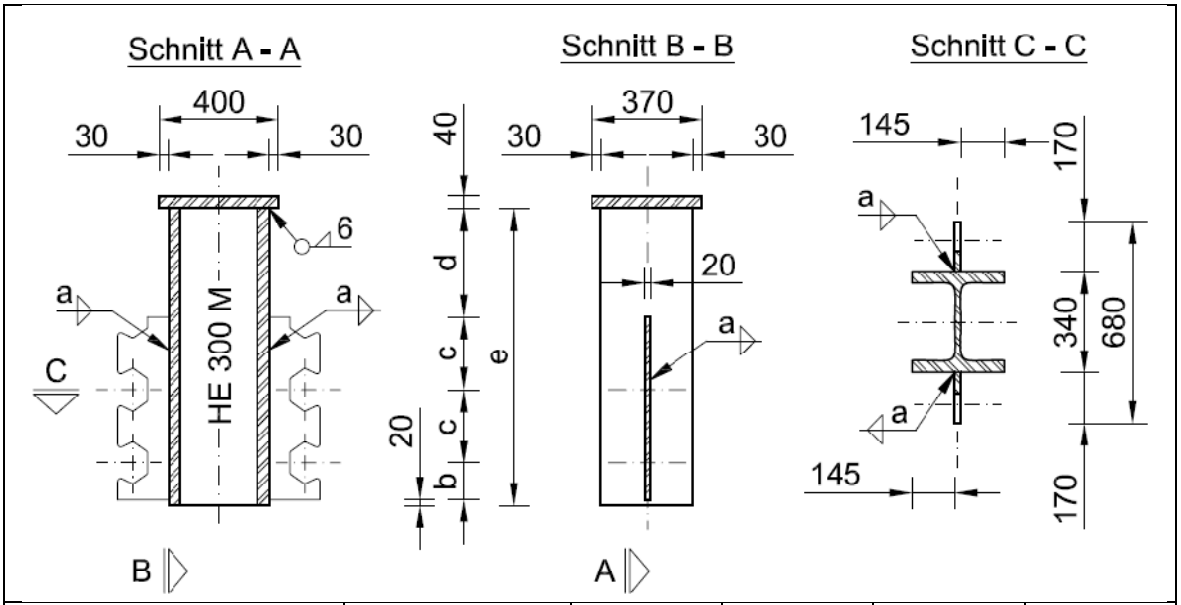
Am Institut für Tragkonstruktionen – Stahlbau der TU – Wien wurden in den vergangenen zwei Jahren umfangreiche experimentelle Untersuchungen zur Feststellung des Trag- und Verformungsverhaltens von neuartigen Schubverbindern durchgeführt. Insgesamt wurden 15 Push – Out Versuche mit 8 verschiedenen Stahlzahngeometrien aufgeteilt auf zwei Serien durchgeführt, wobei nur drei Varianten in dieser Arbeit behandelt werden. Die Geometrien dieser drei sogenannten Kronendübel sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Geometrie der Schubverbinder [2]



Versuchskörper-ID	a	b	c	d	E	f	g
	alle Maße in [mm]						
Krone-Kurz	90	34	93	152	70	100	170
Krone-Lang	120	64	123	182			
Krone-Rund	90	0	93	186			

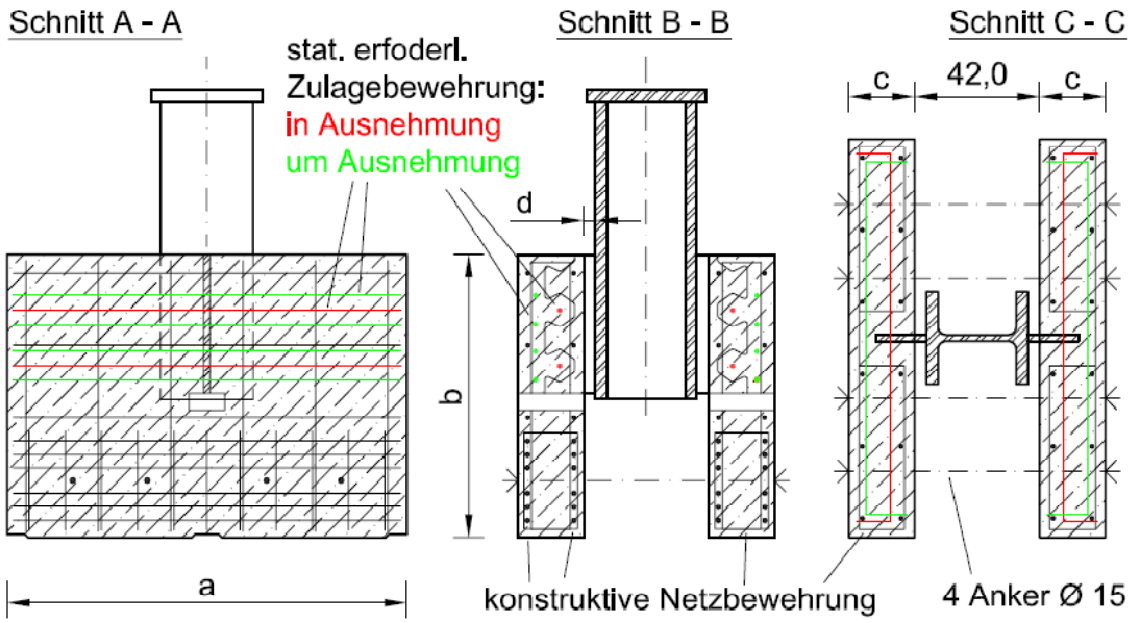
Tabelle 2: Geometrie der Stahlbauelemente [2]



Versuchskörper-ID	Schweißmaß a	b	c	d	e
	alle Maße in [mm]				
Krone-Kurz	9	93	186	515	1000
Krone-Lang		123	246	365	
Krone-Rund	8	93	186	515	

Der prinzipielle Aufbau eines Push – Out Versuchskörpers und dessen Bewehrungsführung sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Übersicht und Bewehrungsführung [2]



Versuchskörper-ID		Abmessungen Betonkörper				Zulagebewehrung pro Platte
		a	b	c	d	in Ausnehmung
		alle Maße in [cm]				
Serie 1	Krone-Kurz	134,0	95,0	22,0	4,0	nur konstruktive Netzbewehrung
	Krone-Lang		110,0			
	Krone-Rund		86,0			
Serie 2	Krone-Kurz	84,0	99,5	23,0	3,0	2 Ø 12
	Krone-Lang		81,5			2 Ø 16
	Krone-Rund		80,5			2 Ø 12

Laut den Vorgaben in [1] sind messtechnisch die Relativverschiebung zwischen Stahlprofil und Betongurt, die Relativverschiebung der beiden Druckplatten des

Prüfrahmens und die Abhebung der Betonplatte während des Versuchs aufzuzeichnen. Dies erfolgt mittels induktiver Wegaufnehmer (siehe Abbildung 3).
Aus den ausgewerteten Messergebnissen wurden Dübelkennlinien generiert, welche die Grundlage für den Vergleich zwischen dem Modell- und Versuchskörper waren.
Eine detaillierte Beschreibung der Prüfkörper und der Versuchsdurchführung selbst ist ebenso wie eine ausführliche Darstellung und Analyse der Versuchsergebnisse in [2] wiedergegeben.

Abbildung 3: Wegaufnehmer zur Messung der Relativverschiebungen [2]

Analog zu den durchgeführten Untersuchungen wurde mit numerischen Vergleichsbetrachtungen begonnen. Dazu wurde die Finite Elemente Methode mit dem Softwarepaket ABAQUS angewendet.
Die Analysen sollen in Zukunft auf zusätzliche Parameter ausgedehnt werden können. Deshalb muss im Vorfeld ein funktionierendes FE – Modell geschaffen werden. Die Schwierigkeit liegt dabei unter anderem in der Festlegung von Parametern, welche nicht durch Experimente bestimmt wurden und nur schwer versuchstechnisch gefunden werden können. Dazu zählen der Dilation Angle für das Materialmodell von Beton und der Reibungskoeffizient zwischen Stahl und Beton.

2.2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, anhand der zur Verfügung stehenden Versuchsauswertungen jene zur Erstellung des FE – Modells notwendigen Werte zu kalibrieren, welche nicht im Labor bestimmt wurden.

Zur Berechnung werden nachfolgend zwei unterschiedliche Berechnungsverfahren angewandt. Dies sind STATIC, RIKS und DYNAMIC, EXPLICIT. Bei STATIC, RIKS handelt es sich um eine implizite statische Berechnungsmethode. Dem gegenüber ist DYNAMIC, EXPLICT eine explizite dynamische Lösungsmethode. Beide Berechnungsverfahren werden in den unterschiedlichen Literaturen [3,4] als gute Methoden zur Lösung nichtlinearer Probleme zitiert. Es soll festgestellt werden, ob beide Verfahren zur Abbildung eines Push – Out Versuchs als numerisches Modell verwendet werden können. Eine genaue Beschreibung und Anwendung der beiden Berechnungsmethoden findet sich in Kapitel 3.

Das Ziel der FE – Analyse ist neben der Bestimmung der Traglast auch die Nachbildung des Nachbruchbereiches, welcher für das Verbundmittel hinsichtlich der Duktilitätsbeurteilung ein entscheidendes Merkmal darstellt (Abbildung 2).

Ebenfalls gilt es zu prüfen, ob ein und derselbe Wertebereich für den Dilation Angle an unterschiedlichen Geometrien angewendet werden kann.

Da nicht nur die aus der FE – Modellierung erhaltenen Dübelkennlinien die Funktionstüchtigkeit des FE – Modells nachweisen, wird im Anschluß versucht, die inneren Vorgänge der Verbundkonstruktion durch Spannungs- und Verzerrungsbetrachtung zu analysieren. Dabei werden die Spannungen und Verzerrungen getrennt nach der Verschiebungsrichtung und quer dazu in zwei Punkten jedes Stahlzahns analysiert und versucht, die Wirkungsweise des Dübels zu klären. Zusätzlich wird der Versuch unternommen, ein Fachwerkmodell für den Betonkörper zu finden. Abschließend wird noch untersucht, ob die Bügelbewehrung in ausreichendem Maße vorhanden war.

Die prinzipielle Vorgehensweise sieht vor, dass aus 16 Kombinationsmöglichkeiten von Dilation Angle und Reibungskoeffizient durch den Vergleich mit den ausgewerteten Experimenten schrittweise eine Einschränkung vorgenommen wird. Das Ziel ist eine numerische Formulierung eines Modells mit definierten Eigenschaften, das für alle untersuchten Kronengeometrien im Rahmen einer hinreichenden Genauigkeit herangezogen werden kann.

3. Erstellung eines FE – Modells zur Analyse des Kronedübels

Eine komplette FE – Analyse mit dem Programmpaket ABAQUS besteht aus drei Schritten. Preprocessing mit ABAQUS/CAE, Simulation mit ABAQUS/Standard oder ABAQUS/Explicit und Postprocessing mit ABAQUS/CAE. Der Link zwischen den einzelnen Schritten geschieht über Dateien. Das Modell wird mittels ABAQUS/CAE erstellt und in einem *.inp file gespeichert. Sollte die Berechnung am eigenen Rechner durchgeführt werden, kann ABAQUS/CAE auch zur Beobachtung und Steuerung der Berechnungen angewendet werden. Für das vorliegende Problem sind jedoch die Rechnerresourcen eines gewöhnlichen PC nicht mehr ausreichend. Deshalb wird mit ABAQUS/CAE ein *.inp file erstellt und zum Lösen des globalen Gleichungssystems an den Applikationsserver der TU – Wien gesandt. Die Ergebnisse werden in ein *.odb file gespeichert. Diese Datei kann in ABAQUS/CAE eingelesen und die Ergebnisse visualisiert werden.
Die nachfolgend ausführlich dargestellte Beschreibung zur Erstellung des FE – Modells zur Analyse des Kronendübels entspricht dem in Modulen gegliederten Aufbau von ABAQUS/CAE. Damit kann die Modellierung, die exemplarisch anhand des Dübels „Krone Kurz“ gezeigt wird, Schritt für Schritt nachverfolgt werden. Die Modellkörper zur Analyse aller weiteren Dübelformen wurden analog dazu erstellt.
Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, wurden STATIC, RIKS und DYNAMIC, EXPLICIT als Berechnungsverfahren zur Analyse herangezogen. Da der geometrische Aufbau des Modells und diverse Definitionen unterschiedlich für die Anwendung der beiden Berechnungsverfahren sind, wird auf die entsprechenden Unterschiede gesondert hingewiesen.

3.1 PARTS – Teile der Geometrie eines FE – Modells

3.1.1 Allgemein

Für einen komplexen Körper wird die Geometrie in Teilen zerlegt erstellt. Dadurch befindet sich jeder Teil in einem eigenen lokalen Koordinatensystem. Erst im später folgenden Modul „Assembly“ (Kapitel 3.3) werden die einzelnen Parts in einem globalen Koordinatensystem zu einem Gesamtmodell zusammengefasst.

Über „Part → Create“ werden Parts erstellt und über „Part → Manager“ können erstellte Parts verwaltet werden.
Es gibt verschiedene Methoden, um Parts zu erstellten. Diese können direkt durch Eingabe der Geometrie, durch Import einer Geometrie aus einem anderen Dateiformat wie z.B. einem dxf-file, durch vereinigen oder durch Differenzenbildung von Parts im Modul „Assembly“ erstellt werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Erstellung eines Mesh Part im Modul „Mesh“, wodurch ein Orphan Mesh als Part erstellt wird. Der Vorteil eines Orphan Mesh liegt darin, dass der Part ein FE – Netz besitzt und im Modul „Assembly“ mehrmals eingesetzt werden kann. In weiterer Folge lässt sich so ein symmetrisches Netz erstellen. Der Nachteil dabei ist, dass sowohl Geometrie als auch Elementtyp nicht mehr verändert werden können.
Der erste Schritt der Erstellung von Parts ist die Festlegung eines modeling space. Folgende Einstellungen sind möglich:

- 3D
  Der Part wird in einem X–Y–Z – Koordinatensystem erstellt und kann aus jeder Shape (Solid, Shell, Wire oder Point) erzeugt werden.
- 2D
  Der Part wird in einem X–Y – Koordinatensystem erzeugt und es können nur Shell, Wire und Point als Shape verwendet werden.
- Axisymetric
  Der Part wird in einem X–Y – Koordinatensystem erzeugt. Die Y – Achse stellt die Symmetrieebene dar. Als Shape stehen wieder Shell, Wire oder Point zur Verfügung.

Im zweiten Schritt muss der part type definiert werden. Dabei stehen folgende zur Verfügung:

- Deformable
  Ein deformable Part kann in jedem modeling space mit jeder Shape erstellt werden und stellt einen Part dar, der sich unter Last verformen kann.
- Discrete Rigid
  Ein discrete rigid Part kann ebenfalls in allen modeling spaces und aus allen Shapes erstellt werden. Allerdings kann sich dieser jedoch nicht verformen und wird damit vorwiegend für Kontaktanalysen herangezogen.

- Analytic Rigid

  Ein analytic rigid Part repräsentiert eine Oberfläche, die wie ein discrete rigid Part für Kontaktanalysen verwendet wird. Für ein 3D-System steht als Shape nur Shell und für ein 2D- bzw. für ein axsymmetrisches System nur Wire zur Verfügung.

Zusätzlich sind die base features eines Parts zu definieren. Dazu zählen Shape und Type. Unter Shape versteht man die Topologie eines Körpers (Solid, Shell, Wire und Point) und unter Type die Art der Erstellung (Planar, Extrusion, Revolution, Sweep oder Coordinates).

Wird Solid als Shape gewählt, kann der Part nur im 3D modeling space und aus folgenden Types erzeugt werden:

- Extrusion

  Es wird eine Fläche konstruiert und eine Extrusionshöhe definiert. Wahlweise kann ein Winkel in Extrusionsrichtung definiert werden.

- Revolution

  Es wird ebenfalls eine Fläche konstruiert, welche jedoch um eine zu definierende Achse rotiert und somit einen Volumenkörper erzeugt.

- Sweep

  Sweep funktioniert ebenfalls wie Extrusion, nur wird der Körper dadurch erzeugt, dass eine Fläche entlang eines angegebenen Pfades extrudiert wird.

Wird Shell als Shape gewählt, kann der Part in allen modeling spaces erstellt werden, wobei im 3D modeling space einer der folgenden Types definiert werden muss:

- Extrusion, Revolution und Sweep

  Diese drei Types entsprechen denen wie bei Solids.

- Planar

  Die Shell bleibt eine ebene zweidimensionale Fläche im dreidimensionalen Raum.

Ein Part definiert als Wire wird im Modell nur aus Linien erzeugt, denen im anschließenden Modul „Property“ Querschnittsflächen zugeordnet werden. Als Type steht Planar zur Verfügung.

Ein Point wird durch die Eingabe seiner Koordinaten definiert.

Abschließende erforderliche Eingabe ist die geschätzte Größe des Parts. Nach Bestätigung der Eingaben wird ein Sketcher geöffnet, welcher in der angegeben Größe ein Grid (Netz) zum leichteren Erstellen des Parts besitzt. In diesem stehen unterschiedliche Werkzeuge zur Erzeugung von Linien, Rechtecken, Kreisen, Bögen, etc. zur Verfügung, mit denen die gewünschte Geometrie erstellt werden kann. Um exakte Abmessungen zu erhalten, kann das Grid oder eine direkte Koordinateneingabe verwendet werden. Nach der Geometrieeingabe ist für Volumenkörper die Extrusionshöhe, die Rotationslinie oder der Sweeppath zu definieren.

3.1.2 Anwendung für den Kronendübel

Für die Abbildung der Push–Out Körper wurden die Symmetrien der Geometrie ausgenutzt. Damit ist jeweils nur ein Viertel des gesamten Versuchskörpers abgebildet. Sowohl der I – Träger, auf dem die beiden Dübelleisten aufgeschweißt sind, als auch die Kopfplatte am Ende des I – Trägers (siehe Tabelle 2) wurden bei der Modellierung vernachlässigt. Diese Teile hatten keinen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis. Vergleichsberechnungen haben gezeigt, dass eine Verschiebungsrandbedingung (siehe Kapitel 3.6) an der Unterseite der Dübelleiste ausreicht. Diese wurde ebenso wie der Betonkörper als Solid im 3D modeling space mittels Extrusion erstellt. Das Gegenstück zur Dübelleiste im Betonkörper wurde durch die Differenz zweier Körper im Modul „Assembly“ erstellt. Als Type wurde für alle Körper Deformable gewählt. Die Bewehrung und die Anker wurden als Wire im 3D modeling space erstellt.
Folgende Parts waren für die Erstellung des FE – Modells notwendig.

3.1.2.1 Dübelblech

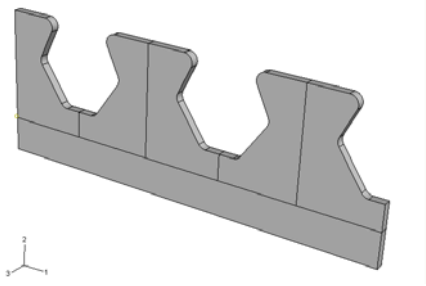


Abbildung 4: Geometrie des Dübelbleches

Der Part Dübelblech stellt die Dübelleiste mit den beiden Kronendübel dar und ist durch Extrusion einer Fläche erstellt. Als Alternative könnte die Geometrie auch als *.dxf file importiert werden. Die in Abbildung 4 erkennbare Unterteilung, welche mit dem Tool Partition erstellt ist, dient in weiterer Folge zur leichteren Erstellung eines symmetrischen Netzes. Die genauen Abmessungen sind im Anhang B, Abbildung 38 und 39 angegeben.

3.1.2.2 Beton

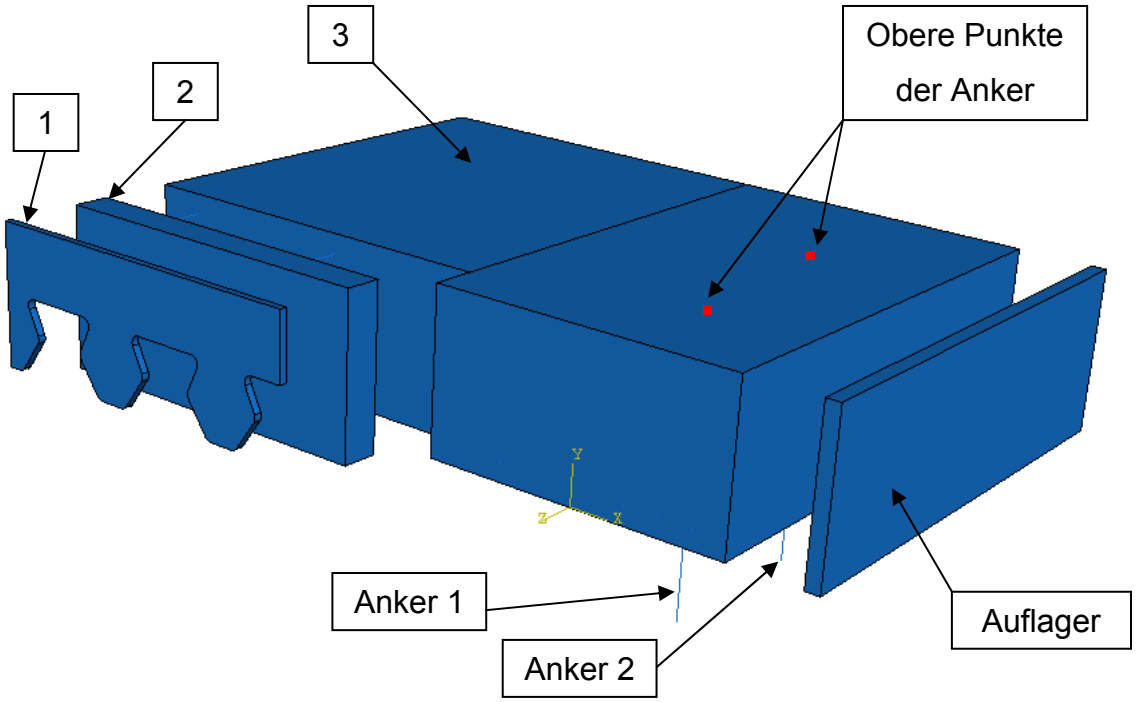


Abbildung 5: Geometrie des Betonkörpers

Aufgrund unterschiedlicher Netzteilung der einzelnen Bereiche (siehe Kapitel 3.7) ist der Betonkörper in Summe aus drei Parts zusammengesetzt (Abbildung 5). Part 1 und 2 werden im Modul „Assembly“ zu einem zusammegefügt, wobei wie schon erwähnt Part 1 zuvor als Differenz zweier Körper erstellt ist. Die genaue Vorgehensweise ist in Kapitel 3.3 beschrieben. Part 3 wird mittels tie constraint (siehe Kapitel 3.5) angehängt. Die genauen Abmessungen des Betonkörpers sind in Anhang B Abbildung 44 angegeben.

3.1.2.3 Bewehrung, Anker

Die Bewehrung besteht in diesem Modell aus vier verschiedenen Bügeln, und sind ebenso wie die Anker (siehe Abbildung 5) mittels Linienelemente (Wire) erzeugt

(siehe Abbildung 6). Abmessungen der Bügel und der Anker sind in Anhang B Abbildung 45 angegeben.

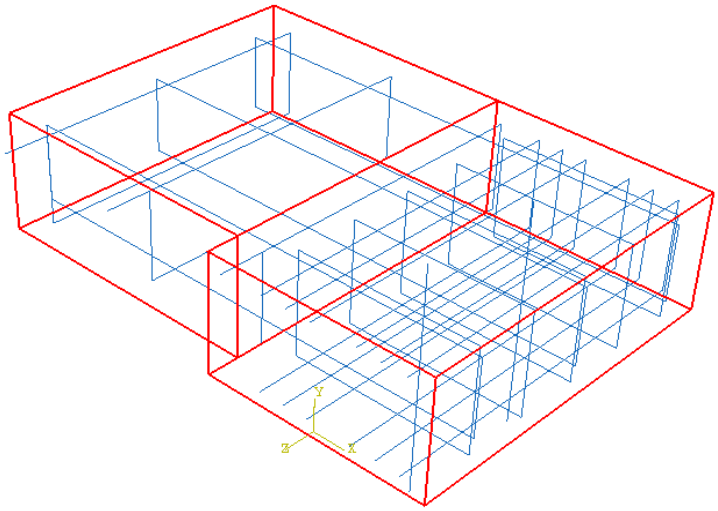


Abbildung 6: Bewehrung im Modellkörper

3.1.2.4 Auflager

Im Zuge von umfangreichen Untersuchungen, welche im Vorfeld der Erstellung von [5] durchgeführt wurden, hat sich herausgestellt, dass eine Einspannung der Auflagerfläche des modellierten Betonkörpers das Verformungsvermögen so behindert, dass eine wirklichkeitsnahe Kraftübertragung nicht richtig wiedergespiegelt wird. Eine unterschiedlich ausgeprägte Relativverschiebung der Betonplatte in vertikaler Richtung (Δ1, Δ2) entlang der Längsachse führt dazu, dass die Kraft nicht mehr über die gesamte Auflagerfläche, sondern nur mehr in deren oberen Hälfte übertragen wird (siehe Abbildung 7 links).

Durch eine Einspannung kann dieser Effekt nicht simuliert werden (siehe Abbildung 7 rechts). Deshalb wurde ein Auflager (siehe Abbildung 5) erstellt und mit dem Betonteil über Kontakt (Kapitel 3.5) verbunden. Als Typ wurde für diesen Körper Deformable gewählt. Dies ermöglichte es dem Betonkörper, sich von dieser Auflage zu lösen. Weiters war es auch erst damit möglich, zusammen mit dem Berechnungsverfahren DYNAMIC, EXPLICIT ein Nachbruchverhalten abzubilden. Bei der Anwendung von STATIC, RIKS brachte dieses Auflager keine nennenswerten Veränderungen. Dieser Part wurde somit bei diesen Berechnungen vernachlässigt. Das Auflager ist von der Größe dem Betonkörper angepasst. Eine alternative Möglichkeit zur Erzeugung eines solchen Auflagers wäre über die Definition eines Discrete Rigid.

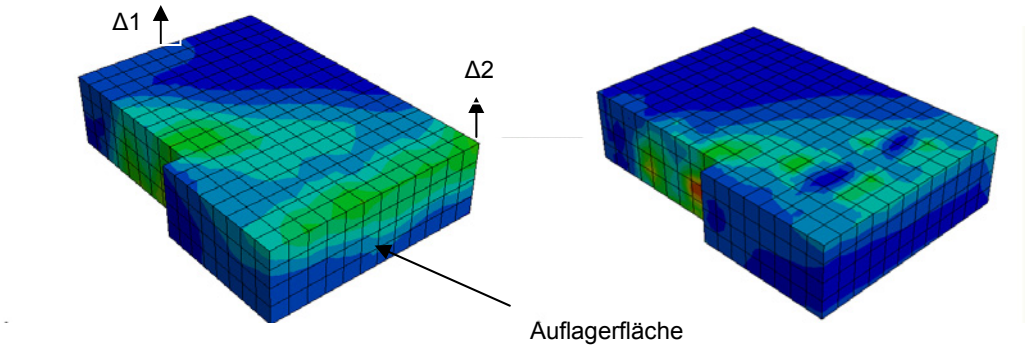


Abbildung 7: Druckspannung am Auflager mit (links) und ohne (rechts) Einspannung bei Erreichen der Traglast

3.2 PROPERTY – Materialmodell

3.2.1 Allgemein

Dieses Modul dient zur Definition der Materialien, wobei für jedes jeweils eine Section erstellt wird. Damit kann jedem Part durch Zuordnung einer Section ein Material zugewiesen werden. Sections werden verwendet, um für ein Material dessen unterschiedliche Eigenschaften zu definieren. Neben homogenen Materialeigenschaften können durch die Definition von Materialrichtungen auch inhomogene Materialien geschaffen werden.

Zum Beispiel wurde für jeden verwendeten Bewehrungsdurchmesser eine Section definiert und als Eigenschaft die Querschnittsfläche festgelegt. Eine weitere Möglichkeit zur Abbildung einer Bewehrung wäre die Definition von Profilen mittels einer vordefinierten Profilbibliothek. Dadurch können einem Linienelement definierte Material- und Querschnittseigenschaften zugewiesen werden.

Materialien werden über „Material → Create“ definiert. Über „Section → Create“ werden zu jedem Material Sections erzeugt. Über „Profil → Create“ werden Profile aus der Profilbibliothek verwendet. Über „Assign → Section“ werden Sections den erstellten Parts zugewiesen. Mit dem Befehl Assign werden auch Materialrichtungen eingegeben.

3.2.1.1 Materialdefinition

Für Materialien gibt es eine Vielzahl von Definitionsmöglichkeiten. Nachfolgend werden nur die zur Modellierung des Push-Out Körpers interessanten Möglichkeiten angeführt. Die Materialdefinition gliedert sich in vier Punkte: General, Mechanical, Thermal, Other. Folgende Definition wird mittels General festgelegt:

- Density

  Darunter wird die Dichte des Materials verstanden. Diese Angabe ist von besonderer Bedeutung für die Anwendung von dynamischen Berechnungen.

Die wichtigsten Materialeigenschaften sind unter Mechanical festzulegen. Diese sind:

- Elasticity

  Es wird der elastische Bereich des Materials beschrieben. Folgenden Einstellungen können unter Elasticity → Elastic angegeben werden:

  - Der linear elastische Bereich wird definiert durch die Eingabe des E-Moduls und der Querdehnzahl.
  - Durch die Auswahl von No Compression oder No Tension wird definiert, dass das Material keinen Druck bzw. Zugbereich besitzt.
  - Die Abhängigkeit der Materialeigenschaften von der Richtung wird mit dem Materialtyp bestimmt. Neben einem isotropen Werkstoff kann ein orthotroper, anisotroper oder ein solcher mit selbst definierter Materialrichtung angegeben werden.
  - Zusätzlich kann unter Suboptions wahlweise eine Versagens-dehnung bzw. –spannung angegeben werden.

- Plasticity

  Zur Beschreibung der plastischen Materialeigenschaften steht eine große Bandbreite an Auswahlmöglichkeiten zur Verfügung.

  Für Stahl wird ein klassischer plastischer Verfestigungsbereich wie folgt definiert:

  - Die Art der Verfestigung ist als isotropic zu definieren. Damit sind die Auswirkungen in alle Richtungen gleich.
  - Durch die Auswahl von strain-rate-depend und/oder temperature-depend data kann die Spannung in Abhängigkeit der Verzerrung und/oder Temperatur angegeben werden.
  - Der plastische Bereich wird durch die Angabe der Fließspannung mit der zugehörigen plastischen Verzerrung, die gleich Null zu setzen ist, definiert, wenn man mit einem ideal plastischen Material arbeitet.

Für Beton stehen neben weiteren folgende zwei plastische Materialmodelle zur Verfügung:

- Concrete Damage Plasticity (siehe 4.2.1.2)
- Concrete Smeared Cracking (siehe 4.2.1.3)

Ein weiteres mögliches Materialmodell für Beton ist Brittle Cracking. Dieses wird verwendet, wenn eine Zugbeanspruchung dominiert und kann nur bei DYNAMIC, EXPLICIT angewendet werden.

3.2.1.2 Concrete Damage Plasticity

Concrete Damage Plasticity kann sowohl für statische als auch für dynamische Analysen verwendet werden und wird durch Definition der plastischen Zerstörung und durch das Verhalten im Druck- und Zugbereich wie nachfolgend beschrieben angegeben:

- Plasticity

  Die plastische Zerstörung wird mittels Definition eines hyperbolischen Fließpotentials definiert (siehe Abbildung 8), welches durch folgende Konstanten zu beschreiben ist:

  - Dilation Angle ψ

    Neigung der Fläche des Fließpotentials nach Abbildung 8.

    In dieser ist I_1 die erste Spannungsinvariante und σ_V die von Mises Spannung.

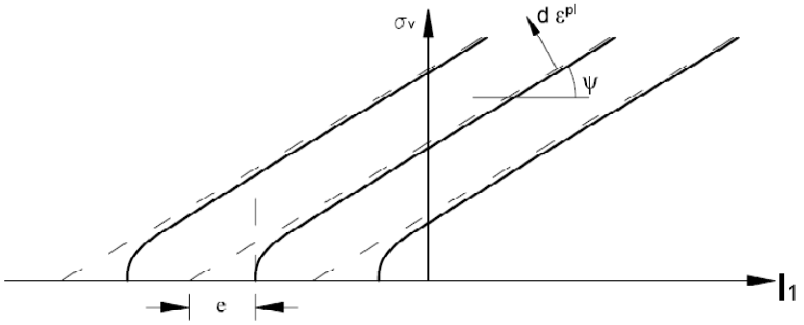


Abbildung 8: Geometrische Interpretation des Dilation Angles [4]

  - Eccentricity e

    Dieser Wert gibt die Rate an, wie schnell das hyperbolische Fließpotential die Asymptote erreicht (siehe Abbildung 8).

  - fb0/fc0: Verhältnis der zweiaxialen zur einaxialen Betondruck-festigkeit.

- Compressive Behavior
  Compressive Behavior beschreibt das Spannungs – Stauchungs Verhalten von Beton anhand seiner Arbeitslinie im Druckbereich. Die Eingabe erfolgt durch die Wertepaare Spannung und zugehörige plastische Stauchung.
- Tensile Behavior
  Tensile Behavior beschreibt das Dehnverhalten des Betons im Zugbereich. Die Eingabe erfolgt durch eine der folgenden Beziehungen mittels Wertepaaren: Spannung – Verschiebung, Spannung – Dehnung, Spannung – Energie.

3.2.1.3 Concrete Smeared Cracking

Concrete Smeared Cracking kann nur für statische Analysen verwendet werden. Die Definition des Betonmodells erfolgt durch die Druckspannung und der zugehörigen plastischen Stauchung und wird mittels Wertepaaren angegeben. Zusätzlich sind folgende Eingaben erforderlich:

- Failure Ratios
  Die Failure Ratios definieren die Versagensfläche des Betons.
  - Ratio1: Verhältnis der zweiaxialen Druckfestigkeit zur einaxialen Druckfestigkeit.
  - Ratio2: Verhältnis der einaxialen Zugfestigkeit zur einaxialen Druckfestigkeit.
  - Ratio3: Verhältnis der Stauchung bei maximaler Druckfestigkeit bei zweiaxialer Beanspruchung zur Stauchung bei maximaler Druckfestigkeit bei einaxialer Beanspruchung.
  - Ratio4: Verhältnis der Zugfestigkeit bei ebenem Spannungszustand zur Zugfestigkeit bei einaxialer Beanspruchung.
- Shear Retention
  Durch die Angabe folgender Faktoren kann die Abnahme der Schubsteifigkeit mit zunehmender Rissbildung im Betonkörper simuliert werden.
  - Rho_close: Verhältnis des Schubmoduls bei geschlossenen Bruchflächen zum Schubmodul des nicht gerissenen Betons.

- Eps_max: definiert die maximal mögliche Verzerrung quer zur Bruchfläche.

- Tension Stiffening

  Tension Stiffening bezeichnet den versteifenden Einfluss der Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen bei Zugbeanspruchung. Dieser Einfluss kann auf folgende zwei Arten berücksichtigt werden:

  - Displacement

    Hiermit wird eine Verschiebung definiert, ab welcher die Festigkeit linear bis auf Null abfällt.

  - Strain

    Bei dieser Variante wird direkt eine Spannnungs – Dehnungs – Linie eingegeben.

3.2.2 Anwendung für den Kronendübel

In Tabelle 4 sind jene Materialkennwerte zusammengefasst, welche für die Dübelleiste, die Bewehrung und die Anker verwendet wurden. Die Werte für die Dübelleiste wurden mittels Materialversuche bestimmt. Jene für die Bewehrung sind EC2 [6] entnommen, und jene für die Anker dem Produktdatenblatt. Für alle drei Materialien wurde als Eigenschaft isotropic gewählt.

Tabelle 4: Materialkennwerte für Dübelleiste, Bewehrung und Anker

		Stahldübel S355	**Bewehrung BSt 550**	**Anker St 900/1100**
Mass Density ρ	[kg/mm³]	$7{,}8 \cdot 10^{-6}$	$7{,}8 \cdot 10^{-6}$	$7{,}8 \cdot 10^{-6}$
Young´s Modulus E	[N/mm²]	210000	210000	210000
Poission´s Ratio ν	[ ]	0,3	0,3	0,3
Yield Stress f_y	[N/mm²]	363	550	900
Plastic Strain ε_{pl}	[ ]	0	0	/

Da für die Berechnung sowohl das statische Verfahren STATIC, RIKS als auch das dynamische Verfahren DYNAMIC, EXPLICIT verwendet wurde und nach Kapitel 3.3.1 nur das Materialmodell Concrete Damage Plasticity für beide Verfahren zur Verfügung steht, wurde dieses gewählt. Auch wurden in [4] und [5] mit diesem Materiamodell gute Ergebnisse erzielt. Ein Nachteil sind allerdings erforderliche Eingabewerte für Materialparameter, die mittels experimenteller

Versuche zumindest nicht auf einfache Weise zu bestimmen sind. Dazu zählen beispielsweise der Dilation Angle ψ und der Zerstörungsgrad in Abhängigkeit der Dehnung.

In Tabelle 5 sind die Materialkennwerte für Density und Elasticity angegeben. Zur Beschreibung der elastischen Materialeigenschaften wurde isotropic gewählt.

Tabelle 5: Materialkennwerte für Beton

		Serie 1 C25/30	Serie 2 C40/50	
			„Krone Rund“ „Krone Lang“	„Krone Kurz“
Mass Density ρ	[kg/mm³]	$2{,}643 \cdot 10^{-6}$	$2{,}643 \cdot 10^{-6}$	$2{,}643 \cdot 10^{-6}$
Young´s Modulus E_{cm}	[N/mm²]	31000	36599	36599
Poission´s Ratio ν	[ ]	0,2	0,2	0,2
mittlere Druckfestigkeit f_{cm}	[N/mm²]	33	.	-
Würfeldruckfestigkeit $f_{ck,cube}$	[N/mm²]	-	61,17	60,83

Für das plastische Materialmodell CDP wurde der Dilation Angle variiert. Für alle weiteren Konstanten für Plasticity nach Kapitel 3.2.1.2 wurden vordefinierte Defaultwerte verwendet. Um den Einfluss des Dilation Angle ψ auf das Berechnungsergebnis zu ermitteln, wurden im Zuge einer Parameterstudie mehrere Vergleichsberechnungen durchgeführt. Die erzielten Ergebnisse wurden mit jenen der experimentellen Untersuchungen verglichen. Auf diese Weise sollte somit ein idealer Wert herausgefiltert werden. Die Vergleiche der Ergebnisse der FE – Analysen mit jenen der experimentellen Untersuchungen sind in Kapitel 4 dargestellt.

Der Spannungs – Stauchungs – Verlauf für Compressive Behavior wurde nach EC2 [6] Gl. 3.14 ermittelt. Diese beschreibt den Zusammenhang zwischen σ_c und ε_c für eine kurzzeitig wirkende einachsige Druckbeanspruchung:

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta} \qquad \text{(Gl.1)}$$

Dabei ist:

$\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1}$

ε_{c1}… Stauchung bei Höchstwert der Betondruckspannnung

$k = 1{,}1\, E_{cm} \cdot |\varepsilon_{c1}| / f_{cm}$

Die Gleichung gilt bis zur rechnerischen Bruchdehnung ε_{cu1}. Der Übergang einer linearen zu einer nichtlinearen Spannungs – Stauchungs – Linie darf nach [6] bei $0{,}4 \cdot f_{cm}$ angenommen werden.

Für die Versuchskörper der Serie 1 (Tabelle 3) wurde ein Beton der Güteklasse C25/30 und für jene der Serie 2 (Tabelle 3) ein Beton der Güteklasse C40/50 verwendet. Da für den Beton der Serie 1 keine Versuche zur Bestimmung der Druckfestigkeit $f_{ck,cube}$ und des E-Moduls E_{cm} durchgeführt wurden, werden für das Materialmodell die in [6] angegebenen Werte verwendet. Für den Beton der Serie 2 wurden diese Versuche durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Anhang C angeführt. In Tabelle 5 sind die daraus resultierenden Werte für Dichte ρ, E-Modul E_{cm}, Querdehnzahl ν und mittlere Druckfestigkeit f_{cm}, mit denen die Modellierung des Betons erfolgte, nochmals zusammengefasst. Mit diesen werden mittels Gleichung 1 die als Eingabe erforderlichen Wertepaare, die in Tabelle 6 zusammengestellt sind, zur Bestimmung der Spannungs – Stauchungs – Linie ermittelt. Die graphische Darstellung zeigt Diagramm 1. Der Anteil der für das Materialmodell CDP erforderlichen plastischen Stauchung wird durch Abzug der Stauchung bei $0{,}4 \cdot f_{cm}$ von der berechneten Stauchung nach Gleichung 1 ermittelt.

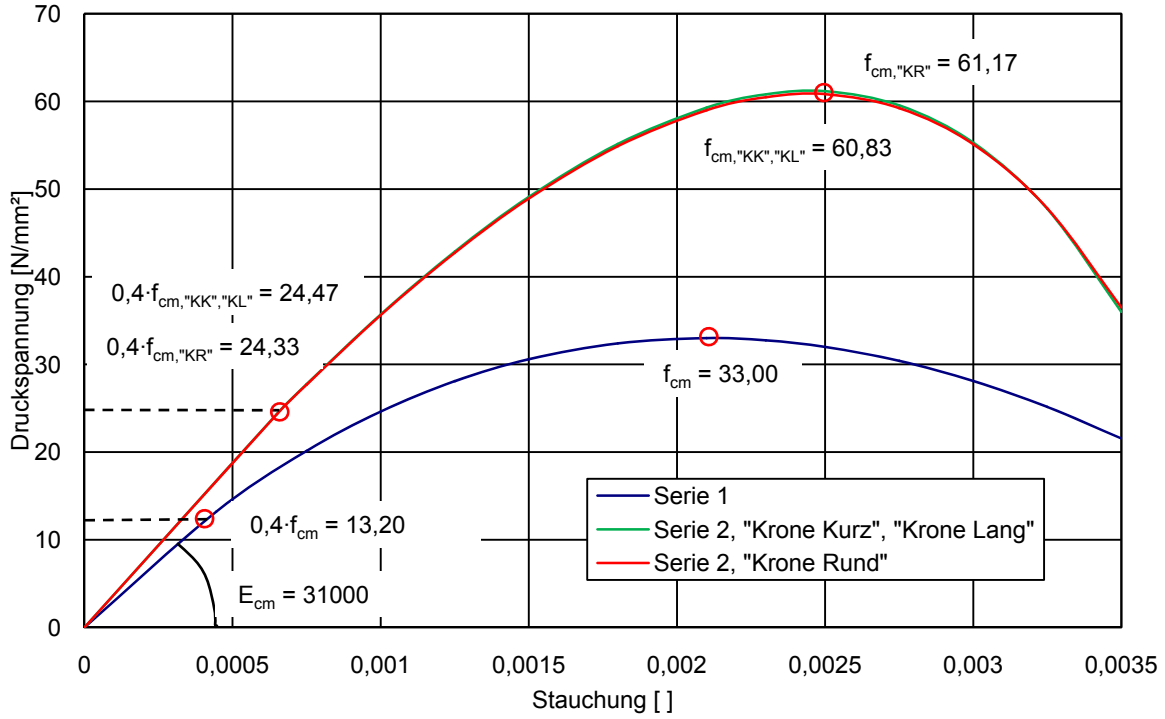


Diagramm 1: Spannungs – Dehnungs – Verlauf für Beton

Die Beschreibung des Tensile Behavior erfolgte nach einem Beispiel aus der Beispielsammlung des ABAQUS Manuals [4]. Dabei wird die verbleibende Zugfestigkeit nach dem Bruch in Abhängigkeit der Verschiebung angegeben.

		Serie 1						
σ_c	[N/mm²]	13,20	24,62	30,60	33,00	32,00	28,12	21,57
ε_c	[ ]	4,45E-04	1,00E-03	1,50E-03	2,10E-03	2,50E-03	3,00E-03	3,50E-03
ε_{pl}	[ ]	0,00	5,56E-04	1,06E-03	1,66E-03	2,06E-03	2,56E-03	3,06E-03
		Serie 2 – „Krone Kurz“, „Krone Lang“						
σ_c	[N/mm²]	24,47	35,72	49,11	59,30	61,17	55,30	36,00
ε_c	[ ]	6,53E-04	1,00E-03	1,50E-03	2,10E-03	2,50E-03	3,00E-03	3,50E-03
ε_{pl}	[ ]	0,00	5,56E-04	1,06E-03	1,66E-03	2,06E-03	2,56E-03	3,06E-03
		Serie 2 – „Krone Rund“						
σ_c	[N/mm²]	24,33	35,63	48,92	58,99	60,83	55,12	36,50
ε_c	[ ]	6,50E-04	1,00E-03	1,50E-03	2,10E-03	2,50E-03	3,00E-03	3,50E-03
ε_{pl}	[ ]	0,00	5,56E-04	1,06E-03	1,66E-03	2,06E-03	2,56E-03	3,06E-03

Tabelle 6: Spannungs – Dehnungs – Beziehug für C25/30

In diesem Beispiel wurde die Zugfestigkeit des Betons mit 10% der Druckfestigkeit und eine abfallende Kurve, wie sie in Diagramm 2 dargestellt ist, angenommen. Bei der Anwendung von CSC (Concrete Damage Plasticity) als Materialmodell für Beton wird die Betonzugfestigkeit noch um zusätzliche 10% verringert. Der Einfluss dieser reduzierten Betonzugfestigkeit wurde ebenfalls für die Modellierung des Kronendübels untersucht. An einer Vielzahl von Untersuchungen hat sich gezeigt, dass durch die Halbierung der Werte für die Verschiebung v der Nachbruchbereich deutlich besser abgebildet werde konnte. Deshalb kommt immer eine Kombination von reduzierter Betonzugfestigkeit und der halbierten Werte für die Verschiebung v zur Anwendung.

Für die Serie 2 wurde nicht mit 10% der Druckfestigkeit, sondern mit der mittleren Zugfestigkeit f_{ctm} laut EC2 [6] gerechnet, da mit 10% der Druckfestigkeit keine realistische Werte für die Traglast erzielt wurden. Diese wurde trotzdem noch um 10% verringert.

In Tabelle 76 bzw. Diagramm 1 sind die verwendeten Wertepaare beider zur Anwendung kommenden Spannungs – Verschiebungs – Linien dargestellt. Um die Reduktion der Zugefestigkeit und die halbierten Werte für die Verschiebung veranschaulichen zu können, ist die Spannungs – Dehnungs – Linie des ABAQUS Beispieles ebenfalls abgebildet.

Tabelle 7: Tensile Behavior

Serie 1 nach ABAQUS		reduzierte Betonzugfestigkeit			
		Serie 1		Serie 2	
σ_t	V	σ_t	v	σ_t	v
[N/mm²]	[mm]	[N/mm²]	[mm]	[N/mm²]	[mm]
3,30	0,00	2,97	0,00	3,69	0,00
2,21	0,07	1,99	0,04	2,47	0,04
1,48	0,12	1,33	0,06	1,67	0,06
0,99	0,17	0,89	0,09	1,11	0,09
0,67	0,22	0,60	0,11	0,75	0,11
0,45	0,26	0,40	0,31	0,50	0,13
0,30	0,31	0,27	0,16	0,33	0,16
0,20	0,35	0,18	0,18	0,22	0,18
0,13	0,39	0,12	0,20	0,51	0,20
0,09	0,44	0,08	0,22	0,10	0,22
0,06	0,48	0,05	0,24	0,07	0,24

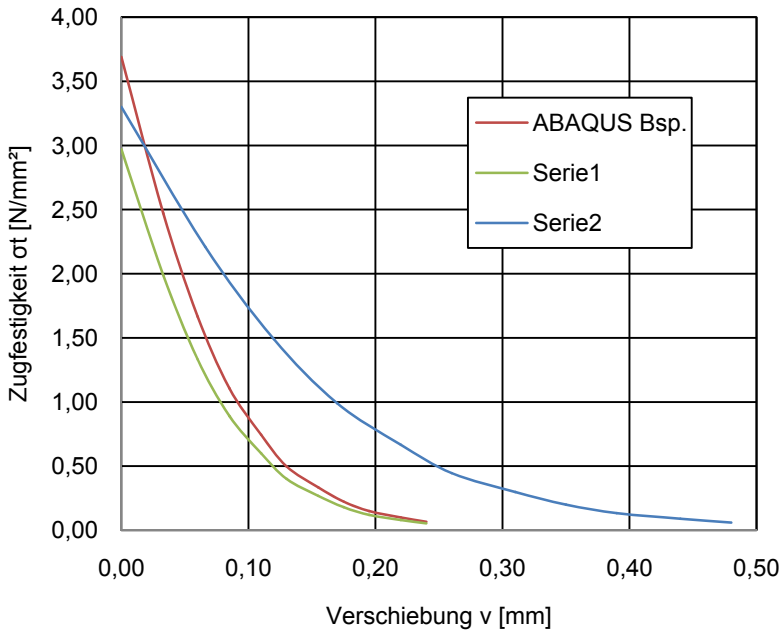


Diagramm 2: Tensile Behavior

Zusätzlich zum Dehnungsverhalten wurde der Zerstörungsgrad in Abhängigkeit der Verschiebung (Tensile Damage) berücksichtigt. Dieser Zusammenhang wurde ebenfalls aus der ABAQUS Beispielsammlung [4] entnommen. Wie schon bei der Abbildung des Zugbereiches wurden auch für diesen Zusammenhang die Werte für die Verschiebung v halbiert. In Tabelle 8 und Diagramm 3 sind die zur Anwendung kommenden Wertepaare angegeben, welche für beide Versuchsserien ident verwendet wurden.

Tabelle 8: Tensile Damage

Serie 1 nach ABAQUS		Serie 1, Serie 2	
Damage Parameter	Verschiebung v	Damage Parameter	Verschiebung v
[ ]	[mm]	[ ]	[mm]
0,381	0,07	0,381	0,04
0,617	0,1	0,617	0,06
0,763	0,17	0,763	0,09
0,853	0,22	0,853	0,11
0,910	0,26	0,910	0,13
0,944	0,31	0,944	0,16
0,965	0,35	0,965	0,18
0,979	0,39	0,979	0,20
0,987	0,44	0,987	0,22
0,992	0,48	0,992	0,24

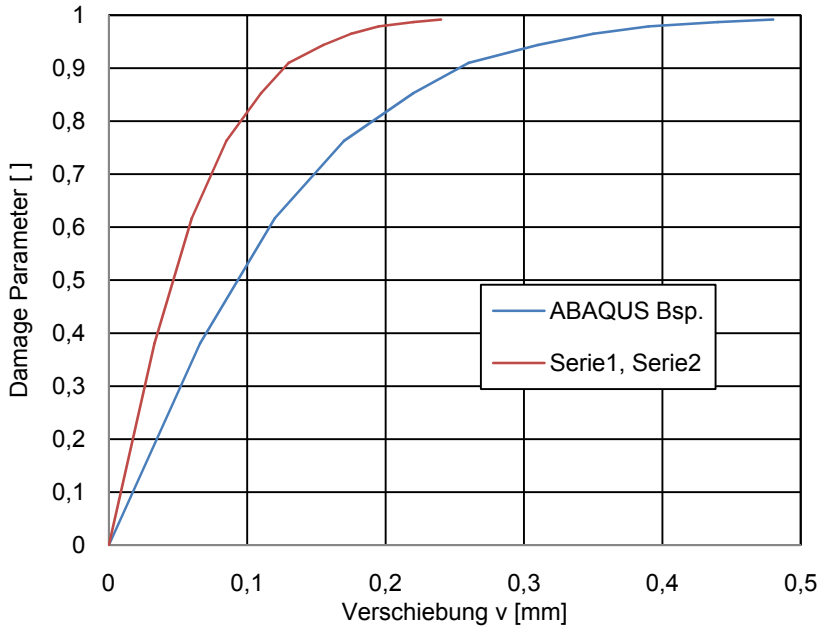


Diagramm 3: Tensile Damage

Nach Definition der erforderlichen Materialmodelle wurden diese nach Kapitel 3.2.1 jeweils einer Section zugeordnet. Für die Bügel und Anker musste aufgrund unterschiedlicher Durchmesser (siehe Anhang B) das jeweilige Materialmodell mehreren Sections zugewiesen werden. Damit konnte den nach Kapitel 3.1.2 erstellten Parts über „Assign → Section“ das jewilige Materialmodell mit den zugehörigen Eigenschaften zugeordnet werden.

3.3 Assembly – Zusammenfügen aller Parts zu einem Gesamtmodell

3.3.1 Allgemein

Im Modul „Assembly“ werden über „Instance → Create“ Instanzen von Parts erzeugt und in einem globalen Koordinatensystem zu einem Gesamtmodell zusammengefasst. Der Vorteil ist, dass ein mehrmals vorkommender Part nur einmal erstellt werden muss und mit diesem die erforderliche Anzahl der Instanzen für das Gesamtmodell erzeugt werden kann.

Zum Zusammenfügen der einzelnen Instanzen stehen Befehle wie Translation und Rotation zur Verfügung. Im Menü „Constraint“ gibt es zusätzlich Spezialbefehle, um beispielsweise Flächen oder Kanten parallel anordnen zu können.

Wie im Kapitel 3.1 schon hingewiesen wurde, können im Modul „Assembly“ auch Parts erstellt werden. Dazu dient der Befehl Merge/Cut im Menü Instance. Merge bedeuetet das Zusammenfügen von Geometrien oder Netzen zu einem Part. Mit Hilfe des Befehls Cut wird von einem Körper jener Teil abgeschnitten, der sich mit einem Teil eines zweiten Körpers kreuzt.

Nachdem das Modell im globalen Koordinatensystem erzeugt wurde, können beliebig viele Sets und Surfaces erzeugt werden. Diese sind notwendig, um später Outputs (siehe Kapitel 3.3.), Randbedingungen (siehe Kapitel 3.6.2) und Interactions (siehe Kapitel 3.5.2) festlegen zu können und werden mit „Tool→ Set“ bzw. „Tool → Surface“ definiert.

3.3.2 Anwendung für den Kronendübel

Die Längsachse der Dübelleiste im globalen Koordinatensystem wird mit der Richtung 1 festgelegt.

In Tabelle 9 sind alle am Modellkörper „Krone Kurz“ definierten Sets und Surfaces dargestellt.

Tabelle 9: Definition von Sets

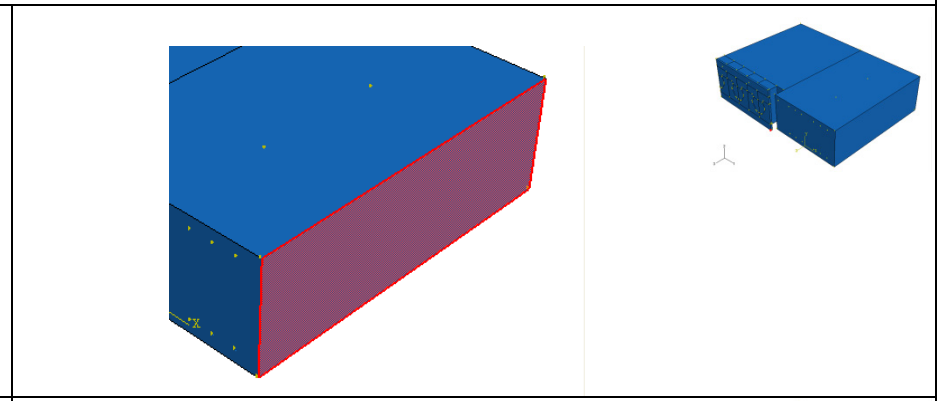
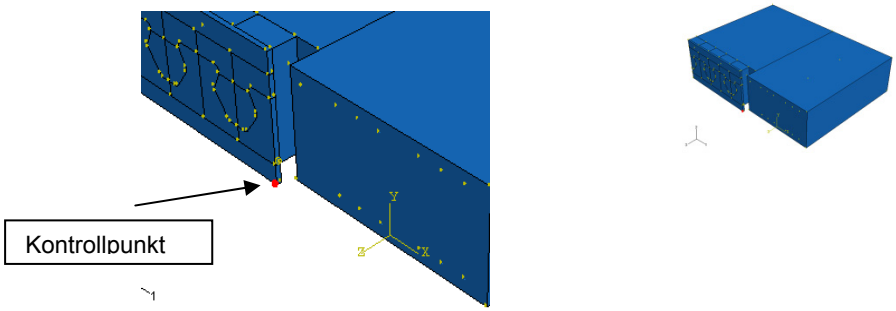
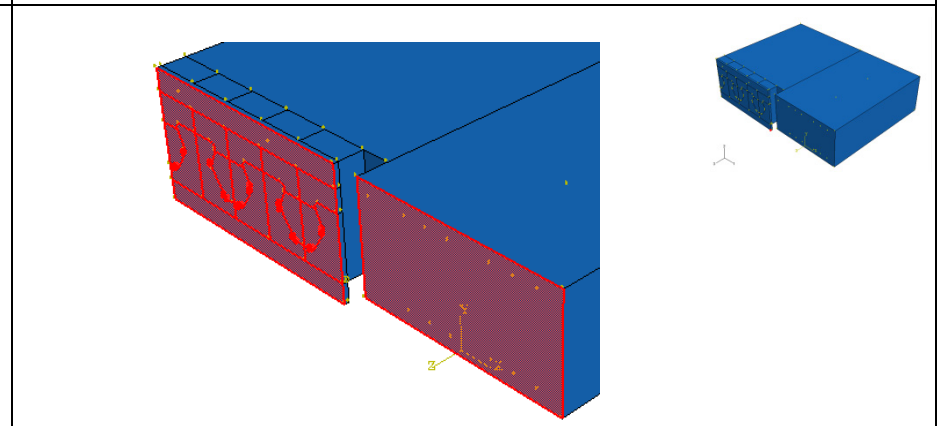
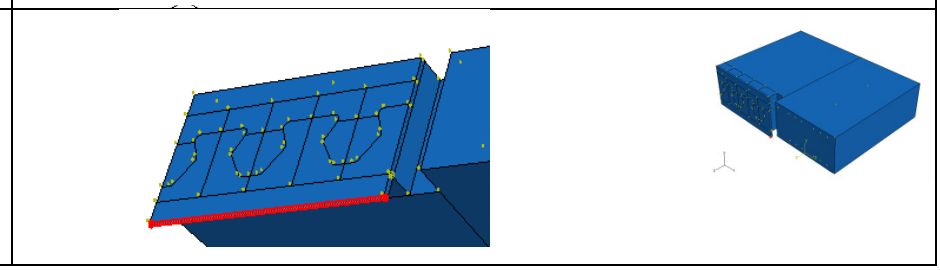
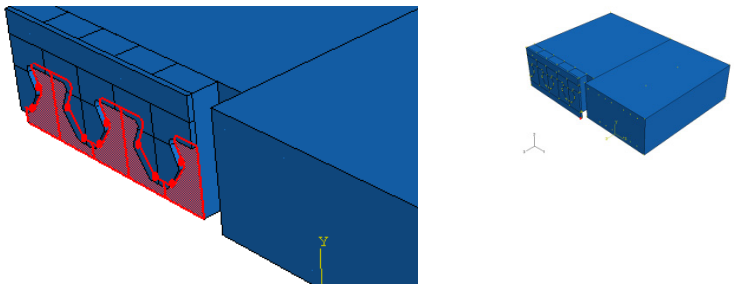
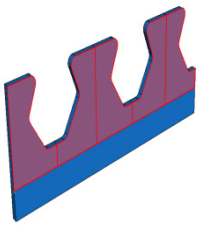
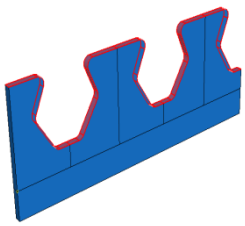
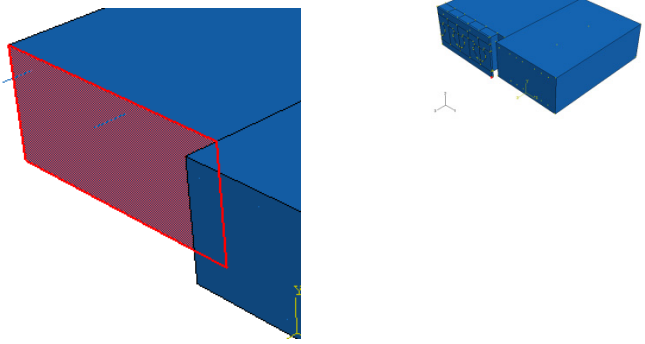
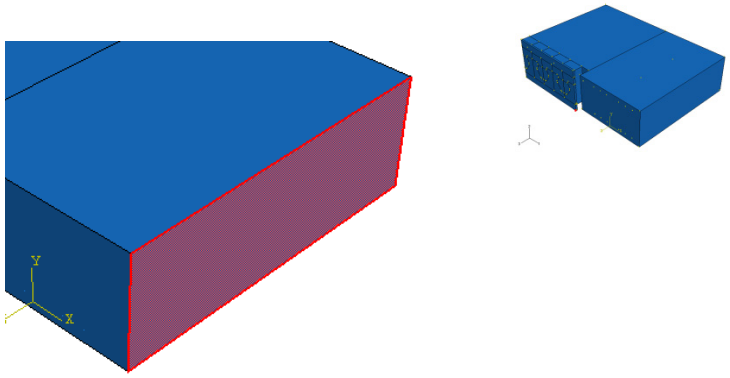
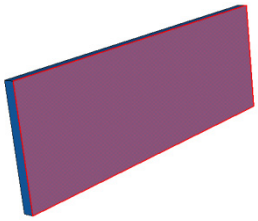
SETS	
Betonauflage Bestimmung der Auflagerkraft (siehe Kapitel 3.3.2)	
Kontrollpunkt Bestimmung der Relativverschiebung (siehe Kapitel 3.3.2)	
Symmetrieebene Bestimmung der Symmetrieebene quer zur Trägerlängsachse (siehe Kapitel 3.6.2)	
Stahl_unten Bestimmung der Verschiebungsrandbe-dingung (siehe Kapitel 3.6.2)	

Tabelle 10: Definition von Surfaces

Beton_seitlich seitliche Reibungs-fläche zwischen Beton und Stahl (siehe Kapitel 3.5.2)	
Stahl_seitlich seitliche Reibungs-fläche zwischen Beton und Stahl (siehe Kapitel 3.5.2)	
Beton_stirn stirnseitige Reibungs-fläche zwischen Beton und Stahl (siehe Kapitel 3.5.2)	
Stahl_stirn stirnseitige Reibungs-fläche zwischen Beton und Stahl (siehe Kapitel 3.5.2)	
Beton_master Definition des tie constraint (siehe Kapitel 3.5.2)	
Beton_slave Definition des tie constraint (siehe Kapitel 3.5.2)	

Auflager_master (nur dynamic, explicit) Definition des Auflagers (siehe Kapitel 3.5.2)	
Auflager_slave (nur dynamic, explicit) Definition des Auflagers (siehe Kapitel 3.5.2)	

3.4 STEP – Berechnungsverfahren

3.4.1 Allgemein

Im Modul „Step“ werden das Berechnungsverfahren und die zu berechnenden Ergebnisse, sogenannte Outputs, festgelegt.

Das Berechnungsverfahren wird über „Step → Create“ festgelegt. Folgende Auswahlmöglichkeiten stehen zur Verfügung:

- STATIC, GENERAL

  Die Masse der Struktur wird ignoriert. General bezeichnet eine allgemeine Analyse, bei der der Zustand am Ende eines Berechnungsschrittes den Ausgangszustand für den nächsten Schritt darstellt. Zeitabhängige Materialeigenschaften können nicht berücksichtigt werden. Die Berechnung kann linear und nichtlinear durchgeführt werden.
- STATIC, RIKS (siehe 4.3.1.1)
- DYNAMIC, EXPLICIT (siehe 4.3.1.2)
- DYNAMIC, IMPLICIT

  Anwendung für lineare und nichtlineare Analysen, wobei die Lösung mittels einem impliziten Lösungsalgorithmus gefunden wird.

- STATIC, LINEAR PERTURBATION
  Lineare Berechnungsmethode

Für jedes angeführte Berechnungsverfahren kann mittels Aktivierung von NLGEOM festgelegt werden, ob bei der Berechnung zusätzlich nichtlineare Effekte, resultierend aus großen Verschiebungen, zu berücksichtigen sind. Bei der Verwendung von ABAQUS/Standard ist diese Einstellung bei default deaktiviert und bei ABAQUS/Explicit aktiviert.

3.4.1.1 STATIC, RIKS

Bei geometrisch nichtlinearen Analysen führen Beulen oder das Versagen von Teilen der Struktur zu einer negativen Steifigkeit des Gesamtsystems. Um das Gleichgewicht der Struktur zu erhalten, muss es dem System möglich sein, Verzerrungsenergie freizugeben. Mittels STATIC, RIKS wird dies gewährleistet.
Folgende Einstellungen können für das Berechnungsverfahren STATIC, RIKS unter anderem definiert werden:

- NLGEOM
  Berücksichtigung nichtlinearer Effekte, verursacht durch große Verschiebungen
- Stopping Criteria
  Die Berechnung kann mittels eines Kriteriums, dies kann ein Last- oder Proportionalitätsfaktor sein, definiert abgebrochen werden. Ist das Kriterium eine bestimmte Verschiebung, muss die Richtung und der Ort am Modellkörper angegeben werden.
- Incrementation
  Die Wahl der Inkrementgröße wird von ABAQUS automatisch festgelegt. Als Abbruchkriterium muss das Maximum an Inkrementen festgelegt werden. Eine Konstante im Berechnungsverfahren STATIC, RIKS stellt die ARC Lenght dar. Für die Arc length muss ein Initial- , Minimal- und Maximalwert angegeben werden.
  Wird für die Berechnung kein Gleichgewicht gefunden, wird der Initialwert um 25% verringert und ein erneuter Berechnungsversuch durchgeführt. Dieser Vorgang wird fünfmal wiederholt. Ist dann noch immer kein Gleichgewichtszustand erreicht, wird die Berechnung abgebrochen.

Erreicht die Berechnung den Minimal- oder Maximalwert, wird die Berechnung ebenfalls abgebrochen.

- Als weiteres Abbruchkriterium kann ein bestimmter Bereich des Modells definiert werden. Erreicht dieser im Berechnungsverlauf in allen Elementen die Fließgrenze, wird die Berechnung abgebrochen.

3.4.1.2 DYNAMIC, EXPLICIT

Explizite Methoden zeichnen nach [3] sich durch eine außergewöhnliche Robustheit bezüglich Konvergenzverhalten und numerischer Stabilität aus. Letzteres stellt den entscheidenden Faktor bei der Abbildung eines Nachbruchverhaltens dar.

Für das Berechnungsverfahren DYNAMIC, EXPLICIT können unter anderem folgende Einstellungen definiert werden:

- Time Period
  Diese Angabe steuert zusammen mit der Angabe der Höhe der Belastung die Belastungsgeschwindigkeit (siehe Kapitel 3.6.1). Zusätzlich wird auch das Berechnungsende durch die Angabe eines Zeitpunktes in Sekunden festgelegt.
- NLGEOM
  Berücksichtigung nichtlinearer Effekte, verursacht durch große Verschiebungen
- Incrementation Type: automatic oder fixed
  Mit fixed wird eine definierte Inkrementgröße angegeben. Bei automatic kann entschieden werden, ob die Inkrementgröße aus der Eigenfrequenz des Gesamtsystems (global) oder für jedes Element (Element by Element) bestimmt wird. Darüber hinaus kann die maximale Inkrementzahl als Abbruchkriterium bestimmt werden.

3.3.1.3 Outputs

Unter Outputs werden jene Ergebnisse ausgewählt, welche für eine nachfolgende Analyse der Problemstellung berechnet werden sollen. Dabei werden Field und History Outputs unterschieden. Field Outputs werden für den gesamten Modellkörper oder für Teile davon definiert und können nach erfolgter Berechnung in ABAQUS/CAE visualisiert werden. History Outputs werden hauptsächlich für

bestimmte Teile der Geometrie definiert, um eine spezielle Information zu erhalten. Ein solcher Output kann beispielsweise die Auflagerkraft sein.
History Outputs können auch nachträglich aus den Field Outputs erzeugt werden.
Für beide Output Varianten müssen eine Domain, die Frequency und die zu berechnende Ergebnisse definiert werden. Die Domain gibt an, für welchen Teil des Modells der Output berechnet wird. Zur Verfügung stehen: Whole Model, Set, Interaction. Die Frequency gibt die Häufigkeit an, mit jedem wievielten Inkrement das gesuchte Ergebnis gespeichert werden soll. Als Outputs können Spannungen, Verschiebungen, Kräfte, Energien, etc. ausgegeben werden.

3.4.2 Anwendung für den Kronendübel

Die für die Berechnungsverfahren STATIC, RIKS und DYNAMIC, EXPLICIT gewählten Einstellungen sind in Tabelle 11 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 11: Einstellungen für STATIC, RIKS und DYNAMIC, EXPLICIT

		STATIC, RIKS	DYNAMIC, EXPLICIT
NLGEOM		ON	ON
Time Period		-	50 sec
Incrementation Type		Automatic	Automatic
Max. Increment		500	Unlimited
Arc length	Initial	10-5	-
	Minimum	10-8	-
	Maximum	1035	-

Für alle weiteren Einstellungen wurde der Default Wert belassen.
Die für die Modellkörper gesuchten Field Outputs sind zusammen mit den zu treffenden Einstellungen in Tabelle 12 zusammengefasst

Tabelle 12: Field Output

Family	Whole Model	
Frequency	STATIC, RIKS	Every 5 increments
	DYNAMIC, EXPLICIT	Every 400 increments
gewählte Ergebnisse	Sij (i=1..3,j=1..3)	Spannungskomponenten
	PEij; LEij (i=1..3,j=1..3)	Plastische Verzerrungskomponenten Logarithmische Verzerrungskomponenten
	U_{ii}; V_{ii}; A_{ii} (i=1..3)	Verschiebungen Verschiebungsgeschwindigkeit Verschiebungsbeschleunigung
	CSTRESS	Kontaktdruck

Ein Ziel der Berechnung ist die Dübelkennlinie (siehe Abbildung 2) für die untersuchte Schubverbindung.
Deshalb werden am Auflager die Reaktionskräfte und an der Unterseite des Stahldübels am Kontrollpunkt die Verschiebung bestimmt. Dieselben Ergebnisse werden zwar auch in den Field Outputs berechnet, nur müssten in einem zusätzlichen Schritt diese Ergebnisse gezielt ausgelesen werden. Die Verschiebung wird bei beiden Berechnungsverfahren am definierten Kontrollpunkt nach Tabelle 9 bestimmt. Die Reaktionskraft wird bei STATIC, RIKS durch Summenbildung aller Reaktionskräfte an der Betonauflage (siehe Tabelle 9) berechnet. Bei DYNAMIC, EXPLICIT wird die Reaktionskraft durch die Summenbildung der Kontaktkräfte in der Kontaktfuge zwischen Betongurt und Auflager ermittelt.
Bei dynamischen Analysen sollte immer auch das Verhältnis der beiden Energien ALLIE und ALLKE bestimmt werden. ALLIE beschreibt dabei die innere und ALLKE die kinetische Energie. Das Verhältnis selbst dient zum Verifizieren der Ergebnisse. Sprunghafte Änderungen des Wertes ALLIE/ALLKE im Verlauf der Berechnung deuten immer numerische Probleme an. Unter Umständen können alle nach diesen Ausschlägen erhaltenen Ergebnisse nicht weiter verwendet werden.
Die für die Modellkörper gesuchten History Outputs sind zusammen mit den zu treffenden Einstellungen in Tabelle 13 zusammengefasst.

Tabelle 13: History Output

Anzahl der Inkremente siehe Tabelle 12			
Name des Outputs	Sets nach Tabelle 9	Output	
Betonauflage	Betonauflage	RF_{ii} (i=1..3)	Reaktionskräfte
Kontrollpunkt	Kontrollpunkt	U_{11}	Verschiebung in Richtung 11
Energy (nur dynamic explicit)	Whole model	ALLIE; ALLKE	Interne und kinetische Energie

3.5 Interaction – Beziehungen zwischen Parts

3.5.1 Allgemein

Im Modul „Interaction“ werden alle Verknüpfungen zwischen Parts definiert. Im ersten Schritt müssen die Kontakteigenschaften definiert werden. Diese werden

über „Interaction → Property → Create“ eingegeben und beschreiben das Verhalten sowohl in tangentialer als auch in der zur Oberfläche normal stehenden Richtung.

Die Eigenschaften in Tangentialrichtung werden wie folgt beschrieben.

- Friction Formulation
  - Frictionless
    Keine Reibung
  - Penalty oder Lagrange Multiplier (nur ABAQUS/Standard)
    Die Reibung wird über den Reibungskoeffizienten gesteuert.

Im Weiteren werden nur Punkte für Penalty als Friction Formulation angegeben.

- Directionality: Isotropic oder Anisotropic
- Depend – Data
  Definition eines Reibungskoeffizienten, der in Abhängigkeit von der Verschiebung oder des Kontaktdruckes angegeben wird.
- Reibungskoeffizient: Wert zwischen Null und Eins.
- Shear Stress
  Möglichkeit, um die Schubspannung in der Kontaktfläche zu limitieren.
- Elastic Slip
  Angabe eines Maximalwertes für die Relativverschiebung.

Für die Eigenschaften in Normalenrichtung wurden Defaultwerte verwendet. Ein sogenannter Overclosure muss jedoch definiert werden. Darunter wird das Eindringen eines Knotens, verursacht durch Verformung, der einen Kontaktfläche in die andere Kontaktfläche verstanden. Ist kein Eindringen erwünscht, ist Hard Contact einzustellen.

Zusätzlich kann auch definiert werden, ob eine Fläche, welche in Kontakt mit einer anderen Fläche tritt, sich von dieser wieder lösen darf.

Im zweiten Schritt muss die Art des Kontaktes zweier Flächen definiert werden. Dies erfolgt über „Interaction → Create“.

Folgende Interactions und Constraints (stellen Zwangsverbindungen dar) zählen im Zusammenhang mit dem Kronendübel zu den wichtigsten, wobei auch zusätzlich alle wesentlichen Eingaben angegeben sind:

- Contact Interaction

  Definiert den Kontakt einer Fläche. Dabei kann die Fläche in Kontakt mit einer zweiten Fläche (Surface-to-Surface) oder mit sich selbst (Selfcontact) stehen.

  - Master- und Slave-Surface

    Definiert die beiden zu verbindenden Flächen.

  - Slave Node/Surface Adjustment

    Nach diesen Einstellungen werden die Kontaktflächen während der Berechnung zueinander angepasst.

    - No Adjustment

      Keine Anpassung der verformten Struktur

    - Adjustment only to remove overclosure

      Eine Anpassung wird nur vorgenommen, wenn es zur Overclosure kommen würde.

    - Tolerance for adjustment zone

      Eine Anpassung wird nur bei Überschreiten der angegebenen Toleranz durchgeführt.

    - Set

      Eine Anpassung wird nur im angegebenen Set durchgeführt.

  - Contact Interaction Property

    Auswahl einer zuvor definierten Kontakteigenschaft.

- Tie Constraint

  Verbindet zwei Flächen mit jeweils unterschiedlich dicht definiertem Netz nach Kapitel 3.7. Dabei werden die Verschiebungen der Knoten der definierten Master-Surface auf die Knoten der Slave-Surface übertragen.

  - Master- und Slave-Surface

    Die Master Surface ist jene Fläche mit dem gröberen Netz nach Kapitel 3.7.

- Rigid Body Constraint

  Verbindet einen deformierbaren Körper mit einem Starrkörper.

- Coupling Constraint

  Verknüpft einen Punkt eines Körpers mit einer Fläche. Dabei wird die Verschiebung jenes Knotens des FE-Netzes, welcher am nächsten zum definierten Punkt liegt, auf den definierten Punkt übertragen.

- Control Point und Surface
  Angabe des Punktes und der Fläche, mit welcher dieser verknüpft wird.
- Coupling Type
  - Kinematic: Alle Freiheitsgrade könnnen selbst gewählt werden.
  - Distributing: Verschiebungen werden automatisch gesperrt, Rotationen können ausgewählt werden.
- Influence Radius
  Bereich, in welchem der Control Point in die Surface eingebunden wird.

- Embedded Region Constraint
  Eine Struktur wird dadurch in einer anderen Struktur eingebunden und über die Verschiebung verknüpft.
  - Embedded Region und Host Region

3.5.2 Anwendung für den Kronendübel

Für den Modellkörper werden sowohl für die beiden Seiten- und die Stirnfläche der Dübelleiste (siehe Tabelle 9) als auch für die daran angrenzenden Flächen des Betonkörpers (siehe Tabelle 9) Kontakteigenschaften festgelegt. Vorerst sind beide Definitionen ident.

Die für die Modellkörper erforderlichen Contact Properties sind in Tabelle 14 zusammengefasst. Für alle weiteren Eingaben werden Defaultwerte verwendet.

Tabelle 14: Contact Property

Name	Reibungseitlich	Reibungseitlich
Type	Contact Interaction	Contact Interaction
Tangential Behavior	Friction Coeff: 0,3; 0,4; 0,5; 0,6	Friction Coeff: 0,3; 0,4; 0,5; 0,6
Normal Behavior	Static riks: Augmented Lagrange Dynamic explicit: Default	Static riks: Augmented Lagrange Dynamic explicit: Default

Tabelle 15: Interaction

Name	Kontaktseitlich	Kontaktstirn
Master Surface	Betonseitlich	Betonstirn
Slave Surface	Stahlseitlich	Stahlstirn
Adjustment	Adjust only to remove overclosure	Adjust only to remove overclosure
Contact Property	Reibungseitlich	Reibungstirn

Die Definition des Kontaktes zwisches Dübelleiste und umgebenden Beton ist in Tabelle 15 zusammengefasst. Die erforderlichen Zwangsverbindungen zwischen Anker und Beton, Bewehrung und Beton und im Betonkörper selbst sind in Tabelle 16 zusammengefasst.

Tabelle 16: Constraint

Anker	
Name	Anker1 bzw. Anker2
Type	Coupling
Control Point	Obere Punkt des Ankers (siehe Abbildung 5)
Surface	Obere Fläche des Betonkörpers
Constraint Deegres of freedom	U1,U2,U3
Influence radius	Dazu muss der Abstand vom Control Point zum nächtsgelegenen Punkt des FE – Netzes gemessen werden.
Bewehrung	
Name	Bewehrung
Type	Embedded region
Embedded region	Gesamte Bewehrung (siehe Abbildung 6)
Host region	Whole model
Tie constraint	
Name	Tie constraint
Type	Tie
Master Surface	Beton_master (siehe Tabelle 9)
Slave Surface	Beton_slave (siehe Tabelle 9)
Constraint enforcment method	Surface to Surface

3.6 LOAD – Belastungen und Randbedingungen

3.6.1 Allgemein

Das Modul „Load“ dient zur Festlegung der Belastungen und Randbedingungen.
Die Belastung, das sind z.B. Einzellasten, Momente oder Flächenlasten, werden über „Load → Create“ eingegeben. Anzugeben sind der Punkt oder die Region des Lastangriffes, dessen Richtung und die Größe der Belastung.
Die Randbedingungen werden über „BC (Boundary Conditions) → Create“ definiert.
Zur Auswahl stehen:

- Symmetry/Antisymmetry/Encastre
  Definition einer Symmetrie- oder Antisymmetrieebene oder einer eingespannten Ebene durch Auswahl einer Region oder von Punkten. Die Richtung der Symmetrie ist anzugegeben.
- Displacement/Rotation
  Definition von Verschiebungen und Verdrehungen einer Ebene oder ausgewählter Punkte. Es werden jene Freiheitsgrade aktiviert, welche gesperrt werden sollen oder mit einem bestimmten Wert belegt werden.

Für eine dynamische Berechnungsmethode wie DYNAMIC, EXPLICIT werden Lasten bzw. Randbedingung in Abhängigkeit der Zeit aufgebracht. Damit ist die Angabe einer Belastungsgeschwindigkeit notwendig. Deren Definition erfolgt mittels „Tools → Amplitude“. Folgende Möglichkeiten stehen dazu zur Verfügung:

- Tabular
  Auf einer Zeitskala werden Punkte festgelegt, wobei jedem Punkt ein Wert von Null bis Eins zugewiesen ist. Eins bedeutet volle Belastung. Zwischen den einzelnen definierten Punkten ist der Belastungsverlauf linear.
- Equally Spaced
  Dabei wird ein immer gleich bleibender Zeitintervall angegeben und eine Liste von Amplituden. Zwischen den Werten wird linear interpoliert.
- Smooth Step
  Es werden Punkte an einer Zeitskala definiert. Befindet sich im Verlauf ein Knick, wird dieser in einem angegebenen Zeitintervall ausgerundet.

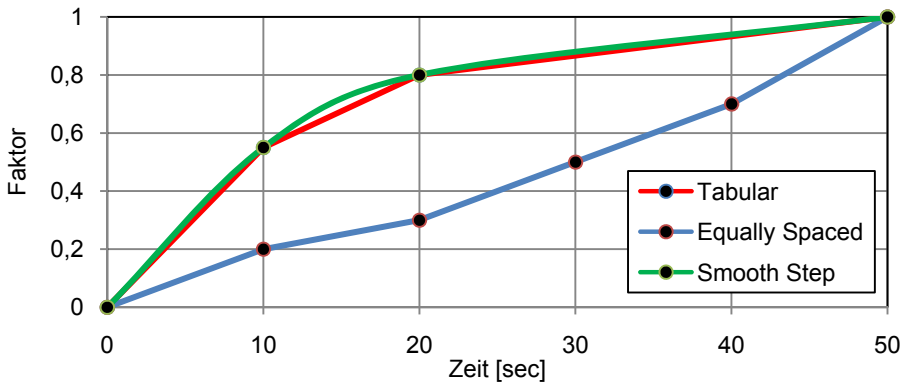


Diagramm 4: Amplituden

3.6.2 Anwendung für den Kronendübel

Die Simulation der Belastung der Dübelleiste erfolgt nicht durch eine Last, sondern durch Vorgabe einer Verschiebung an der Unterseite des Stahldübels, die als Randbedingung definiert ist (siehe Abbildung 9).

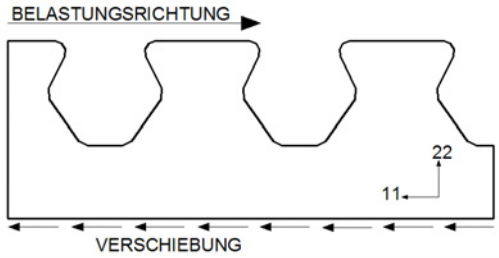


Abbildung 9: Verschiebungsrandbedingung

Mit den im Vorfeld definierten Sets können die Randbedingungen leicht definiert werden. Tabelle 18 enthält alle notwendigen Randbedingungen.

Bei DYNAMIC, EXPLICIT muß die Belastungsgeschwindigkeit definiert werden. Für den Kronendübel wurde für diese der Wert 0,5mm/sec vorgegeben. Dafür wurde eine Amplitude nach Tabelle 17 definiert. Es werden zwei Punkte angegeben. Zum Zeitpunkt Null ist die Verschiebung Null. Zum Zeitpunkt 50sec hat die Verschiebung den vollen Wert von 25mm erreicht.

Tabelle 17: Amplitude

Name	Ramp
Type	Tabular
Amplitude Data	Zwei Punkte müssen definiert werden: Time:0;Amplitude:0 Time:50;Amplitude:1

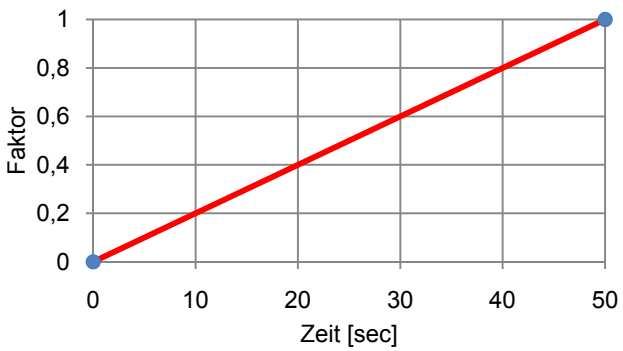


Diagramm 5: Amplitude

Tabelle 18: Boundary Conditions

Betonauflage	
Name	Betonauflage
Type	Displacement/Rotation
Region	Static,riks: Set Betonauflage Dynamic,explicit: Part Auflager (siehe Tabelle 9)
Constraint	U1=U2=U3=0
Verschiebung	
Name	Stahl_unten
Type	Displacement/Rotatin
Region	Set Stahl_unten (siehe Tabelle 9)
Constraint	U1=25;U2=0
Symmetrieebene in y-Richtung	
Name	YSYMM
Type	Symmetry
Region	Symmetrieebene
Constraint	Symmetrie in Y-Richtung
Symmetrie in z-Richtung	
Name	ZSYMM
Type	Symmetry
Region	Beide unteren Punkte der Anker
Constraint	Symmetrie in Z-Richtung

3.7 FE – Netz (MESH)

3.7.1 Allgemein

Bei der Erstellung des FE – Netzes ist zu beachten, dass die Parts unterschieden werden in dependent und independent. Ob ein Part depend oder indepen ist, wird im Modul „Assembly“ bei der Erstellung der Instanz ausgewählt. Bei

dependent Parts wird das Netz im lokalen Koordinatensystem erstellt und für alle Instanzen übernommen. Bei independent Parts wird das Netz im globalen Koordinatensystem am gesamten Modellkörper erstellt.
Das Netz wird mittels sogenannter Seeds erstellt, aus denen sich das Netz aufbaut und die den nachfolgend ausgewählten Elementen entsprechen. Dabei werden entlang von Kanten oder Linien Punkte definiert, die zur Orientierung bei der Generierung des Netzes dienen. Dazu stehen folgende Varianten zur Verfügung:

- Instance
  Die Seeds werden gleichmäßig über einen zuvor definierten Bereich des Modellkörpers verteilt. Die Feinheit des Netzes wird durch Eingabe der ungefähren Elementgröße gesteuert.
  Durch die Aktivierung von Curvature Control werden Seeds an Rundungen mit kleinerem Radius bzw. an kurzen Kanten des betrachteten Bereichs feiner gesetzt. Der Minimum Size Factor verhindert aber sehr eng gesetzte Seeds.
- Edge by Number
  Eine festgelegte Anzahl von Seeds wird entlang einer gewählten Kante oder Linie mit gleichmäßigem Abstand verteilt.
- Edge by Size
  Seeds werden mit festgelegter Größe entlang einer gewählten Kante oder Linie gleichmäßig verteilt.
- Edge Biased
  Es wird die Anzahl der Seeds und ein Skalierungsfaktor festgelegt. Dieser definiert einen entlang der ausgewählten Linie oder Kante zunehmenden Abstand der Seeds. Die Richtung, in welcher die Zunahme der Seedsgröße erfolgt, wird durch den Ort, an dem die Kante oder Linie angeklickt wird, festgelegt.

Über „Mesh → Instance“ wird die Region ausgewählt, für die ein Netz generiert werden soll. Vorerst müssen jedoch über „Mesh → Control“ die Form der Netzelemente und die Art der Netzerstellung und über „Mesh → Element“ das zu verwendende Element angegeben werden.

Folgende Kontrollmöglichkeiten stehen zur Verfügung:

- Elementshape: definiert die Form der Netzelemente.
    - o Hex

      Es werden ausschließlich quaderförmige Elemente verwendet.
    - o Hex – dominated

      Es werden im Allgemeinen quaderförmige Elemente verwendet. Erfordert es die Geometrie, werden zusätzlich tetraederförmige Elemente verwendet.
    - o Tet

      Es werden ausschließlich tetraederförmige Elemente verwendet.
    - o Wedge

      Wedge sind rampenförmige Elemente.
- Technique
    - o Structured

      Der Netzgenerator versucht, ein möglichst gleichmäßiges Netz zu erzeugen. Structured wird hauptsächlich bei sehr einfachen kubischen Geometrien eingesetzt.
    - o Sweep

      Sweep dient zur Erzeugung eines Netzes für komplexe Geometrien. Dabei wird an einer auszuwählenden Oberfläche des Körpers ein zweidimensionales Netz erzeugt und entlang der auf diese Oberfläche normal stehenden Richtung über die Dicke des Körpers extrudiert. Eine Unterteilung ist auch in diese Richtung möglich.

Bei der Verwendung von Sweep kann zusätzlich noch einer der folgenden Algorithmen gewählt werden:

- Medial Axes

  Die ausgewählte Region wird vom Netzgenerator in einfachere kleinere Regionen unterteilt, deren Netze ausschließlich mit der Meshing-Technique Structured ausgeteilt werden. Damit entsteht in Summe ein gleichmäßiges Netz.
- Advanced Front

  An den Rändern der ausgewählten Region werden die Elemente gleichmäßig verteilt. Anschließend wird das Netz von außen nach innen erzeugt. Dabei entsteht jedoch ein sehr unregelmäßiges Netz.

Zur Erstellung von symmetrischen Netzen kann das Tool „Partition“ angewendet werden, mit dem z.B. ein Part in Teilbereichen unterteilt werden kann. An den so zusätzlich entstehenden Kanten oder Linien können wiederum Seeds gesetzt werden, wodurch die Netzgenerierung besser gesteuert wird.
Für den Elementtyp kann folgendes gewählt werden:

- Element Library: Wahl zwischen Standard und Explicit (wird durch das Berechnungsverfahren bestimmt).
- Geometric Order: linearer oder quadratischer Ansatz
- Family
  Die Familie wird durch die Problemstellung festgelgt. (z.B.: 3DStress, Accoustic, etc.).
- Element Controls
  Auswahl zwischen Reduced oder Full Integration. Der Unterschied liegt in der Anzahl an Integrationspunkten und beeinflusst wesentlich die Berechnungsgeschwindigkeit.

Über „Mesh → Verify“ kann abschließend die Qualität des generierten Netzes bezüglich dem geometrischen Aufbau der Elemente und der analytischen Verträglichkeit überprüft werden. Folgende Statistical Checks können durchgeführt werden:

- Mit „Face Corner Angel less than“ wird der Winkel zwischen zwei Flächen eines Elements mit einem angegebenen Minimumgrenzwert überprüft.
- Mit „Face Corner Angle greater than“ wird der Winkel zwischen zwei Flächen eines Elements mit einem angegebenen Maximumgrenzwert überprüft.
- Mit „Aspect ratio“ wird das Verhältnis der längsten zur kürzesten Seite eines Elements überprüft.
- Mit „Edge shorter than“ wird die Kante eines Elements mit einem Minimumgrenzwert überprüft.

Nach erfolgtem Durchlauf der Checks für alle Elemente im gewählten Bereich werden, falls zutreffend, Warnings bzw. Errors ausgegeben. Warnings sollten so gering wie möglich gehalten werden. Errors müssen vermieden werden.

3.7.2 Anwendung für den Kronendübel

Um für das Dübelblech (siehe Abbildung 4) ein möglichst symmetrisches Netz zu erzeugen, wurde entlang von Symmetrielinien die Geometrie in Partitionen unterteilt. Die Partitionen, Anzahl von Seeds und das generierte Netz sind in Abbildung 10 abgebildet. Es wurde versucht, Ausrundungen durch lineare Elemente gut anzunähern.

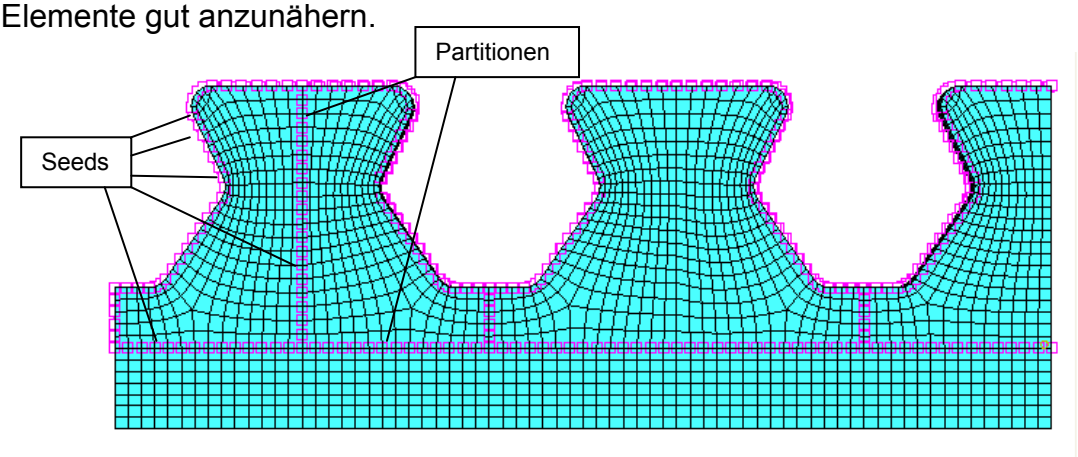


Abbildung 10: Seeds und Netz des Parts Dübelblech

Das Netz für Betonkörper1 und Betonkörper2 (siehe Abbildung 5) wird mit der gleichen Genauigkeit wie das Netz des Dübelbleches generiert und ist in Abbildung 11 dargestellt. In Dickenrichtung wurden zwei unterschiedlich unterteilte Netze untersucht. Das erste Modell sah für das Dübelblech, den Betonkörper1 und den Betonkörper2 ein Element in Dickenrichtung vor. In einem zweiten Versuch wurden für den Stahldübel und den Betonkörper1 zwei und für den Betonkörper2 drei Elemente in Dickenrichtung vorgesehen (siehe Abbildung 11). Den Unterschied im Ergebnis verdeutlicht Diagramm 6.

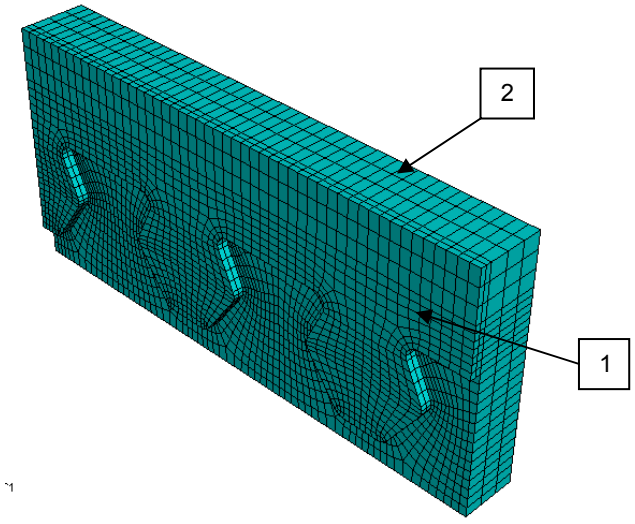


Abbildung 11: Feines Netz des Betonkörpers

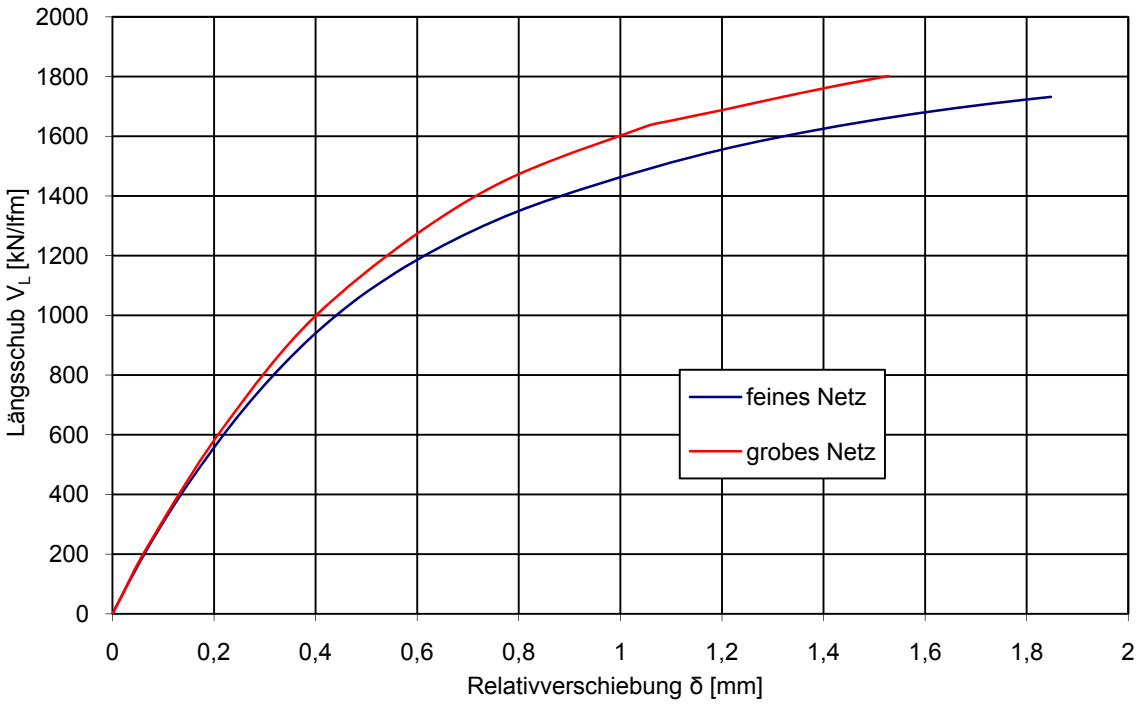


Diagramm 6: Unterschied verschieden feiner Netze mit STATIC, RIKS

Dem restlichen Betonkörper wurde ein grobes Netz zugeordnet. In Abbildung 12 ist das gesamte FE – Modell dargestellt.

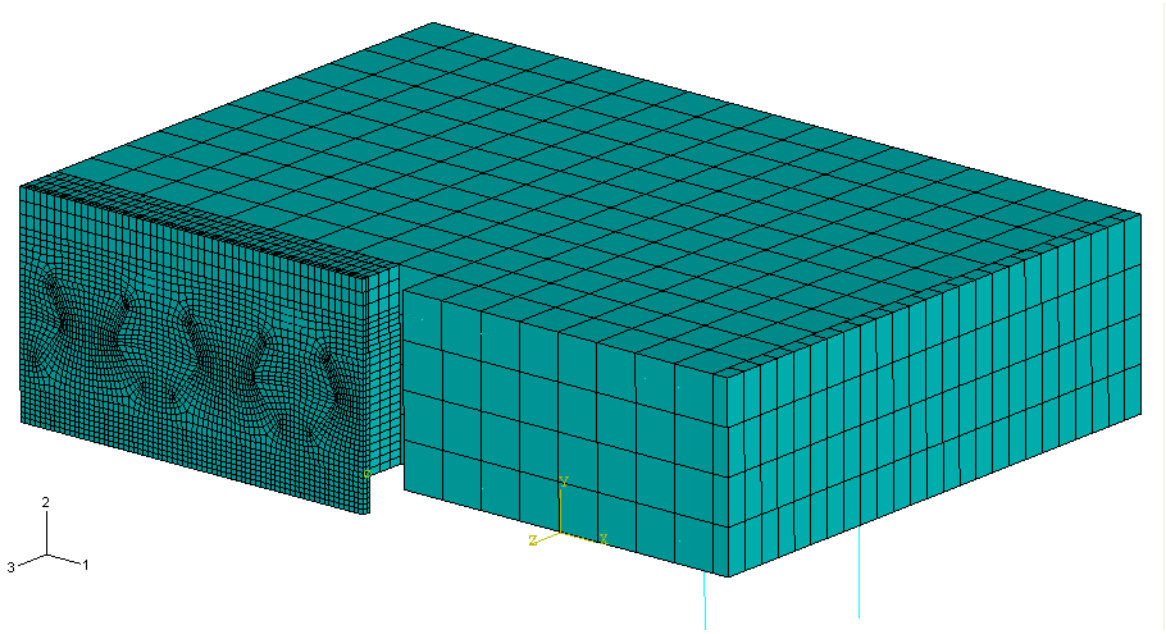


Abbildung 12: Gesamtes Modell

In einem ersten Versuch der Netzgenerierung wurde kein tie constraint vorgesehen. Der Unterschied im Ergebnis mit Anwendung eines tie constraints und einem durchgehendem Netz ist im Diagramm 7 dargestellt.

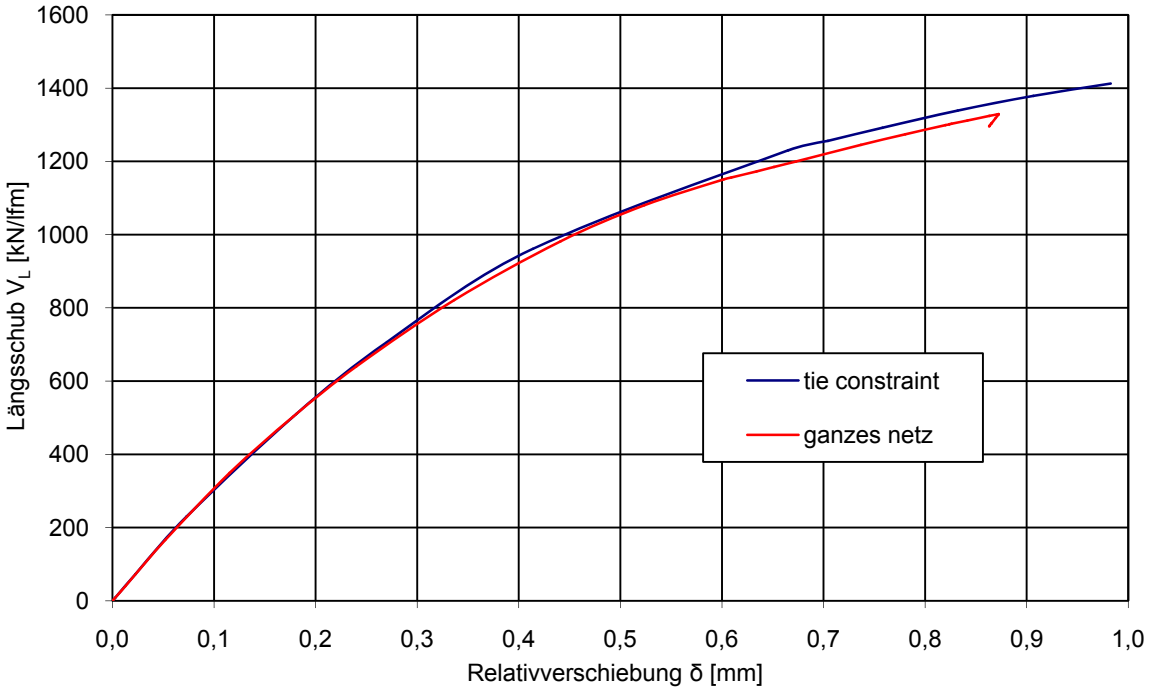


Diagramm 7: Unterschied tie constraint und durchgehendes Netz

Das FE – Modell mit dem tie constraint besitzt wesentlich weniger Elemente. Numerische Warnings wurden nur für die Netze des Dübelblechs, des Betonkörper1 und des Betonkörper2 ausgegeben. Das durchgehende Netz besitzt hingegen numerische Warnings über die gesamte Betonblockbreite.

Das in Diagramm 7 dargestellte Ergebnis verdeutlicht, dass aufgrund der besseren numerischen Verträglichkeit des Modells mit der Anwendung des tie constraint die Berechnung stabiler ist. Aufgrund dieses Zusammenhanges wurden alle Berechnungen mit einem tie constraint im dargestellten Bereich durchgeführt.

Die Anker bestehen nur aus einem linienförmigen Element (siehe Tabelle 19). Für die Bewehrung war es ausreichend, eine globale Elementlänge von 20mm zu wählen. Die verwendeten Elementtyps und Netzeinstellungen sind in Tabelle 19 als Übersicht dargestellt.

Tabelle 19: Einstellungen für das FE - Netz

Bewehrung, Anker	
Family	Truss
Geometric Order	Linear
Name	T3D2
Volumkörper	
Family	3DStress
Geometric Order	Static,riks: Quadratic Dynamic,explicit:Linear
Name	Static,riks: C3D20R Dynamic,explicit: C3D8R

3.8 Job – Erstellung des Input File

Dieses Modul dient zur Erstellung eines Inputfiles (*.inp). Dieses wird zur Analyse an den Applikationsserver der TU - Wien übermittelt. Über „Job → Create“ wird diese Datei erstellt. Als Job Type muss Full analysis aktiviert werden. Weitere Einstellungen sind nicht zu berücksichtigen, da diese nur zur Anwendung kommen, wenn der Job am eigenen Rechner durchgeführt wird.
Ein Beispiel eines *.inp – file ist in Anhang D abgebildet.

3.9 Visualization – Darstellung der Ergebnisse

3.9.1 Allgemein

In diesem Modul können praktisch alle Field Outputs grafisch dargestellt werden (siehe z.B. Abbildung 7). Die Ergebnisse können sowohl am unverformten als auch am verformten Modell darstellt werden. Die Auswahl erfolgt über „Plot → Contours“. Die Auswahl, welche der im Modul „Step“ definierten Ergebnisse dargestellt werden sollen, erfolgt über „Result → Field Output“.
History Outputs werden über „Result → History Output“ aufgerufen.
Wurde die Kraft auf einer Fläche als History Output definiert, gibt es für jeden Knoten einen eigenen Output. Durch Selektion aller Kräfte, welche an ausgewählten Knoten berechnet wurden, wird über die Schaltfläche Save As ein Fenster mit der Möglichkeit der Summenbildung geöffnet.
Über „Report → XY“ kann auf die gespeicherten History Outputs zugegriffen werden. Durch Selektion der erforderlichen Outputs und Bestätigung mit OK

werden die Ergebnisse in tabellarischer Form in eine Datei in Textform geschrieben.
Es besteht die Möglichkeit, solche XY – Plots auch nachträglich aus den Field Outputs zu definieren. Dafür wird über „Tool → XY Data → Create“ die Möglichkeit ODB Field Output ausgewählt. Im anschließendem Menü wird im Menü „Variables“ das gesuchte Ergebnis festgelegt und im Menü „Element/Nodes“ der Bereich im Modell ausgewählt, für welches es bestimmt werden soll.

3.9.2 Anwendung für den Kronendübel

Für die Erstellung der Dübelkennlinie wurde als History Output die Verschiebung des Dübelblechs und die Kraft als Reaktionskraft der Einspannung (STATIC, RIKS) bzw. der Kontaktdruck an der Kontaktfläche (DYNAMIC, EXPLICIT) festgelegt. Zur Bestimmung der Gesamtkraft an der Einspannung wird die Summe aller Reaktionskräfte gebildet. Im Gegensatz dazu wird die Kraft in der Kontaktfläche schon als Summe berechnet.
Die Verschiebung, welche am definierten Kontrollpunkt (siehe Tabelle 9) bestimmt wurde, wird ebenfalls in den gleichen Berechnungsintervallen abgespeichert. Die Textdatei wird nun über XY Plots erstellt und kann in ein Tabellenkalkulationsprogramm importiert und grafisch dargestellt werden.
Für die Ergebnisse der Berechnungsmethode DYNAMIC, EXPLICIT werden die Energien ALLIE und ALLKE explizit abgespeichert und in einem weiteren Schritt im Tabellenkalkulationsprogramm dividiert, um sprunghafte Änderungen im Berechnungsverlauf ausfindig zu machen.

4. Untersuchung der inneren Abläufe der Modellkörper

4.1 Allgemein

Bevor ein funktionierender Modellkörper für jede der drei zu analysierenden Stahlkronengeometrien erreicht werden konnte, mußte eine Vielzahl von Berechnungen mit den unterschiedlichsten Varianten bezüglich Modellierung und Materialparameter durchgeführt werden. In Tabelle 18 sind alle 68 Berechnungen, anhand derer der Einfluss der betrachteten Parameter untersucht wurde, angeführt. Die Abstufung des Reibungskoeffizienten f erfolgt jeweils in Schritten von 0,1. Die Abkürzungen S,R und D,E stehen für STATIC, RIKS bzw. DYNAMIC, EXPLICIT.
Jene mit einem * gekennzeichneten Berechnungen werden in dieser Arbeit nachfolgend nicht mehr abgebildet. Diese wurden erstellt, bevor die Ergebnisse für den Dübel „Krone Kurz“ ausgewertet werden konnten und sich in weiterer Folge zeigte, dass mit den dabei betrachteten Werten für den Dilation Angle ψ kein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt wird.
In den folgenden Abschnitten werden für jede der drei untersuchten Dübelformen „Krone Kurz“, „Krone Lang“ und „Krone Rund“ die Ergebnisse dargestellt und im Anschluss daran analysiert. Die Analyse erfolgt anhand der Dübelkennlinien und einer Spannungs- und Verzerrungsbetrachtung in vier definierten Punkten der Kronendübelleiste. Diese sind in Übereinstimmung mit den Klebestellen der DMS an den jeweiligen Push – Out Versuchskörpern festgelegt, mittels derer die Verzerrungen während der Versuchsdurchführung mitgemessen wurden (siehe Abbildung 13). In Abbildung 13 ist auch die Richtung der Verzerrungen ε_{ij} definiert. Positive Werte stellen Dehnungen und negative Werte Stauchungen dar. Eine Gegenüberstellung der numerisch ermittelten Daten mit denen aus dem Versuch kann nicht angegeben werden, da noch keine ausgewerteten Versuchsdaten zur Verfügung standen.

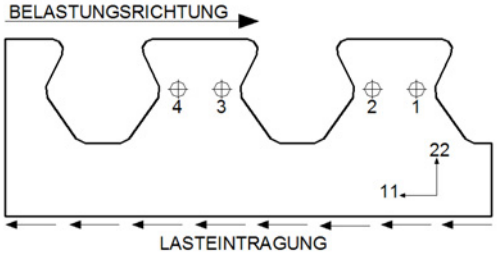


Abbildung 13: Definition der Richtung für die Dehnungen

Wie in Kapitel 2 beschrieben, wurden während der Versuchsdurchführung zwei verschiedene Relativverschiebungen δ gemessen. In den nachfolgenden Diagrammen sind die daraus resultierenden Dübelkennlinien jeweils mit Versuch1 und Versuch2 gekennzeichnet. Versuch1 stellt die Relativverschiebung δ zwischen Betonplatte und Stahlträger dar und Versuch2 die zwischen den beiden Druckplatten des Prüfrahmens. Da in dieser auch immer die Verformung des Prüfrahmens selbst eingeht, hat diese zumindest immer eine geringere Anfangssteifigkeit. In den Modellierungen des Kronendübels wurde immer die Relativverschiebung δ zwischen Stahlträger und Betonplatte bestimmt.

Neben den Spannungen und Verzerrungen im Kronendübel wurde die Abhebung der Betonplatte bestimmt. Diese wurde am Anfang bzw. am Ende der Lasteintragungslänge oberhalb der Dübelleiste am Betonkörper bestimmt und in wird in weiterer Folge mit Δ1 bzw. Δ2 nach Abbildung 14 angegeben

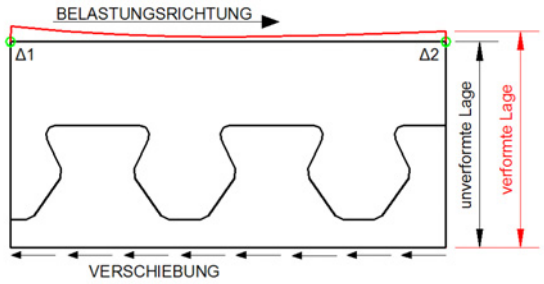


Abbildung 14: Punkte zur Bestimmung der Abhebung Δ

Weiters wird versucht, den Kraftfluss innerhalb des modellierten Betongurtes anhand eines Fachwerkmodells vereinfacht abzubilden. Abschließend wird der Spannungsverlauf in der Querbewehrung untersucht.

Wie im Kapitel 3.1.2 beschrieben, wurde aus Symmetriegründen jeweils nur ein Viertel des Versuchskörpers nachgebildet. Damit mussten für den Vergleich der Dübelkennlinien (numerisch – experimentell) mittels FE - Simulation die erhaltenen Kräfte auf die gesamte Versuchskörpergeometrie umgerechnet werden. Um die Ergebnisse der einzelnen Modellkörper miteinander vergleichbar zu machen, werden die Kräfte in [kN/lfm] angegeben.

Ein Vergleich der Dübelkennlinien mit denen der experimentellen Versuche wird aufgrund noch nicht fertig ausgewerteter Messdaten nur für die untersuchten Kronendübelleisten der ersten Versuchsserie angegeben.

Tabelle 20: Durchgeführte FE - Berechnungen

Name	Ψ	f	seitliche Reibung	red. Zug-festigkeit	Berechnungs-Verfahren	Bemerkung
Krone Kurz						
KK1	15	0,3	ja	nein	S,R	kein Tie Constraint
KK2	15	0,3	ja	nein	S,R	grobes Netz
KK3 – KK10	15	0,3 – 0,6	ja	nein	S,R und D,E	-
KK11 – KK18	23,3	0,3 – 0,6	ja	nein	S,R und D,E	-
KK19 – KK26	31,6	0,3 – 0,6	ja	nein	S,R und D,E	-
KK27 – KK35	40	0,3 – 0,6	ja	nein	S,R und D,E	-
KK36	36,31	0,3	ja	nein	D,E	-
KK37	45	0,3	ja	nein	D,E	-
KK38	36,31	0,3	nein	nein	D,E	-
KK39	36,31	0,3	ja	ja	D,E	-
KK40	36,31	0,3	nein	ja	D,E	-
KK41 und KK42	36,31	0,3	nein	ja	S,R und D,E	-
KK43 und KK44	45	0,3	nein	ja	S,R und D,E	-
Krone Lang						
KL1* und KL2*	15	0,3	ja	nein	S,R und D,E	-
KL3* und KL4*	23,3	0,3	ja	nein	S,R und D,E	-
KL5* und KL6*	31,6	0,3	ja	nein	S,R und D,E	-
KL7* und KL8*	40	0,3	ja	nein	S,R und D,E	-
KL9 und KL10	36,31	0,3	nein	ja	S,R und D,E	-
KL11 und KL12	45	0,3	nein	ja	S,R und D,E	-
Krone Rund						
KR1* und KR2*	15	0,3	ja	nein	S,R und D,E	-
KR3* und KR4*	23,3	0,3	ja	nein	S,R und D,E	-
KR5* und KR6*	31,6	0,3	ja	nein	S,R und D,E	-
KR7* und KR8*	40	0,3	ja	nein	S,R und D,E	-
KR9 und KR10	36,31	0,3	nein	ja	S,R und D,E	-
KR11 und KR12	45	0,3	nein	ja	S,R und D,E	-

4.2 Modellkörper „Krone Kurz“

4.2.1 Dübelkennlinie

Die ersten Vergleichsberechnungen wurden für die Stahlkrone „Krone Kurz“ durchgeführt. Deshalb sind für diesen Dübel die meisten Daten vorhanden. Diagramm 8 zeigt alle mit der Berechnungsmethode STATIC, RIKS ermittelten Dübelkennlinien. Die seitliche Reibung ist bei diesen Berechnungen berücksichtigt. Der Zugbereich des Betons ist nicht reduziert.

Es zeigt sich, daß der ideale Bereich des Dilation Angle zwischen ψ=40° und ψ=31,6° liegt. Der jeweils maximal erreichte Wert für die Längsschubtragfähigkeit V_L liegt mit ψ=31,6° Angle unterhalb der experimentell ermittelten maximale Traglast und bei Berechnungen mit ψ=40° knapp darüber. Die Berechnung mit ψ=15° und f=0,6 brachte kein Ergebnis. Die größten Werte für die Relativverschiebung δ wurden mit dem Reibungskoeffizienten f=0,3 erzielt. Eine Steigerung von f führte in allen Fällen zu einem früheren Abbruch der Berechnung.

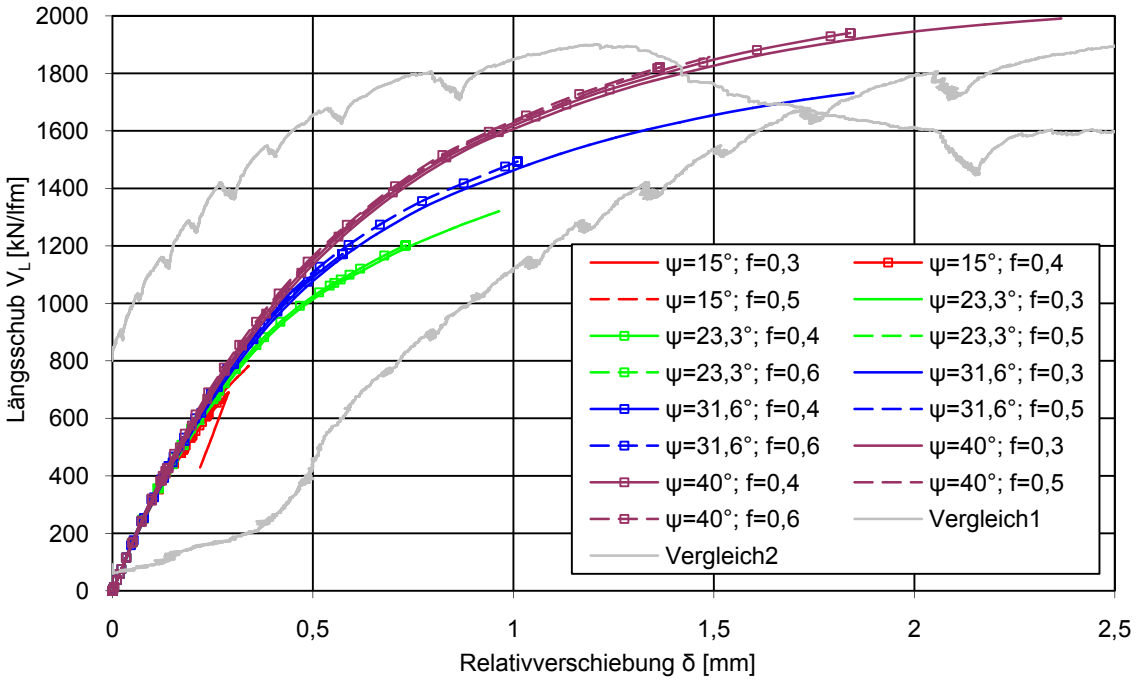


Diagramm 8: Dübelkennlinien, „Krone Kurz“, Berechnungsverfahren STATIC,RIKS

Um die Ergebnisse besser vergleichen zu können, sind in Diagramm 9 die erreichten Traglasten als Balkendiagramm dargestellt.

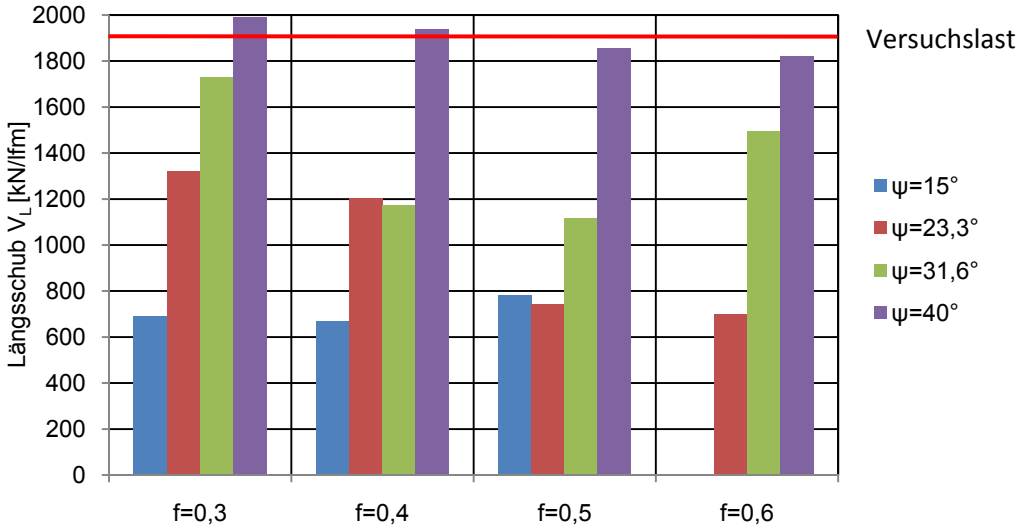


Diagramm 9: Traglast, „Krone Kurz“, Berechnungsverfahren STATIC, RIKS

Um die beiden Berechnungsverfahren STATIC, RIKS und DYNAMIC, EXPLICIT untereinander vergleichen zu können, wurden alle 16 in Diagramm 8 dargestellten Kombinationsmöglichkeiten mit dem Verfahren DYNAMIC, EXPLICIT wiederholt.
Die Ergebnisse sind in Diagramm 10 dargestellt. Da sich mit dem Berechnungsverfahren DYNAMIC, EXPLICIT bei Variation des Reibungskoeffizienten f keine nennenswerten Änderungen ergaben, sind nur jene mit einem f=0,3 angeführt.
Die Ergebnisse nach DYNAMIC, EXPLICIT werden nur bis zu jener Verschiebung gewertet, bis im Verlauf des Verhältnisses der internen Energie ALLIE zur kinetischen Energie ALLKE eine sprunghafte Änderung sichtbar wird. Für die im Diagramm 10 dargestellten Ergebnisse liegt dieser Punkt bei ca. 19mm Verschiebung.
Die Ergebnisse bestätigen den angenommenen Bereich für den Dilation Angle zwischen ψ=31,6° und ψ=40°. Diese Berechnungen wurden mit seitlicher Reibung und nicht reduzierter Betonzugfestigkeit durchgeführt. Der Reibungskoeffizient hatte auf den Berechnungsverlauf keinen Einfluss.

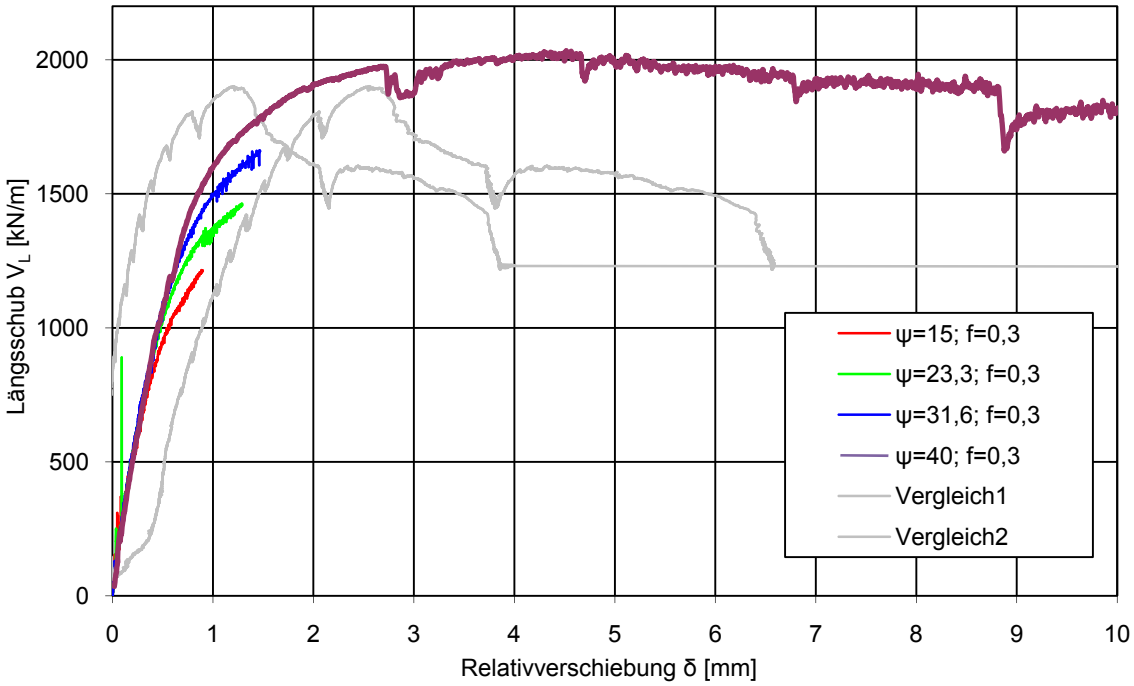


Diagramm 10: Dübelkennlinien, „Krone Kurz“, Berechnungsverfahren DYNAMIC, EXPLICIT

Da mit den bisher betrachteten Kombinationen von Dilation Angle ψ und Reibunskoeffizient f sowohl mit STATIC, RIKS als auch mit DYNAMIC, EXPLICIT kein wirklich zufriedenstellendes Ergebnis erzielt wurde, sind mit dem Berechnungsverfahren DYNAMIC, EXPLICIT weiterführende Berechnungen mit den Werten ψ=36,31° und ψ=45° durchgeführt worden. Ein zufriedenstellendes Ergebnis würde eine in guter Näherung ausreichende Übereinstimmung der numerisch generierten Daten mit jenen aus dem Versuch darstellen.

Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Diagramm 11 rot bzw. rosa dargestellt.

Zusätzlich wurde auch der Einfluss einer reduzierten Betonzugfestigkeit nach Kapitel 3.3 und die resultierenden Auswirkungen bei Vernachlässigung der seitlichen Reibung zwischen Dübelleiste und Beton untersucht. Beide Untersuchungen wurden jeweils wieder mit ψ=36,31° und ψ=45° durchgeführt. Mit der Kombination ψ=36,31° - reduzierter Betonzugfestigkeit – Vernachlässigung der seitlichen Reibung konnte die beste Übereinstimmung der Dübelkennlinie mit jener aus dem Versuch erzielt werden. Diese ist blau ebenfalls in Diagramm 11 dargestellt.

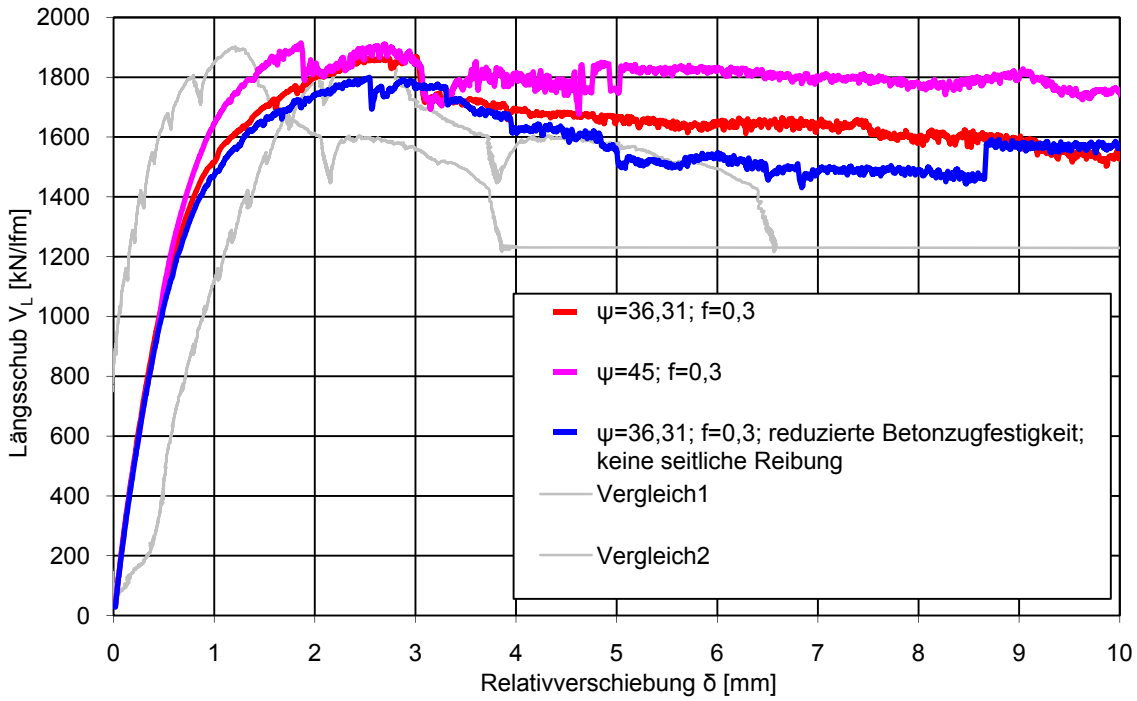


Diagramm 11: Dübelkennlinien, „Krone Kurz“, Berechnungsvefahren DYNAMIC, EXPLICIT

Das Verhältnis der internen zur kinetischen Energie wird für den Dübel „Krone Kurz“ beispielhaft dargestellt. Für die beiden weiteren Dübel „Krone Lang“ und „Krone Rund“ liegt die sprunghafte Änderung, wie sie hier dargestellt wird, ungefähr im gleichen Bereich. Diagramm 12 zeigt das Ergebnis der in Diagramm 11 blau dargestellten Kurve für den gesamten Berechnungsverlauf. Die Trennung zwischen rotem und blauem Bereich kennzeichnet jene Relativverschiebung δ, bei welcher das Verhältnis der internen zur kinetischen Energie eine sprunghafte Änderung aufweist. Das Verhältnis der Energien zur Relativverschiebung ist in Diagramm 13 dargestellt.

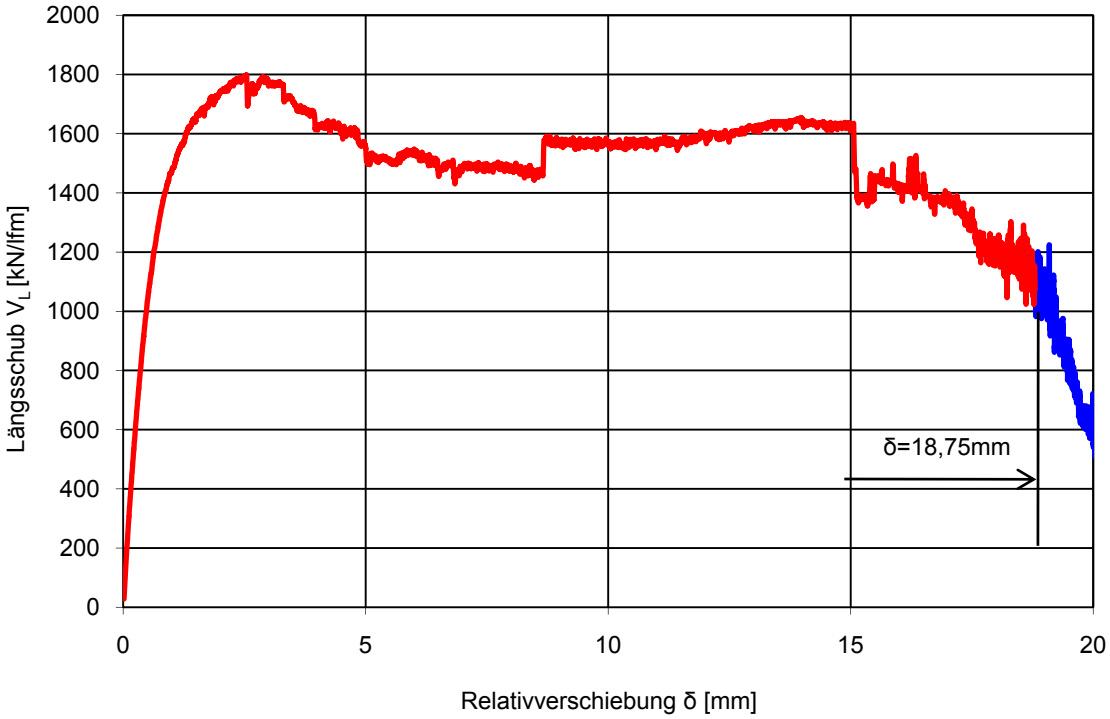


Diagramm 12: Dübelkennlinie, „Krone Kurz“, gesamter Berechnungsverlauf

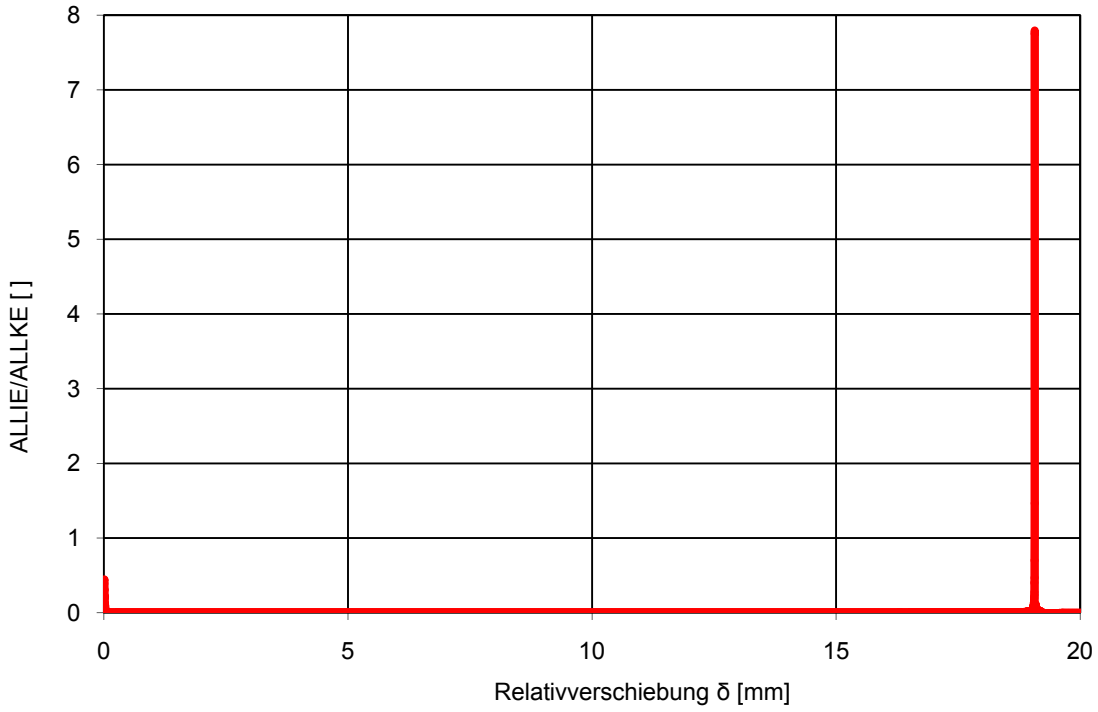


Diagramm 13: Energien ALLIE/ALLKE, „Krone Kurz“

4.2.2 Spannungs- und Verzerrungsanalyse

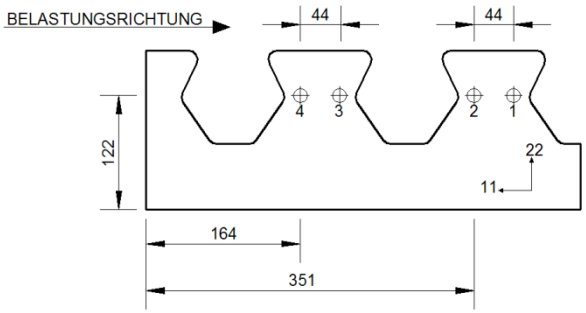


Abbildung 15: Definition für die Richtung der Dehnungen

Für die in Abbildung 15 angegebenen Punkte sind in den Diagrammen 14 und 15 die Spannungsverläufe und in Diagramm 16 die Verzerrungsverläufe, aufgetragen über der Relativverschiebung δ, dargestellt. In den Verzerrungsverläufen ist zusätzlich jener Bereich gekennzeichnet, in welchem der linear-elastische Bereich endet. Dieser liegt in diesem Fall zwischen δ = 1,0 mm und δ = 2,5 mm. Diese Analysen wurden mit jenem Modell durchgeführt, welches mit ψ=36,31°, f=0,3, reduzierter Betonzugfestigkeit und vernachlässigter seitlicher Reibung (siehe Diagramm 11) berechnet wurde.

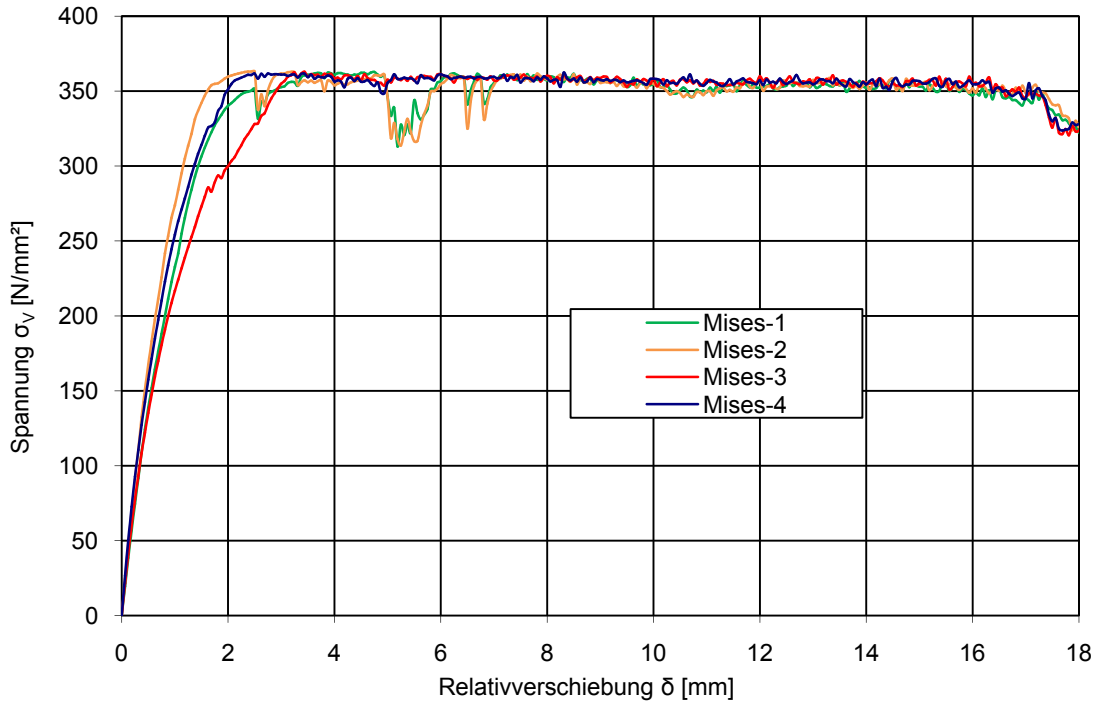


Diagramm 14: Spannungen von Mises, „Krone Kurz“

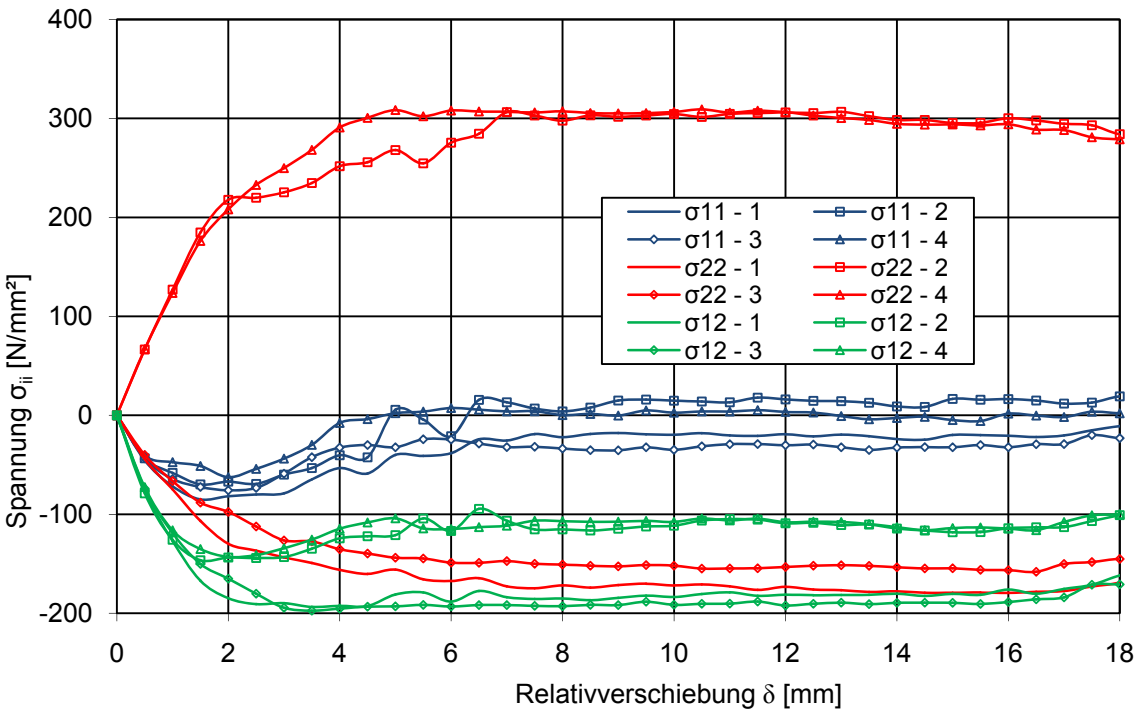


Diagramm 15: Spannungen σ_{ii}, „Krone Kurz“

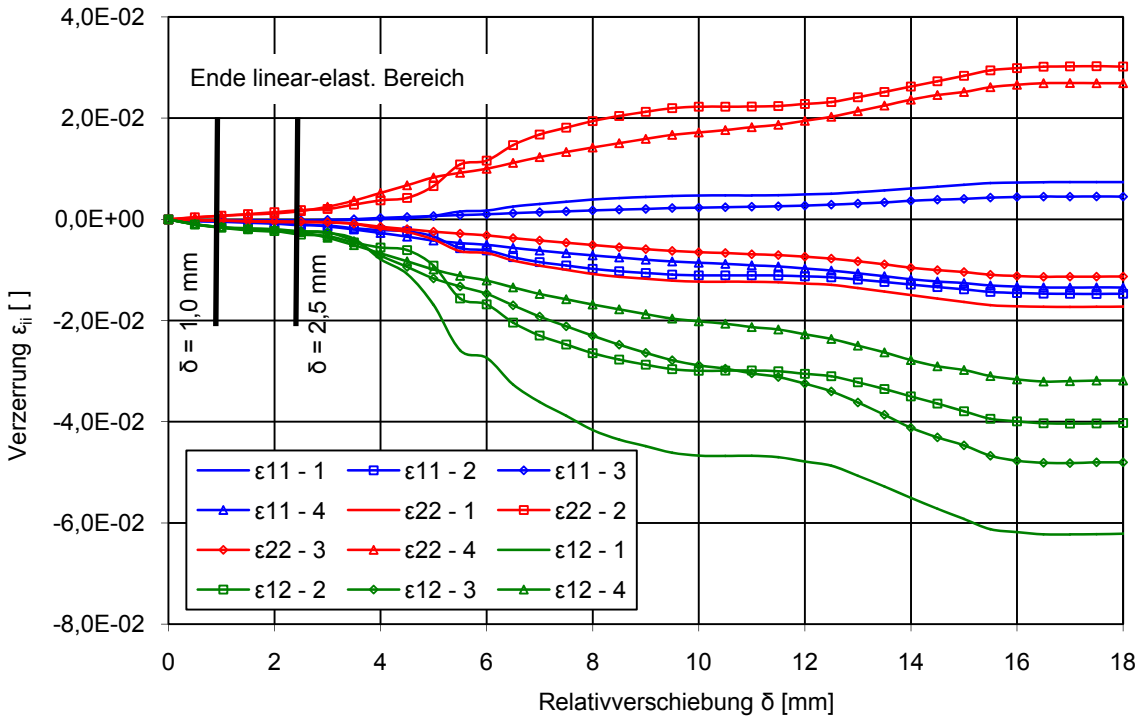


Diagramm 16: Verzerrungen ε_{ii}, „Krone Kurz“

Die Mises Spannungen erreichen in allen vier Punkten zwischen 2 und 3 mm Relativverschiebung δ das Fließplateau.

Die Spannungen σ_{11} wachsen bis zum Erreichen der Traglast als Druckspannung an und fallen im weiteren Verlauf wieder ab. In den Punkten 2 und 4 schlagen diese zwischen 5 und 7 mm Relativverschiebung δ in den Zugbereich durch. Dieser Umstand wird durch ein Verdrehen der Kronen nach dem Erreichen der Traglast begründet.

Bis zum Erreichen der Traglast verformen sich beide Stahlzähne annähernd identisch (siehe Abbildung 16). Danach nimmt die Verformung von Krone 3-4 jedich weitaus schneller zu als jene von Krone 1-2. Grund dafür ist, dass der Beton in unmittelbarer Umgebung der Aussparung im Betongurt in diese hinein bricht. Eine ausführliche Beschreibung dazu ist in Kapitel 4.2.4 dargestellt. Abbildung 16 zeigt die Verformungen (translatorisch/ rotatorisch) der beiden Stahlzähne und den Spannungszustand anhand der Vergleichsspannung σ_V bei Erreichen der Traglast und im Nachbruchbereich bei einer Relativverschiebung δ = 5 mm.

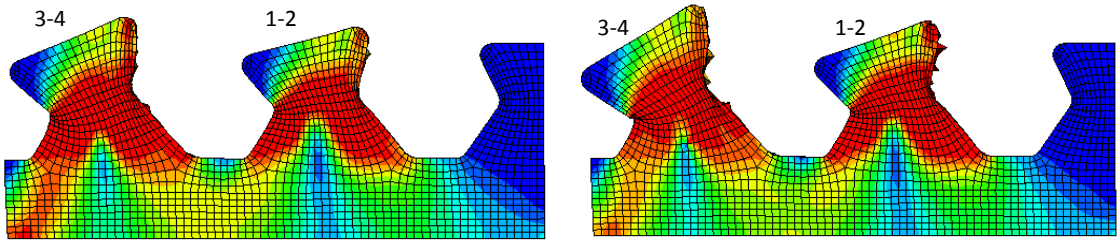


Abbildung 16: Verformung der Stahlzähne bei δ = 2,5 mm und δ = 5 mm

4.2.3 Abhebekennlinie

In Diagramm 17 ist die Abhebung der beiden Punkte an der Oberseite des Betonkörpers dem zulässigen Wert gegenüber gestellt. Somit ist die in [1] angegebene Forderung erfüllt.

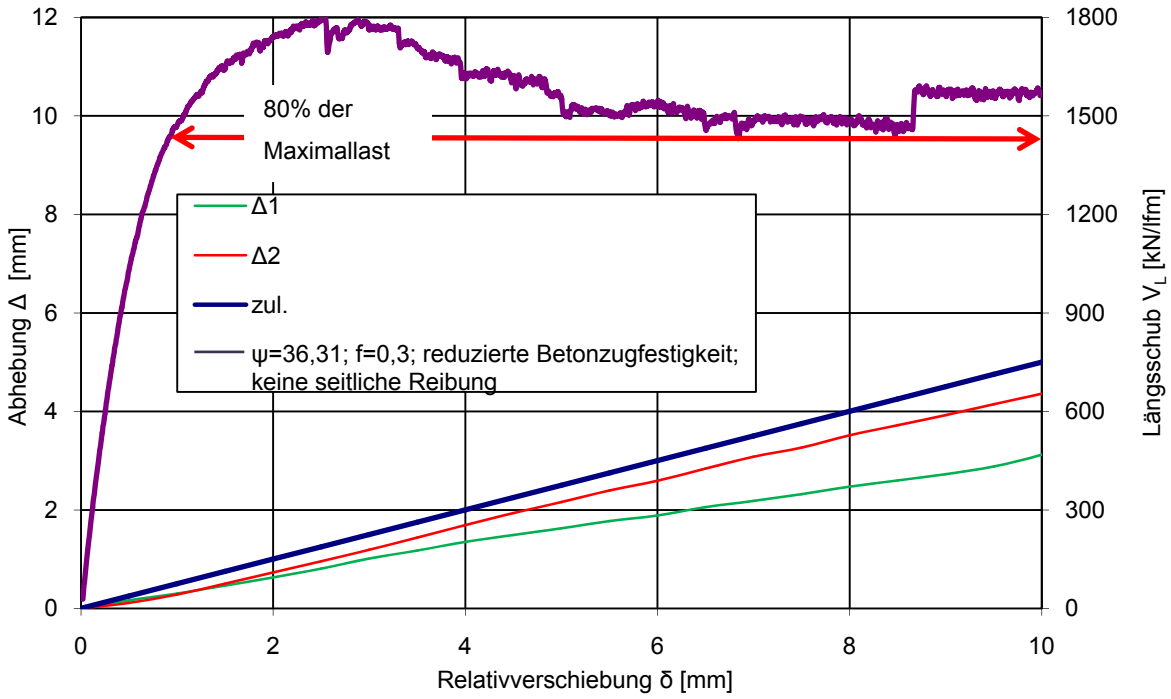


Diagramm 17: Abhebekennlinie, „Krone Kurz“

4.2.4 Fachwerkmodell

Der Kraftfluss im Betongurt vom Ort der Lasteintrag bis zum Auflager wird anhand der Vergleichsspannung σ_V untersucht. Die Analyse wird am Modell mit ψ=36,31°, f=0,3, reduzierter Betonzugfestigkeit und vernachlässigter seitlicher Reibung durchgeführt.

Der Kraftverlauf wird bei Erreichen der Traglast (δ = 2,5 mm) untersucht. Abbildung 17 zeigt den Spannungszustand im Betonkörper in den Schnitten A – A bis C - C. Es zeigt sich, dass der Schwerpunkt der Lasteintragung in der Mitte der Höhe des Kronendübels liegt. Weiters ist der leicht geneigte Verlauf der Druckdiagonalen nach oben erkennbar. Der Schwerpunkt der Kraftübertragung am Auflager liegt nicht im Schwerpunkt der Auflagerfläche, sondern in der Mitte der oberen zwei Drittel des Betongurtes. Grund dafür ist, dass sich die Betonplatte nach oben biegt.

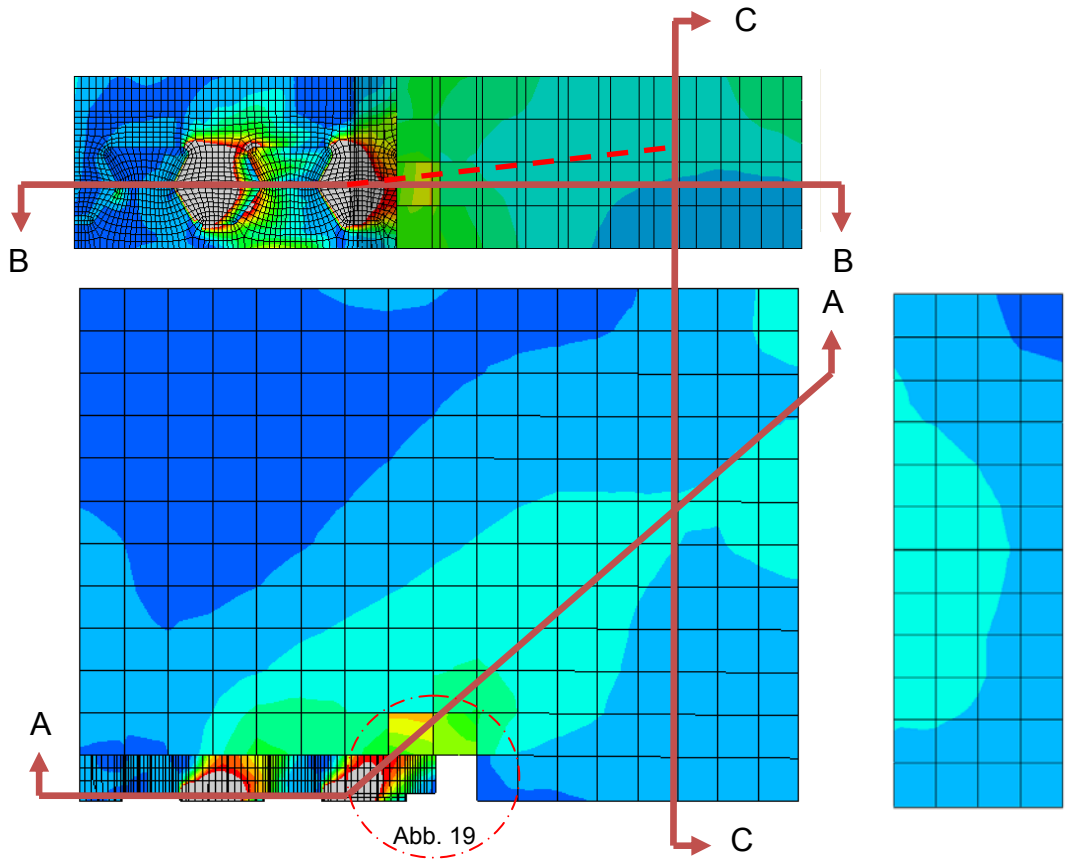


Abbildung 17: Spannungszustand im Betongurt bei Erreichen der Traglast

Gut ersichtlich ist in Abbildung 17, dass der Stahlzahn, welcher näher an der Aussparung liegt, zu nahe an dieser angeordnet ist und sich in weiterer Folge die Druckdiagonale nicht ungehindert ausbreiten kann. Dieser Umstand führt letztendlich auch zum Bruch des Betonkörpers in Richtung der Lasteintragung (siehe Abbildung 13). In einer FE – Modellierung sind große Verformungen bezogen auf die Verformung des restlichen Körpers ein Zeichen für das Versagen. Abbildung 18 zeigt den Verformungszustand in der Aussparung des Betongurtes. In diesen Bildern wurde die Verschiebung in Kraftrichtung farblich dargestellt. Das Versagen des Betons führt zu den dargestellten großen Verformungen in Kraftrichtung.

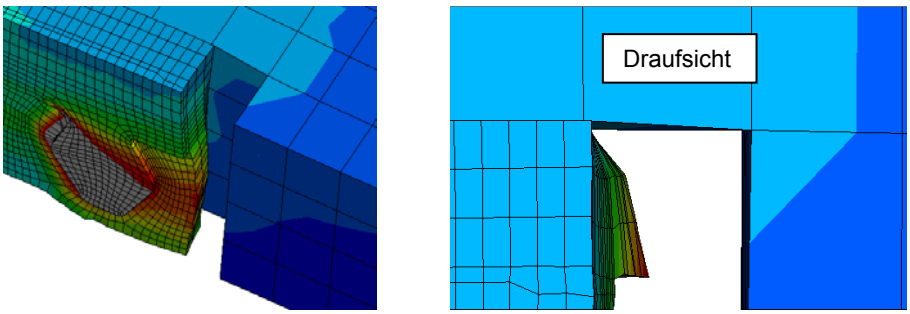


Abbildung 18: Verformungszustand in der Aussparung des Betongurtes

Anhand Abbildung 17 wurde ein Fachwerkmodell erstellt, welches nachfolgend in Abbildung 19 dargestellt ist.

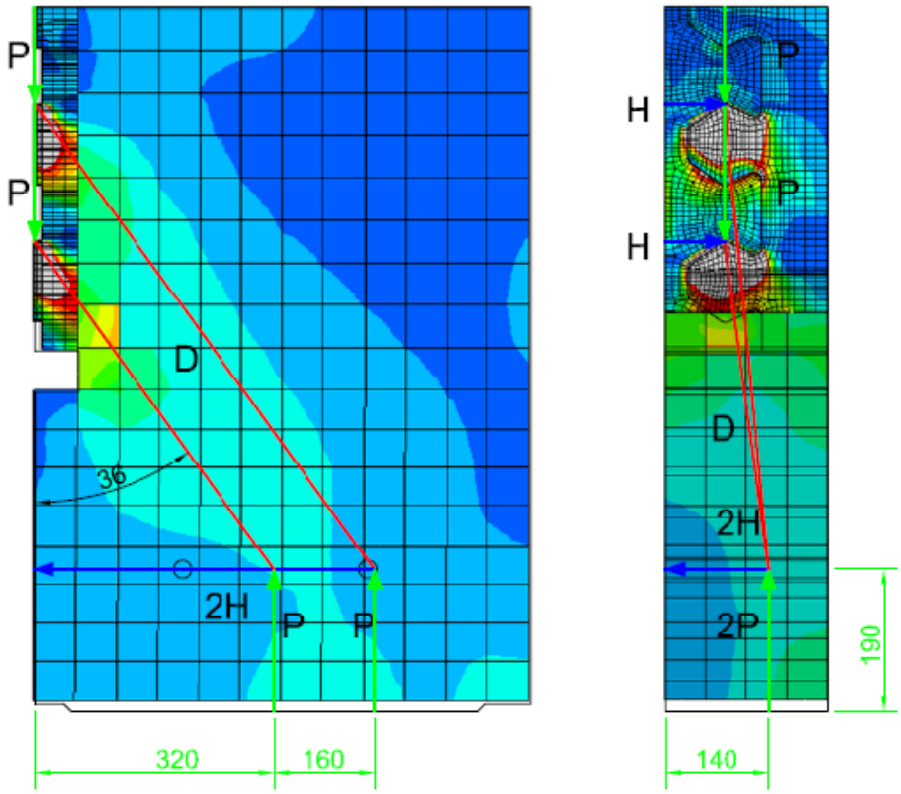


Abbildung 19: Fachwerkmodell, „Krone Kurz“

Die Kräfte P werden an der Lasteintragungsfläche der beiden Stahlzähne in den Beton eingeleitet. Es bildet sich eine Druckstrebe mit einem Winkel von θ_f=36°, gemessen in der Ebene Schnitt B-B von der Modellkörperlängsachse. Durch die Aufteilung der Druckkraft ensteht einerseits eine Auflagerkraft und andererseits eine Querzugkraft. Da die Druckdiagonale auch leicht nach oben geneigt ist, weil die Schwerpunkte der Krafteinleitung und der Auflagerfläche nicht in einer Ebene liegen, entsteht eine vertikale Abtriebeskraft. Diese wird von Ankern aufgenommen. Aus Gleichgewichtsgründen gibt es zu den Kräften in den Ankern in den Lasteintragungspunkten ebenfalls vertikale Kräfte.

Im weiteren Berechnungsverlauf bleibt die Geometrie des Fachwerks weitestgehend in der oben dargestellten Form erhalten. Nur der Winkel der Druckstrebe θ_f steigt leicht an.

4.2.5 Bewehrung

Von den beiden in Abbildung 20 zum Zeitpunkt der Maximallast (δ=2,5 mm) dargestellten und quer über die Dübelleiste verlaufenden Bügeln kommt jener, welcher näher an der Aussparung liegt, als erstes in den Fließbereich. Im weiteren Berechnungsverlauf erreichen alle Bügel im Bereich der Symmetrieebene (siehe Abbildung 21) die Fließgrenze. Im Gegensatz dazu erreichen die beiden Anker in keinem Berechnungsschritt die Fließspannung.

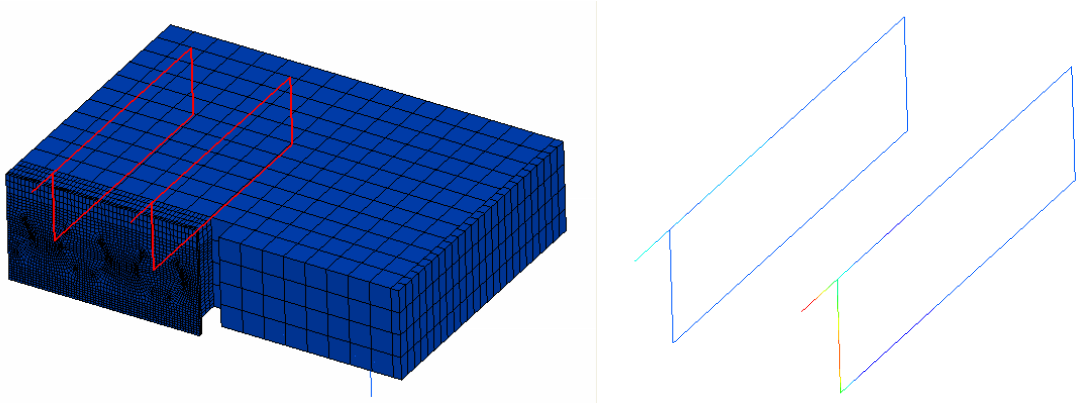


Abbildung 20: Plastizierte Bügelbewehrung bei Erreichen der Traglast (δ=2,5 mm)

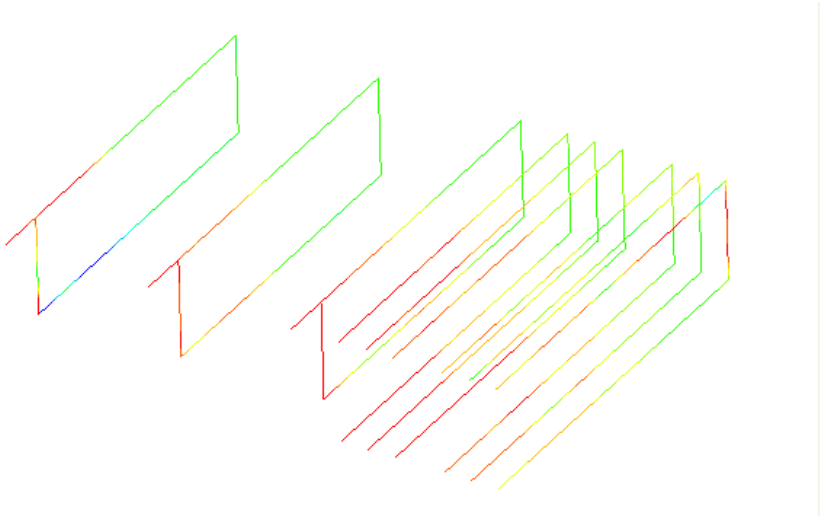


Abbildung 21: Plastizierte Bügelbewehrung im Nachbruchbereich (δ=5,0 mm)

4.3 Modellkörper „Krone Lang“

4.3.1 Dübelkennlinie

Für die beiden nächsten Dübel „Krone Lang“ und „Krone Rund“ wird nur mehr mit ψ=36,31° und ψ=45° gerechnet. In beiden Fällen wird f=0,3, eine reduzierte Betonzugfestigkeit und eine vernachlässigte seitliche Reibung angewendet.

Der Modellkörper für die Stahlkrone „Krone Lang“ erwies sich steifer als der reale Versuchskörper. Dies führte somit zu einer größeren aufnehmbaren Tragkraft, die ca. 20% über dem experimentell erzielten Wert der Längsschubtragfähigkeit V_L liegt. Diagramm 18 veranschaulicht diesen Sachverhalt anhand des Berechnungsverfahrens STATIC,RIKS. Mit ψ=36,31 wurde lediglich eine gute Übereinstimmung mit der Traglast erzielt. Denkt man sich jedoch den Verlauf der Dübelkennlinie gedanklich weiter, würde auch diese Berechnung ein zu hohes Lastniveau erreichen.

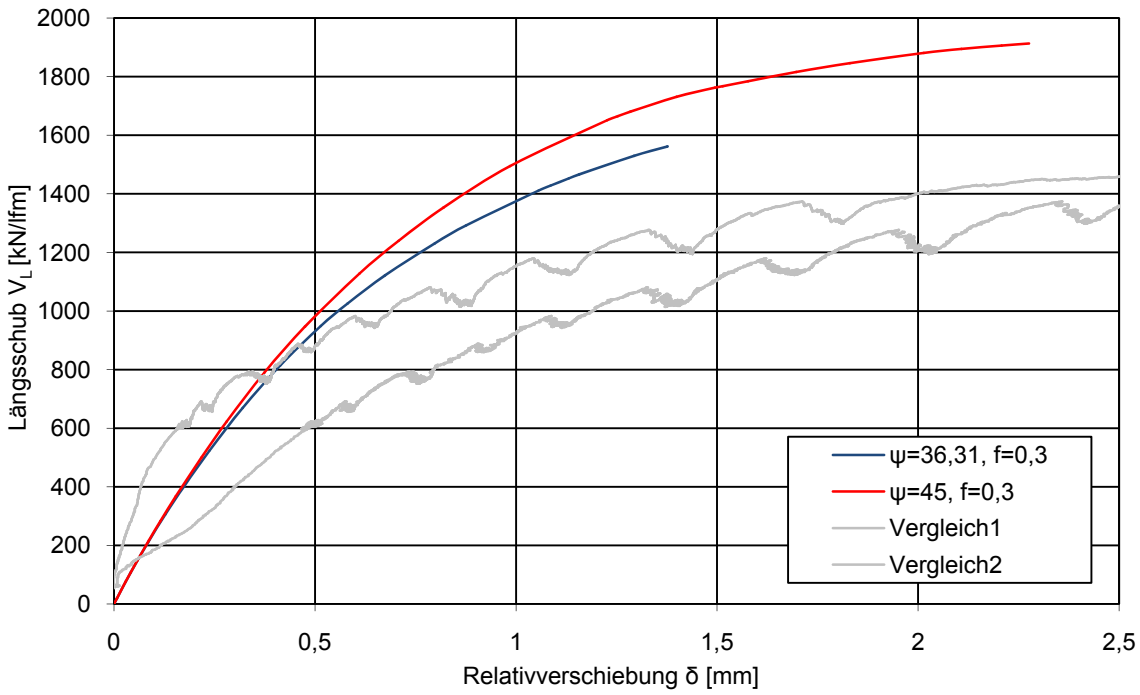


Diagramm 18: Dübelkennlinien, „Krone Lang“, Berechnungsverfahren STATIC, RIKS

Die Ergebnisse nach DYNAMIC, EXPLICIT, dargestellt in Diagramm 19, weisen dieselben Eigenschaften auf. Das Modell ist zu steif und die resultierende Traglast somit zu hoch. Anders als bei der Dübelform „Krone Kurz“ liefert in diesem Fall die Berechnung mit einem Dilation Angle von ψ=45° ein besseres Ergebnis als mit ψ=36,31°. Obwohl die Traglast mit ψ=45° ca. 20% über jener liegt, welche

experimentell bestimmt wurde, sind deren beider abfallenden Äste der Dübelkennlinie im Nachbruchbereich annähernd parallel zueinander.

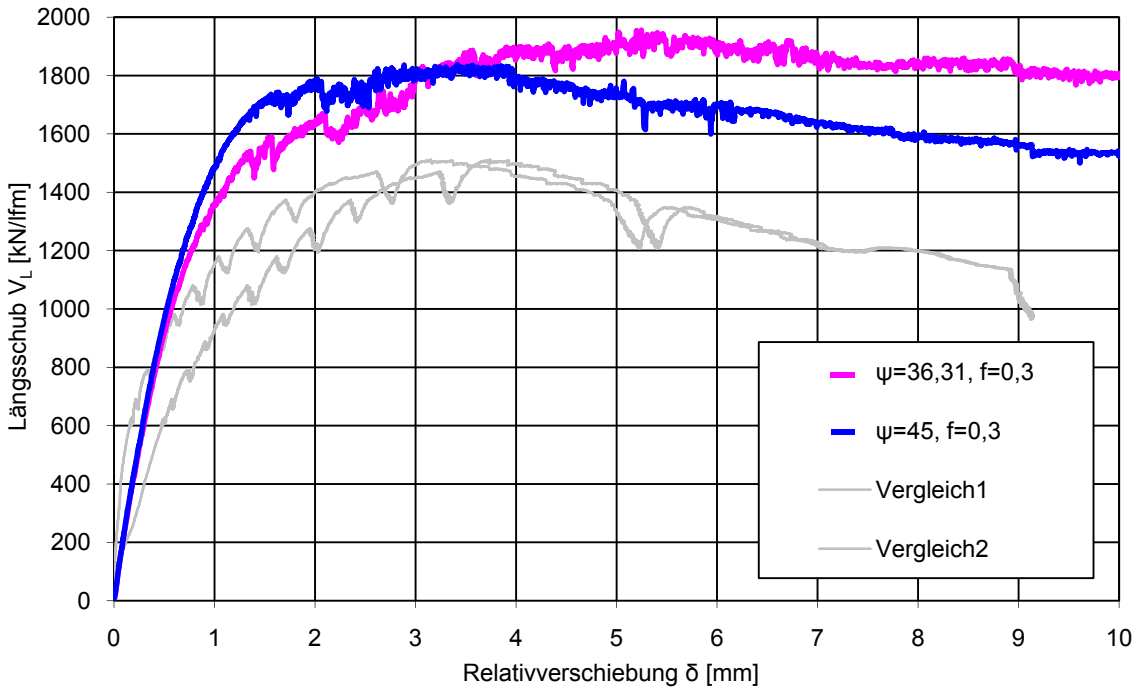


Diagramm 19: Dübelkennlinien, „Krone Lang“, Berechnungsverfahren DYNAMIC,EXPLICIT

Das Verhältnis der internen zur kinetischen Energie weist für diesen Dübel für keine der beiden in Diagramm 19 dargestellten Linien eine sprunghafte Änderung auf.

4.3.2 Spannungs – und Verzerrungsanalyse

In folgenden vier Punkten wird der Verzerrungs- und Spannungszustand dargestellt. Zur Analyse wurde der Modellkörper mit ψ=45° herangezogen.

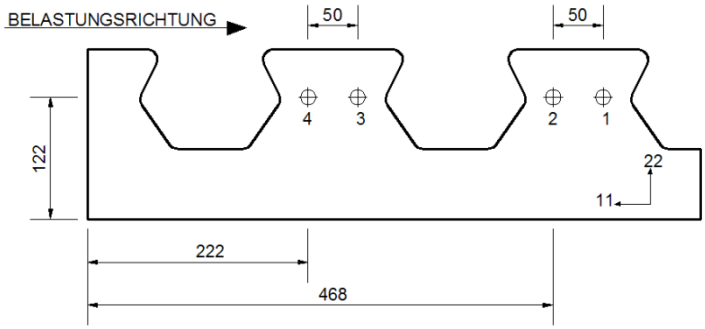


Abbildung 22: Definition der Richtung der Dehnungen

Für die in Abbildung 22 angegebenen Punkte sind in den Diagrammen 20 und 21 die Spannungsverläufe und in Diagramm 22 die Verzerrungsverläufe, aufgetragen

über der Relativverschiebung δ, dargestellt. Das Ende des linear-elastischen Bereiches liegt zwischen

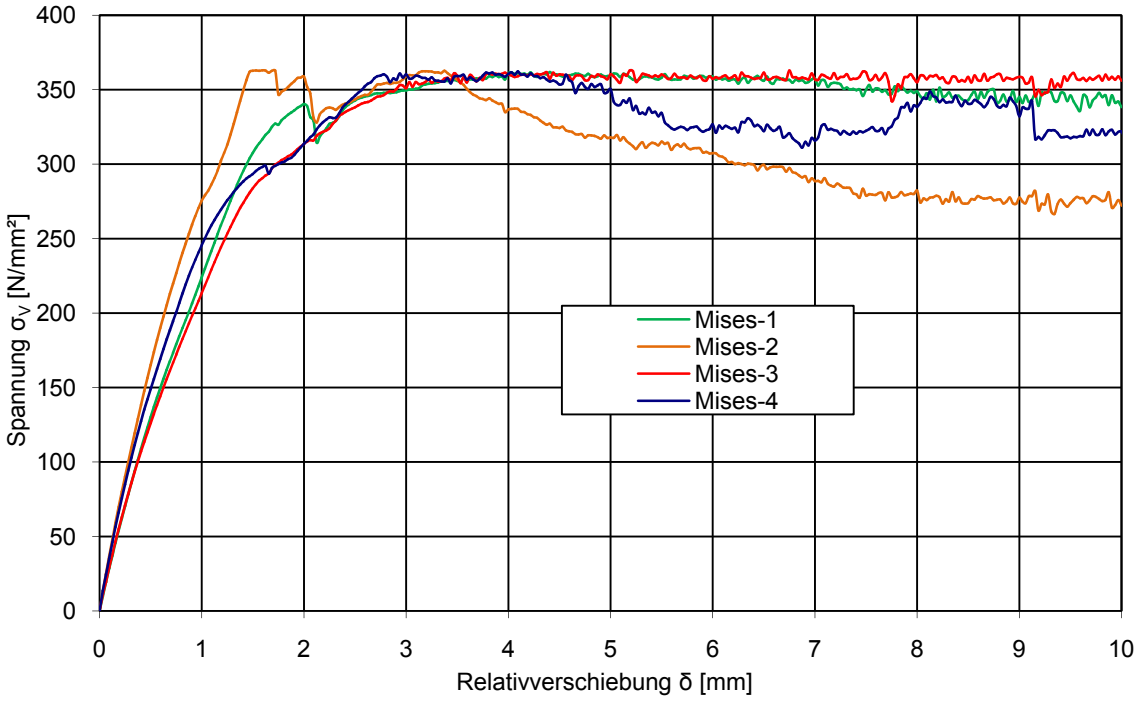


Diagramm 20: Spannungen von Mises, „Krone Lang“

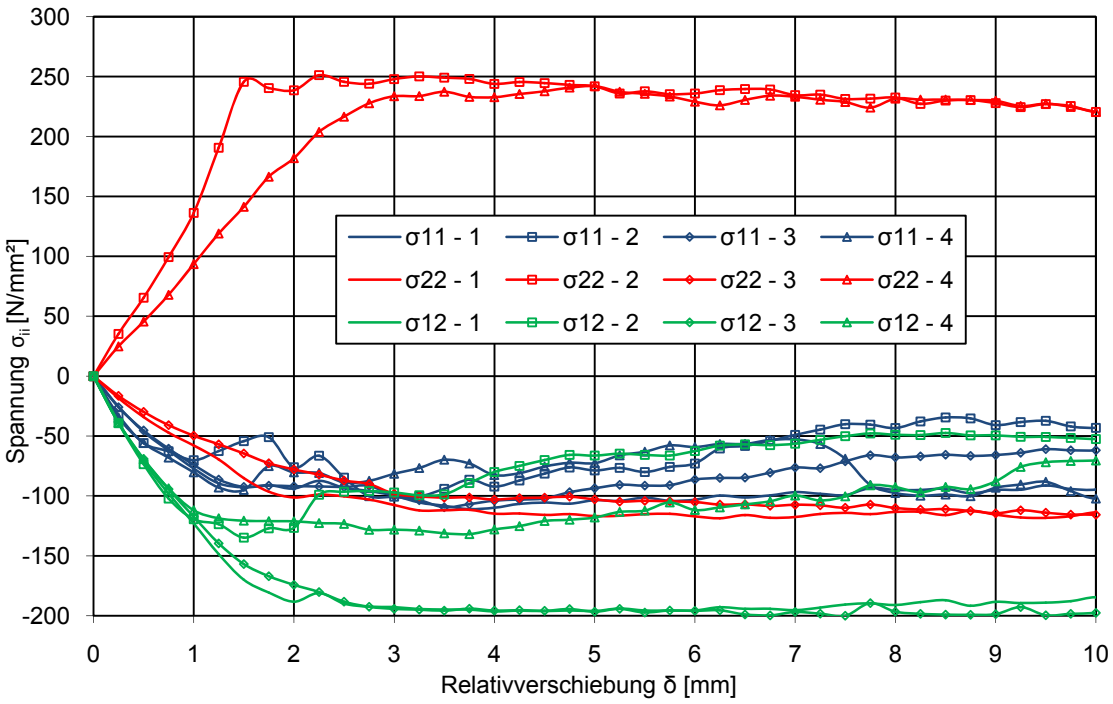


Diagramm 21: Spannungen σ_{ii}, „Krone Lang“

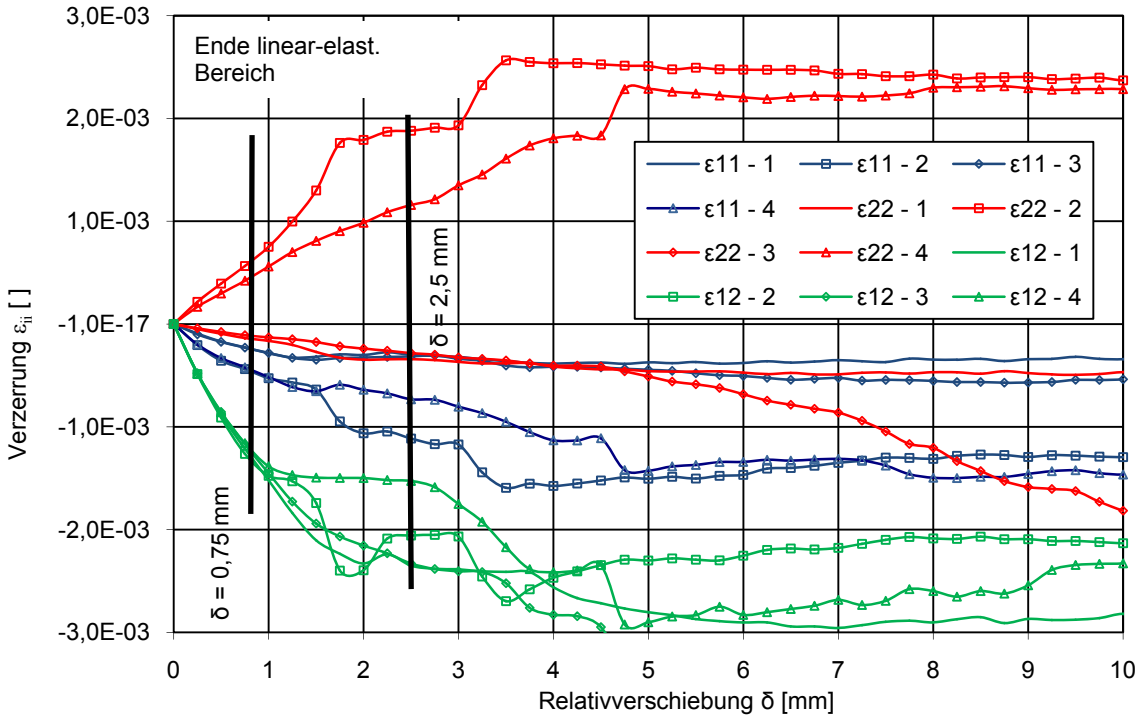


Diagramm 22: Verzerrungen ε_{ii}, „Krone Lang“

Bei einer Relativverschiebung von δ=3 mm ist in allen vier Punkten die Fließspannung erreicht. In den Punkten 2 und 4 kommt es nach Erreichen der Traglast bei einer Relativverschiebung δ von ca. 3,4 bzw. 4,2 mm zu einem Abfall der Vergleichsspannungen σ_v. Grund dafür ist, dass der Beton vor den Stahlzähnen nach oben hin bricht. Die Beschreibung dieser Tatsache findet in Kapitel 4.3.4 statt.

Die beiden Bilder in Abbildung 23 zeigen den Spannungs- und Verformungszustand im Dübelblech bei Erreichen der Traglast. Anders als bei den Dübelformen „Krone Kurz“ und „Krone Lang“ sind auftretende rotatorische Verformungen nicht besonders stark ausgeprägt. Bei dieser Dübelform verformen sich die Nasen, die durch die Hinterschneidung der Aussparungsgeometrie im Dübelblech entsteht, auf der Seite der Lasteinleitung in den Beton besonders stark. Grund dafür ist, dass die Breite der Stahlzähne eine starke Verdrehung des gesamten Stahlzahns, wie sie bei den Dübeln „Krone Kurz“ und „Krone Lang“ stattfindet, verhindert.

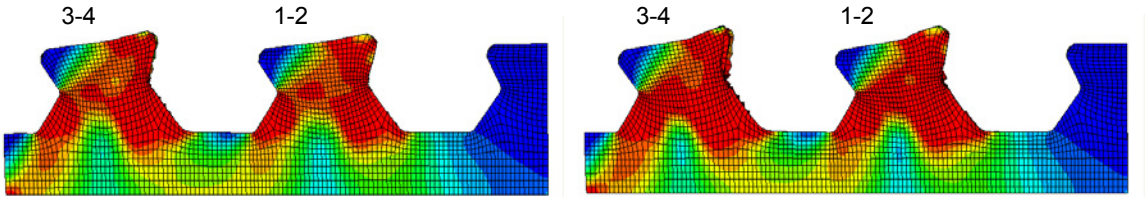


Abbildung 23: Verformung der Stahlzähne δ=3,5mm und δ=7mm

4.3.3 Abhebekennlinie

In Diagramm 23 ist die Abhebekennlinie für den Dübel „Krone Lang“ anhand des Modellkörpers, welcher mit ψ=45° berechnet wurde, dargestellt. Bis zu einer Relativverschiebung von 9 mm bleibt der Wert für die Abhebung beider Referenzpunkte im zulässigen Bereich. Danach überschreiten die vertikalen Relativverschiebungen Δ2 den zulässigen Bereich.

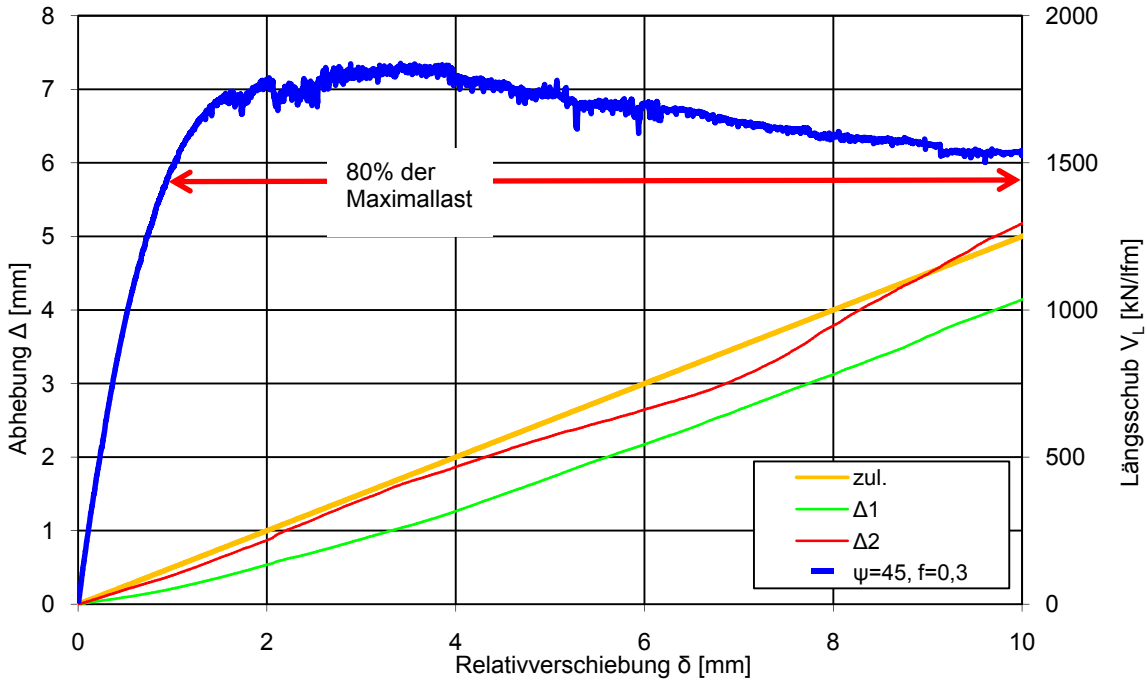


Diagramm 23: Abhebekennlinie, „Krone Lang“

Die fett rot dargestellte Linie beschreibt den Bereich, innerhalb welchem die Abhebung Δ kleiner als 50% der Relativverschiebung δ sein muss [1]. Für diese Dübelform kann somit der Nachweis gegen Abheben der Betonplatte nicht erbracht werden.

4.3.4 Fachwerkmodell

Die Untersuchung des Kräfteflusses wird analog zum Dübel „Krone Kurz“ durchgeführt. Die Analyse wird mit demselben Modellkörper wie bei der Überprüfung der Abhebung durchgeführt.

Abbildung 24 zeigt den Spannungszustand im Betonkörper anhand der Vergleichsspannung σ_V in den Schnitten A – A bis C - C bei Erreichen der Traglast. Der Schwerpunkt der Krafteinleitung liegt wieder in der Mitte der Höhe des Kronendübels. Die Aussparung in der Mitte des Betonkörpers behindert wieder die Ausbildung eines ungestörten Verlaufs der Druckdiagonalen. Die Kraftübertragung am Auflager findet wieder in der Mitte der oberen zwei Drittel des Betongurtes statt.

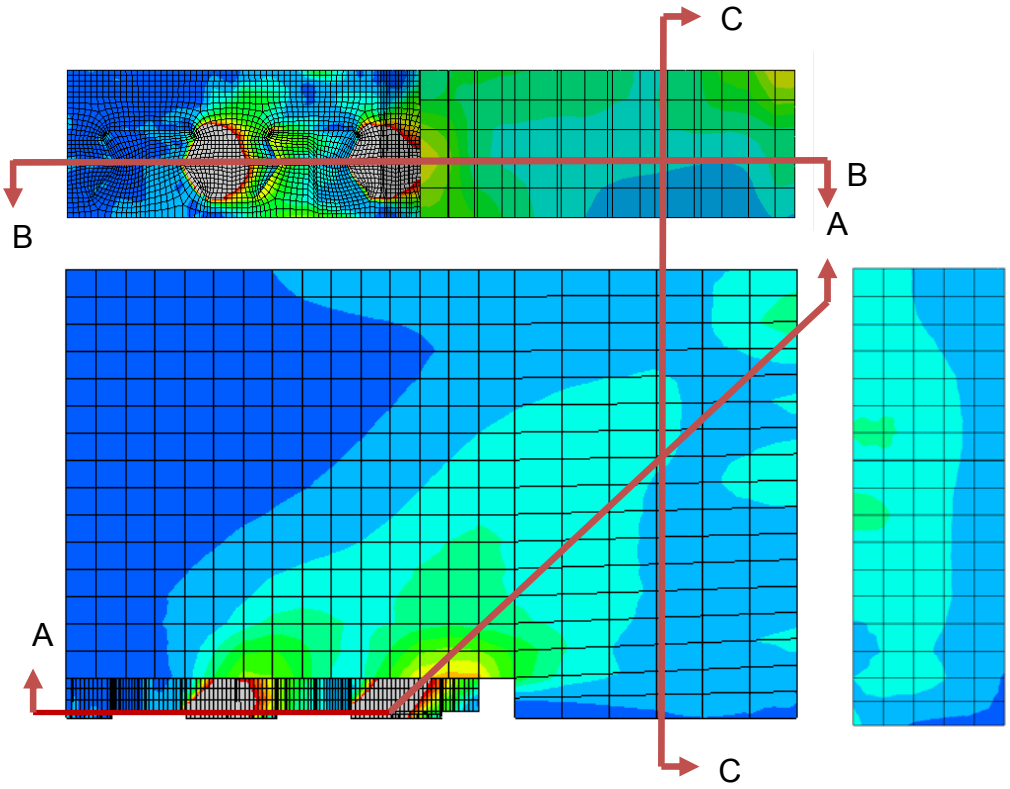


Abbildung 24: Spannungszustand im Betongurt bei Erreichen der Traglast

Anhand der Abbildung 24 wurde ein Fachwerkmodell erstellt, welches nachfolgend in Abbildung 25 dargestellt ist.

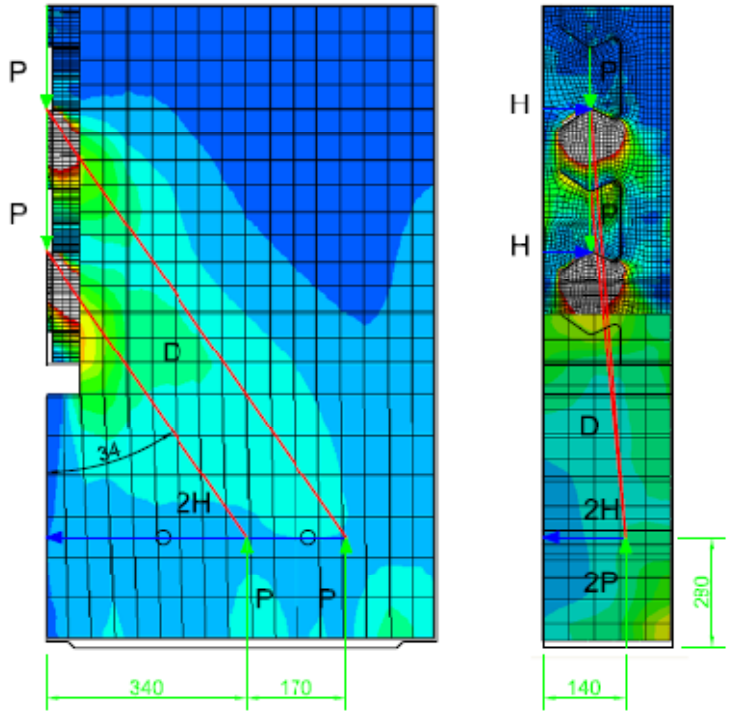


Abbildung 25: Fachwerk, „Krone Lang“

Das Fachwerkmodell (siehe Abbildung 25) ist nach dem gleichen Prinzip aufgebaut, wie jenes für den Dübel „Krone Kurz“. Der Unterschied liegt im Winkel θ_f, welcher sich in diesem Fall zu 34° ergibt. Im Nachbruchbereich bleibt dieses Fachwerk ebenfalls erhalten. Genauso wie bei „Krone Kruz“ steigt der Winkel θ_f der Druckdiagonalen leicht an.

Für diese Dübelgeometrie liegt die Versagensursache nicht an der Aussparung im Betongurt. Da sich die Nasen der Stahlzähen stark verformten (Abbildung 23), resultiert eine vertikale Kraftkomponente im Betongurt in Richtung freier Oberfläche, die den Beton nach oben herausdrückt. In Abbildung 26 ist farblich die Verformung des Betongurtes in Richtung 22 in unverformter und stark vergrößerter verformter Lage dargestellt. Rote Bereiche kennzeichnen starke Verformungen. Wie sich sehr anschaulich zeigt, treten diese vor allem im Bereich oberhalb der Krone1-2 auf, wie schon die Abbildung 23 vermuten ließ. Deshalb versagt der Beton in diesem Bereich auch früher als oberhalb der Krone 3–4. Diesen Umstand verdeutlicht auch eine Betrachtung der Vergleichsspannung σ_V nach Diagramm 20. Die Vergleichsspannung σ_v fällt in Punkt 2 früher ab als in Punkt 4, da der Beton vor der Krone 1-2 früher bricht. Dass der Beton nach oben hin wegbricht, ist auch in Abbildung 24 in Schnitt A-A zu erkennen. Oberhalb und

hinter der Krone 1-2 ist praktisch keine Spannung (blau gekennzeichnet) mehr vorhanden.

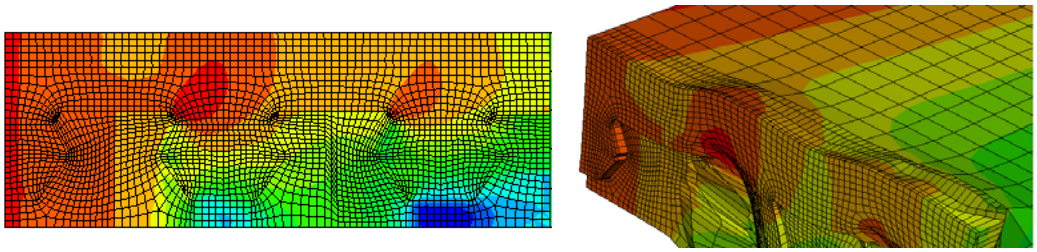


Abbildung 26: Verschiebung in Richtung 22 des Betongurtes (δ=7 mm)

4.3.5 Bewehrung

Für die Bewehrung wurden dieselben Beobachtungen gemacht wie beim Dübel „Krone Kurz“. Jene Bügel, welche näher an der Aussparung liegen, erreichen bei der Traglast die Fließspannung

Im weiteren Berechnungsverlauf erreichen alle Bügel im Bereich der Symmetrieebene die Fließspannung (siehe Abbildung 27).

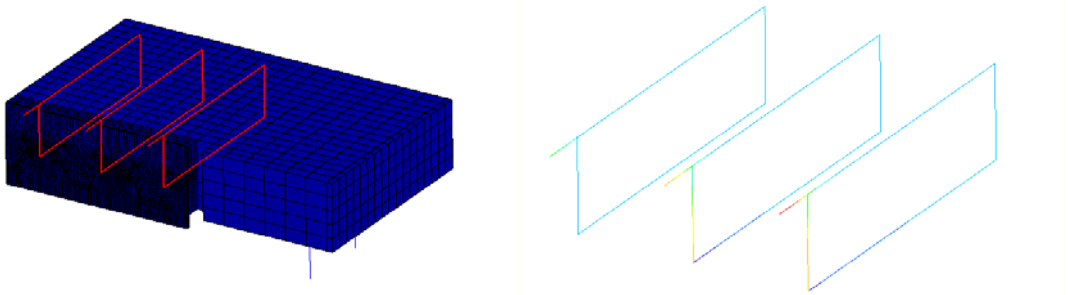


Abbildung 27: Plastizierte Bügelbewehrung bei Erreichen der Traglast (δ=3,5mm)

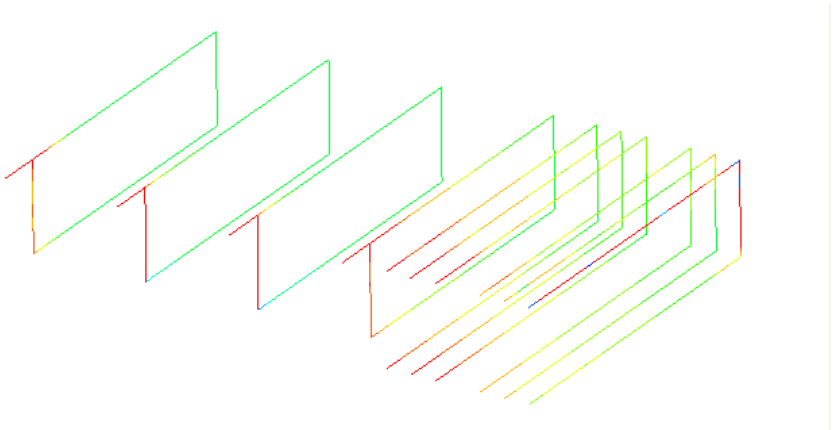


Abbildung 28: Plastizierte Bügelbewehrung im Nachbruchbereich (δ=7mm)

Je näher einer der drei quer über die Dübelleiste verlaufenden Bügel zur Aussparung liegt, umso früher kommt dieser ins Fließen (siehe Abbildung 27).

4.4 Modellkörper „Krone Rund“

4.4.1 Dübelkennlinie

Für diesen Dübel wurde wieder eine reduzierte Betonzugfestigkeit verwendet und die seitliche Reibung zwischen Stahl und Beton vernachlässigt

Die mittels FE-Simulation ermittelte Traglast liegt aufgrund eines offensichtlich zu steifen Modells um ca. 40% über jener, die mittels Versuch erzielt wurde. Da es bei diesem zu einem Ausfall eines Wegaufnehmers kam, kann zur Gegenüberstellung nur die Dübelkennlinie Vergleich2 herangezogen werden.

In Diagramm 24 sind die Ergebnisse zweier Vergleichsberechnungen mittles STATIC, RIKS dargestellt. Mit ψ=45° brach die Berechnung frühzeitig ab. Damit erreichte die Simulation nicht die Traglast des Versuches.

Die Berechnung mit ψ=36,31° erreichte eine Traglast von 1550 kN/lfm. Dieser Wert ist jedoch noch nicht das Plateau, denn wiederum wurde die Berechnung frühzeitig abgebrochen.

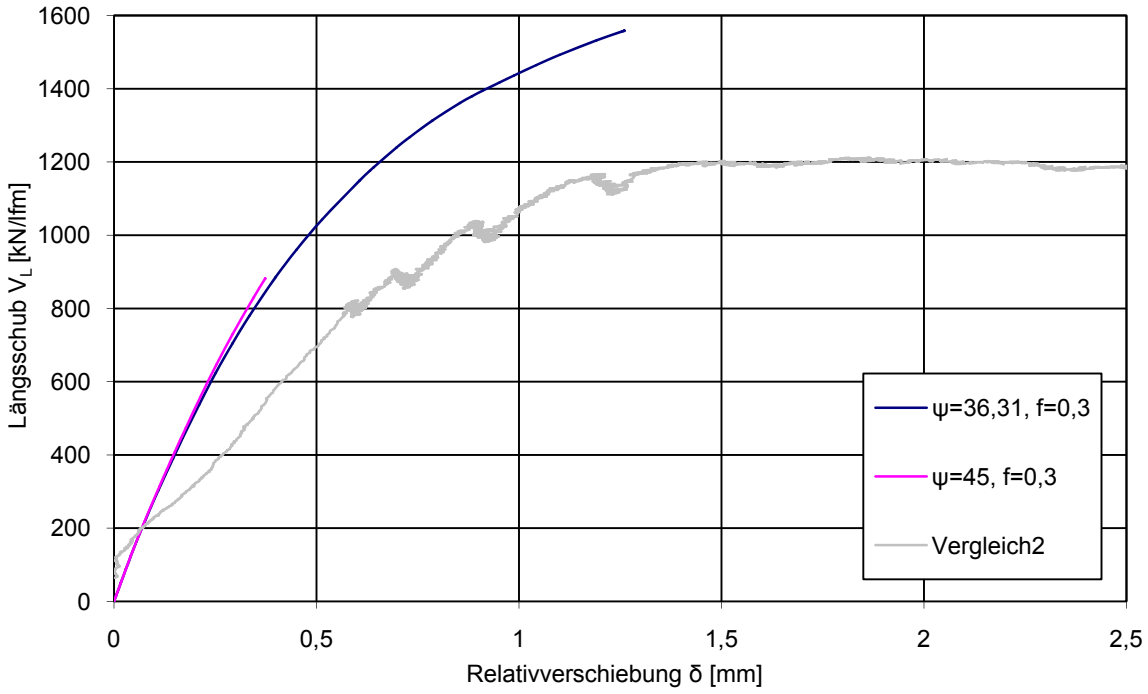


Diagramm 24: Dübelkennlinien, „Krone Rund“, Berechnungsverfahren STATIC,RIKS

Im Diagramm 25 sind die Ergebnisse einer nochmaligen Berechnung mittels DYNAMIC, EXPLICIT dargestellt.

Wie bei der Berechnung der Dübelform „Krone Kurz“ wurde auch hier das bessere Ergebnis mit einem Dilation Angle von ψ=36,31° erzielt. Obwohl die erzielte Traglast wie schon oben angegeben ca. 40% über jener liegt, welche experimentell bestimmt wurde, sind deren beider abfallenden Äste der Dübelkennlinie im Nachbruchbereich annähernd parallel zueinander.

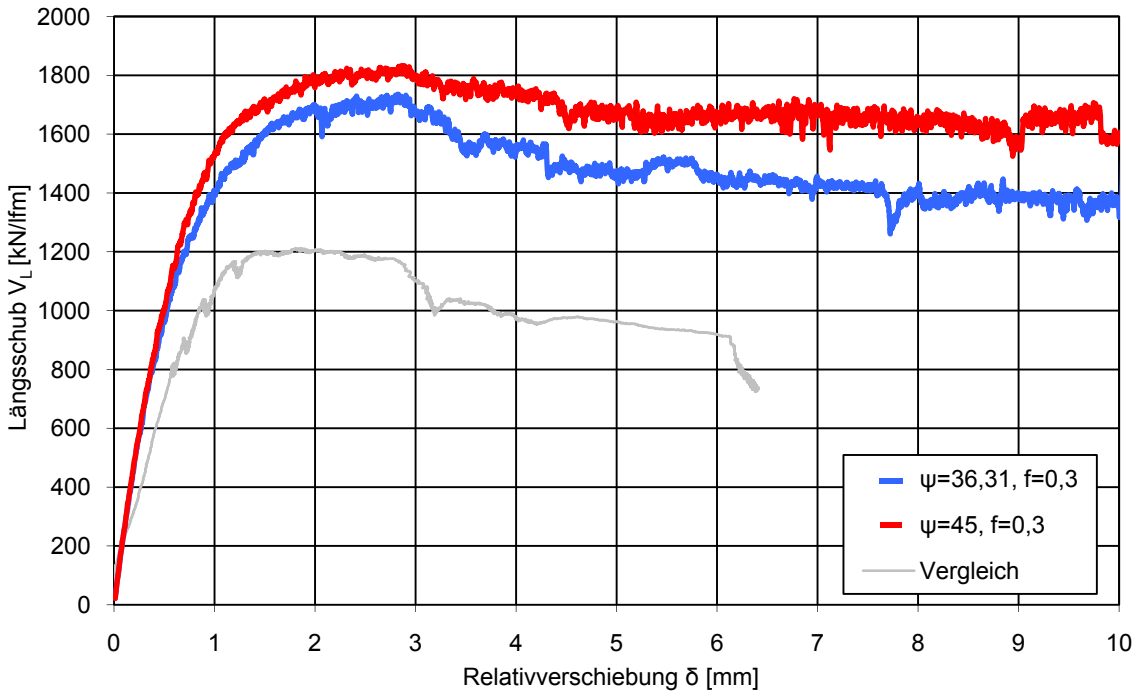


Diagramm 25: Dübelkennlinien, „Krone Rund“, Berechnungsverfahren DYNAMIC, EXPLICIT

Wie für den Dübel „Krone Lang“ wurde auch für diesen Dübel keine sprunghafte Änderung im Verhältnis der Energien entdeckt.

4.4.2 Spannungs – und Verzerrungsanalyse

In folgenden vier Punkten wird der Verzerrungs- und Spannungszustand anhand dem mit ψ=36,31° berechneten Modellkörper dargestellt.

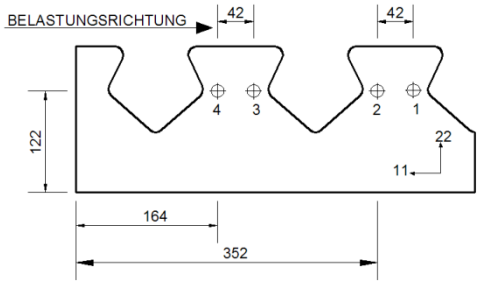


Abbildung 29: Definition der Richtung der Dehnungen

Für die in Abbildung 29 angegebenen Punkte sind in den Diagrammen 26 und 27 die Spannungsverläufe und in Diagramm 28 die Verzerrungsverläufe, aufgetragen über der Relativverschiebung δ, dargestellt. Der linear-elastische Bereich endet zwischen δ = 0,7 mm und δ = 1,7 mm.

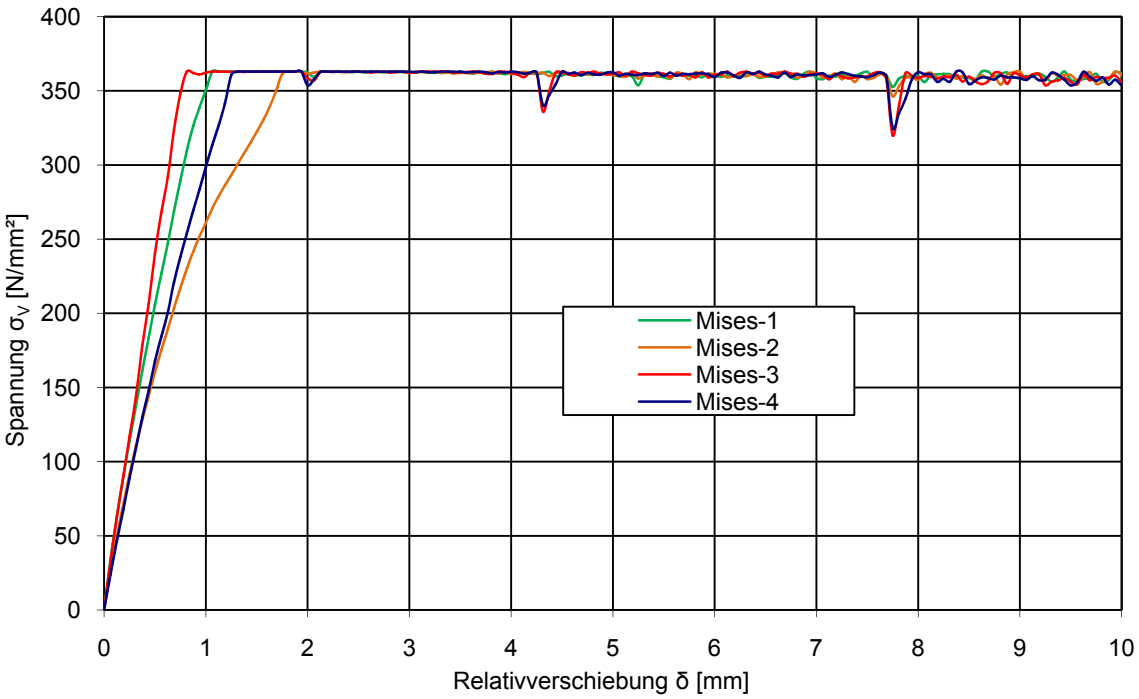


Diagramm 26: Spannunge von Mises, „Krone Rund“

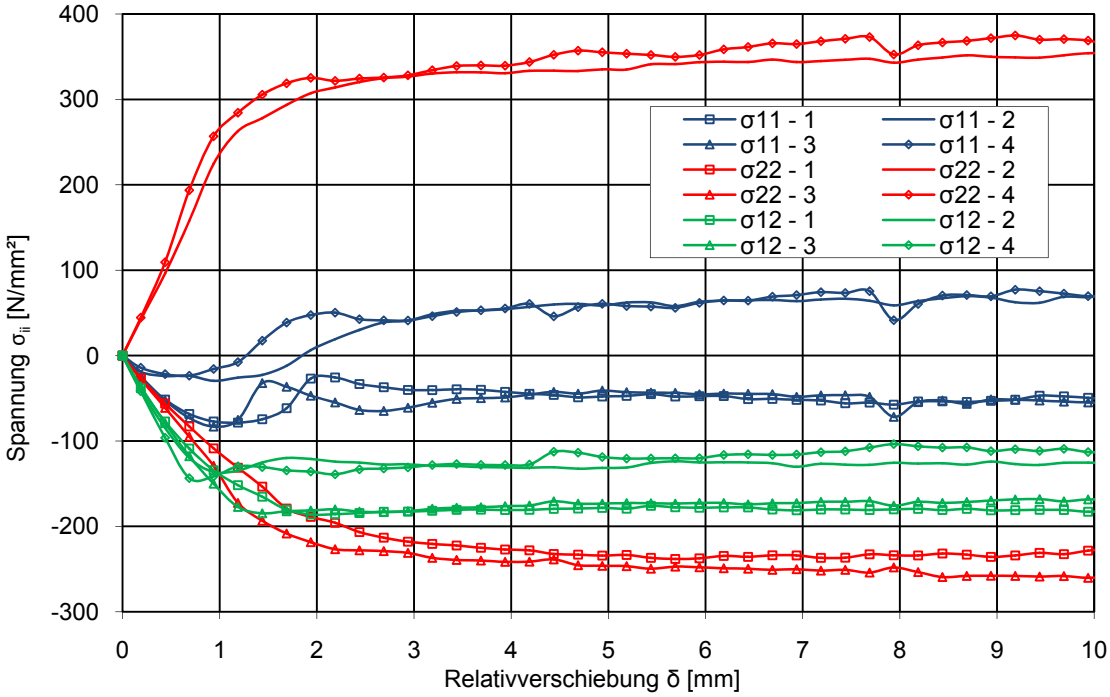


Diagramm 27: Spannungen σ_{ii}, „Krone Rund“

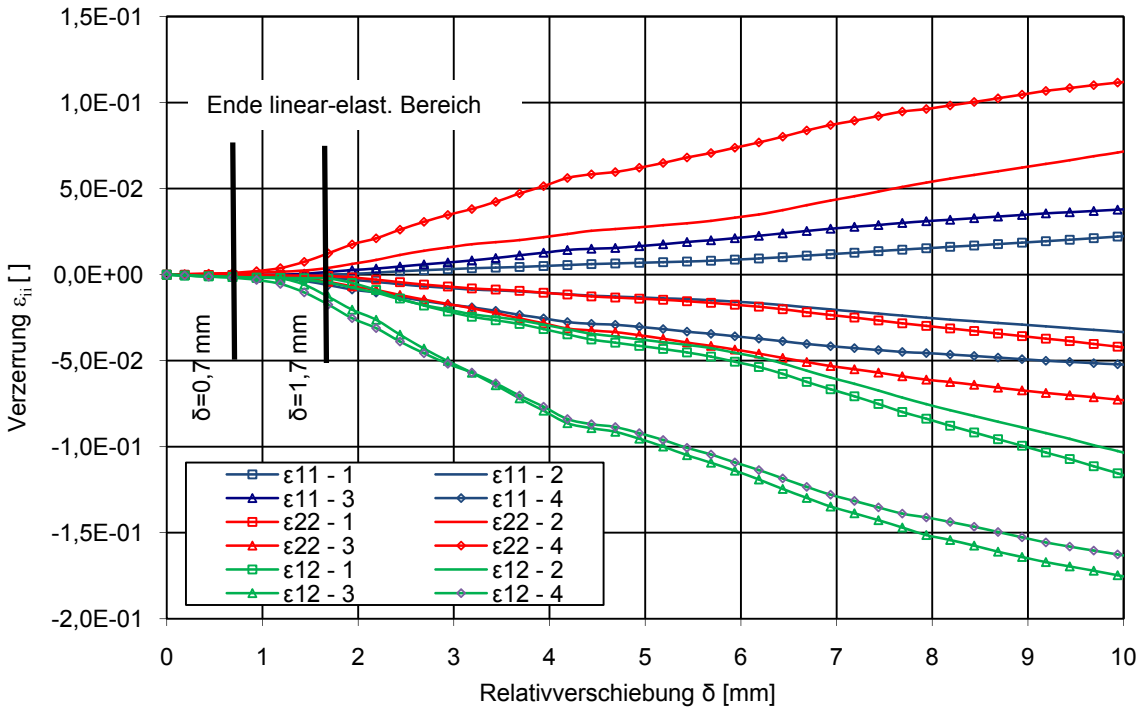


Diagramm 28: Verzerrungen ε_{ii}, „Krone Rund“

Die Funktionsweise dieses Dübels ist nahezu identisch mit jener des Dübels „Krone Kurz“. Der größte Unterschied liegt in der Ausbildung eines Fließplateaus.

Zum Abfall der Last nach Erreichen der Traglast kam es wieder durch das Brechen des Betonkörpers in die Aussparung des Betongurtes. Hierbei wurden dieselben Beobachtungen wie bei „Krone Kurz“ gemacht.

Bei δ=2 mm sind beide Kronen praktisch voll plastiziert. Bis zu einer Relativverschiebung von 3 mm steigt die Traglast noch leicht an. Ab einer Relativverschiebung von ca. δ=0,8 mm wird in allen Messpunkten bis δ=1,8 mm die Fließspannung erreicht, die im weiteren Berechnungsverlauf nicht mehr abfällt. Im Gegensatz zu „Krone Kurz“ wird hier zuerst in Punkt3 und erst zuletzt in Punkt2 f_y erreicht.

Bis zum Erreichen der Traglast verformen sich die beiden Stahlzähne annähernd ident (siehe Abbildung 30). Die Verformung von Krone 3-4 nimmt danach weitaus schneller zu als jene von Krone 1-2. Grund dafür ist, wie auch bei dem Dübel „Krone Kurz“, dass der Beton in unmittelbarer Nähe der Aussparung im Betongurt in diese hinein bricht. Dieser Umstand wird in Kapitel 4.4.5 deutlich gemacht.

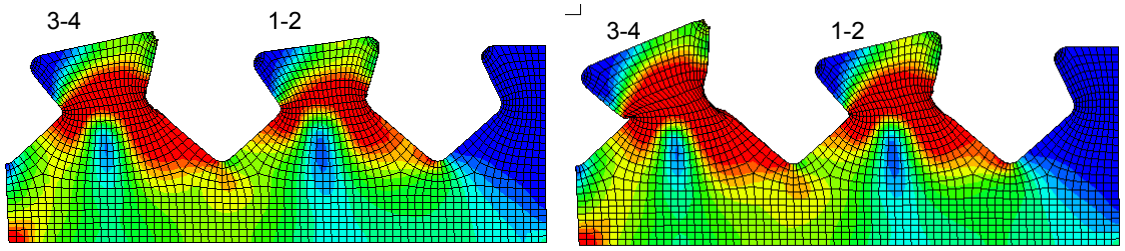


Abbildung 30: Verformung der Stahlzähne bei δ=2,8mm und δ=5mm

Anders als bei dem Dübel „Krone Kurz“ bleiben die Kronenfüße praktisch unverformt. Die rotatorische Verformung findet vor allem im Kronenkopf statt.

4.4.4 Abhebekennlinie

Die Abhebekennlinie wird für jenen Modellkörper ausgewertet, welcher mit ψ=36,31°, berechnet wurde.

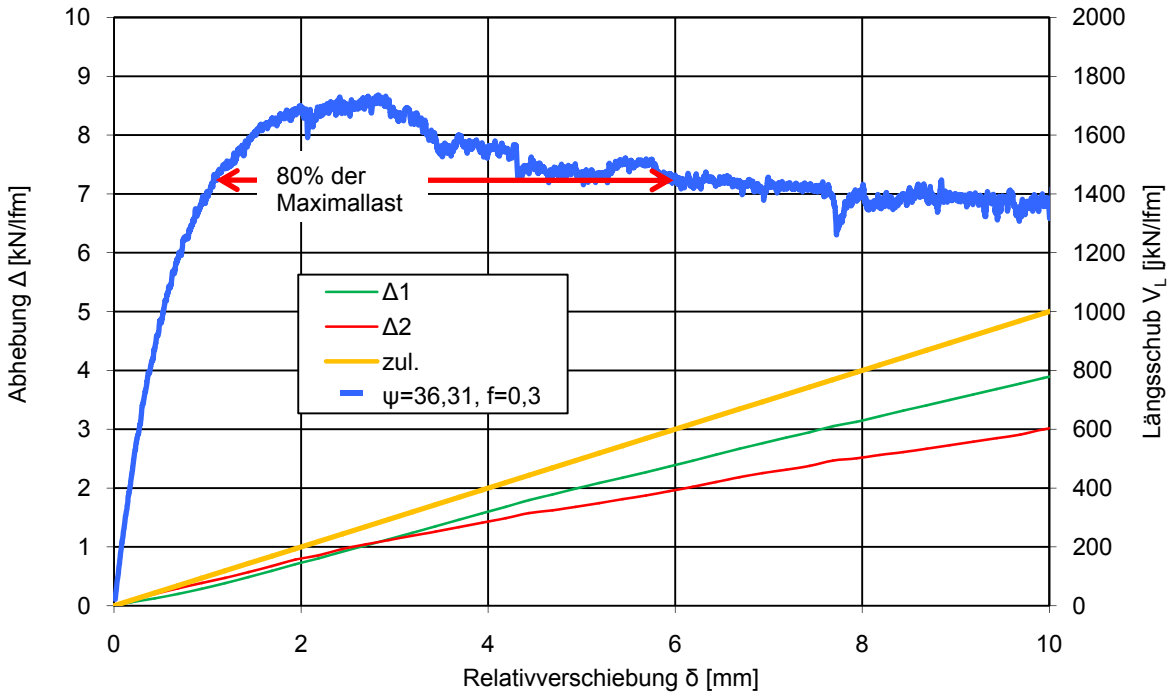


Diagramm 29: Abhebekennlinie, „Krone Rund“

Der Bereich, in welchem die Abhebung Δ kleiner als 50% der Relativverschiebung δ sein muss, ist fett rot dargestellt. Die Abhebekennlinie ist für diesen Dübel immer unterhalb des zulässigen Bereiches.

4.4.5 Fachwerk

Die Untersuchung des Kräfteflusses wird analog zu den beiden vorangegangenen Dübelformen „Krone Kurz“ und „Krone Lang“ durchgeführt. Für diese Analyse wird der Modellkörper mit ψ=36,31° verwendet.

Abbildung 31 zeigt den Spannungszustand im Betonkörper anhand der Vergleichsspannung σ_V in den Schnitten A – A bis C - C bei Erreichen der Traglast. Auch diesmal liegt der Schwerpunkt der Lasteintragung in der Mitte der Höhe des Kronendübels und der Schwerpunkt am Auflager in der Mitter der oberen zwei Drittel des Betongurtes. Der Verlauf der Druckdiagonale wird, im Vergleich zu den beiden vorangegangenen Dübeln, bei diesem am stärksten durch die Aussparung im Betongurt behindert.

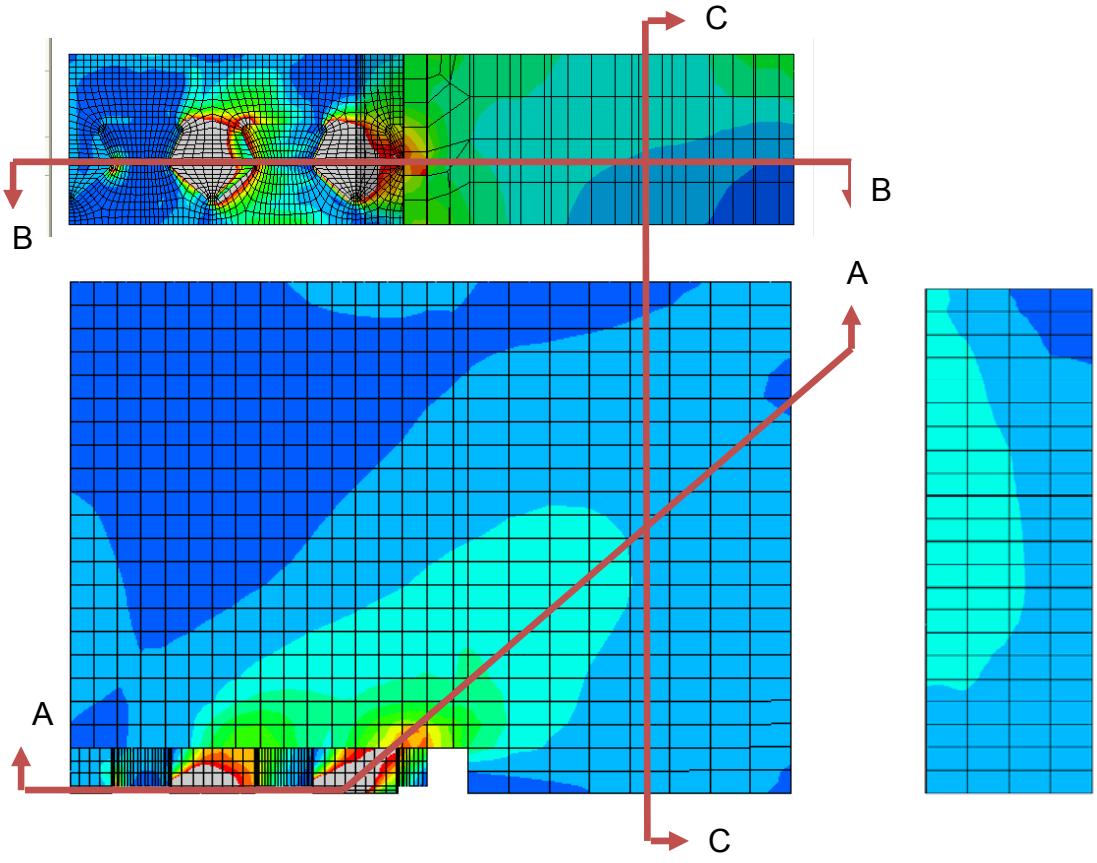


Abbildung 31: Spannungszustand im Betongurt bei Erreichen der Traglast (δ=2,8 mm)

Anhand der Abbildung 31 wurde ein Fachwerkmodell erstellt, welches nachfolgend in Abbildung 32 dargestellt ist.

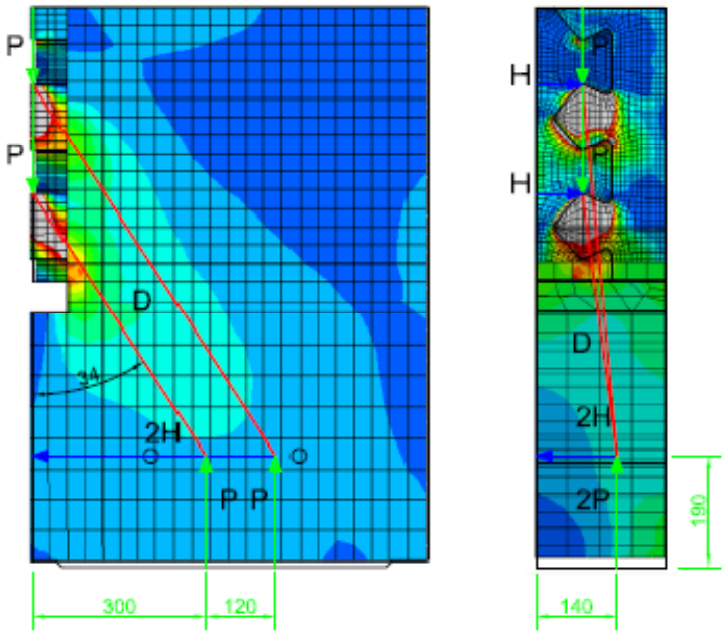


Abbildung 32. Fachwerk, Krone Rund

Der Winkel der Druckstrebe kann für diesen Dübel mit ca. θ_f = 34° angegeben werden. Im Nachbruchbereich steigt wie bei den Dübeln „Krone Kurz“ und „Krone Lang“ der Winkel θ_f ein wenig an.

Wie im Kapitel 4.3.3 schon angedeutet, liegt wie schon bei „Krone Kurz“ hier die Versagensursache wieder im Brechen des Betonkörpers in die Aussparung des Betongurtes. Abbildung 33 zeigt den Verformungszustand des Betongurtes im Bereich der Aussparung. Farblich ist in dieser Abbildung die Verschiebung in Lastrichtung dargestellt. Die großen Verformungen veranschaulichen wieder das Brechen des Betons in die Aussparung.

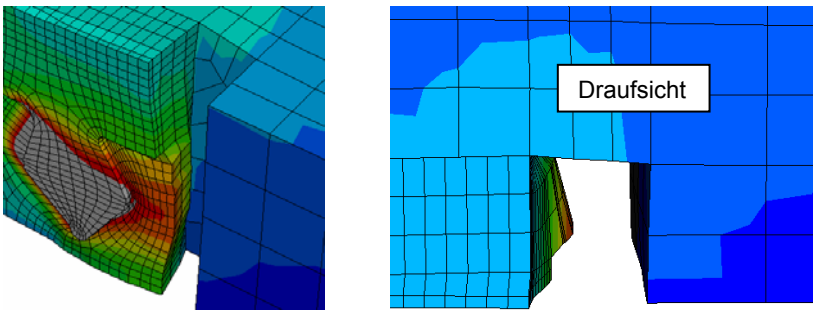


Abbildung 33: Verformungszustand im Betongurt in der Aussparung

4.4.6 Bewehrung

Für die Bewehrung können die selben Beobachtungen angegeben werden wie für die Dübelgeometrien „Krone Kurz“ und „Krone Lang“.

Abbildung 34 zeigt, dass jener der beiden quer über die Dübelleiste verlaufenden Bügel, welcher näher an der Aussparung liegt, bei Erreichen der Traglast im Bereich der Symmetrieebene ins Fließen kommt. Bei weiterer Zunahme der Relativverschiebung δ kamen alle Bügel, welche die Symmetrieebene kreuzen, in diesem Bereich ebenfalls ins Fließen (siehe Abbildung 35).

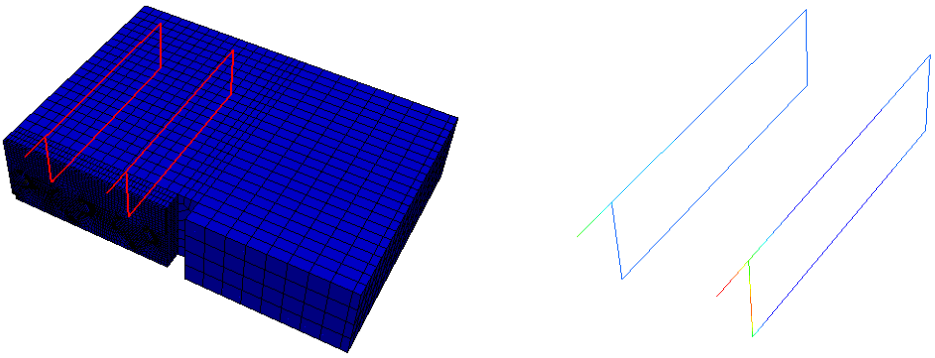


Abbildung 34: Plastizierte Bügelbewehrung bei Erreichen der Traglast (δ=2,8 mm)

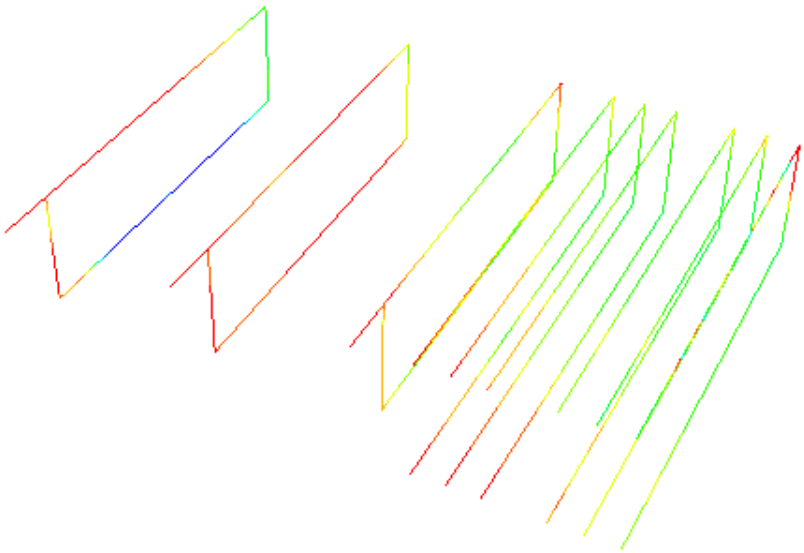


Abbildung 35: Plastizierte Bügelbewehrung im Nachbruchbereich (δ=5 mm)

4.5 Gegenüberstellung der Ergebnisse aller drei Kronendübel

In Diagramm 30 sind die Dübelkennlinien aller drei Modellkörper nach Kapitel 4.2 bis 4.4 zusammengefasst dargestellt. Dargestellt sind nur jene, die die beste Übereinstimmung mit den experimentell bestimmten Ergebnissen aufwiesen. Für alle drei Kronendübel konnte die beste Übereinstimmung mit dem Berechnungsverfahren DYNAMIC, EXPLICIT erzielt werden. Zusätzlich ist in allen drei Fällen die seitliche Reibung zwischen Dübelleiste und angrenzenden Beton nach Kapitel 3.5.2 vernachlässigt und die Betonzugfestigkeit nach Kapitel 3.2.2 reduziert. Für die Dübel „Krone Kurz“ und „Krone Rund“ wurden die besten Ergebnisse mit ψ=36,31° erzielt. Demgegenüber wurde für Dübel „Krone Lang“ mit ψ=45° ein besseres Ergebnis erzielt.

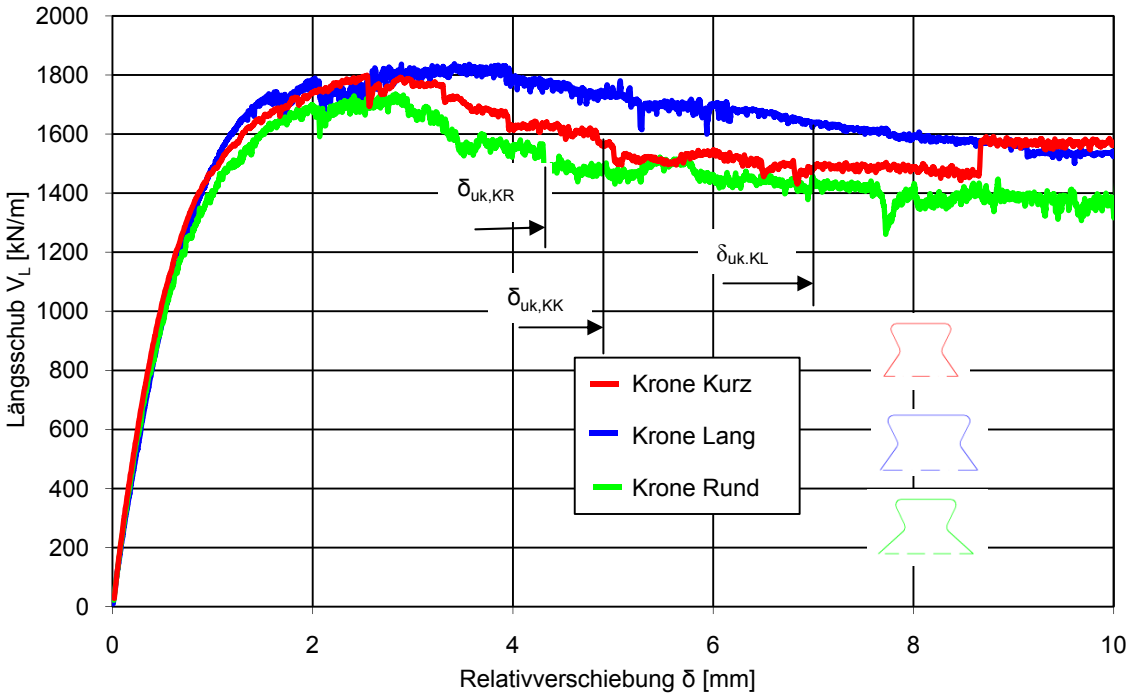


Diagramm 30: Vergleich der Dübelformen anhand der Dübelkennlinien

Der Dübel „Krone Lang“ besitzt eine um 24% höhere Stahlfläche pro Laufmeter als die Dübel „Krone Kurz“ und „Krone Rund“. Die Traglast liegt jedoch nur um 2 bzw. 7% über jener der beiden kleineren Dübel.

Bezüglich der Traglast konnte die beste Übereinstimmung mit den experimentell bestimmten Werten für Dübel „Krone Kurz“ erzielt werden (siehe Diagramm 31, Diagramm 32 und Tabelle 21). Die Überschreitung der Traglast der beiden Modellkörper „Krone Lang“ und „Krone Rund“ kann auf die Tatsache zurückgeführt werden, dass die zur Beschreibung des Materialmodells Beton erforderlichen

Kennwerte nicht durch Laborversuche bestimmt wurden, sondern dem EC2 [6] entnommen wurden. Eine weitere Ursache kann darin liegen, dass es sich bei den Versuchen um Einzelversuche gehandelt hatte und die erzielten Traglasten somit einer Schwankungsbreite im Ergebnis unterliegen.

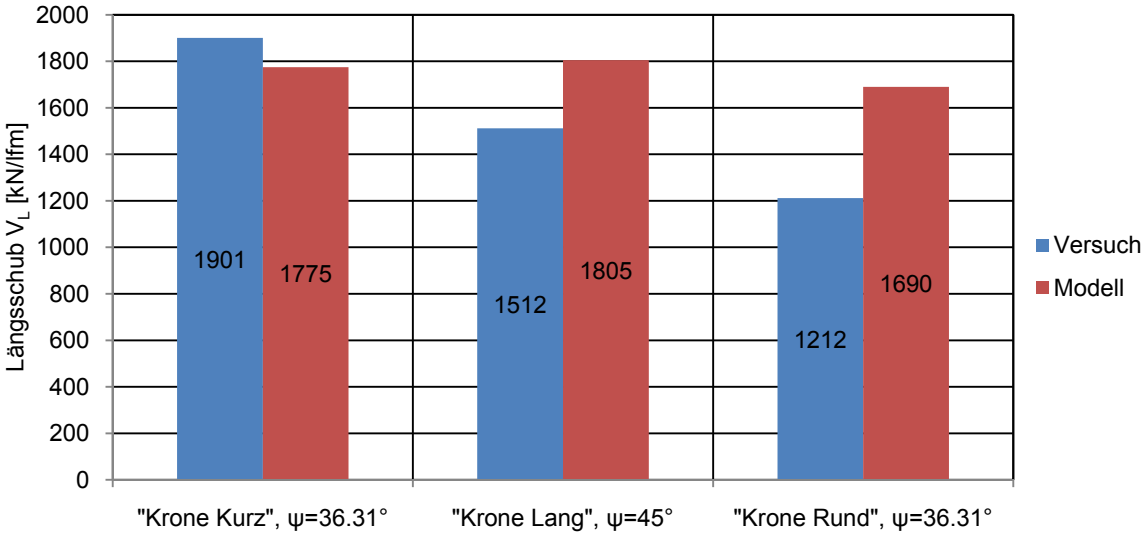


Diagramm 31: Vergleich der Traglast zwischen Versuchs- und Modellkörper

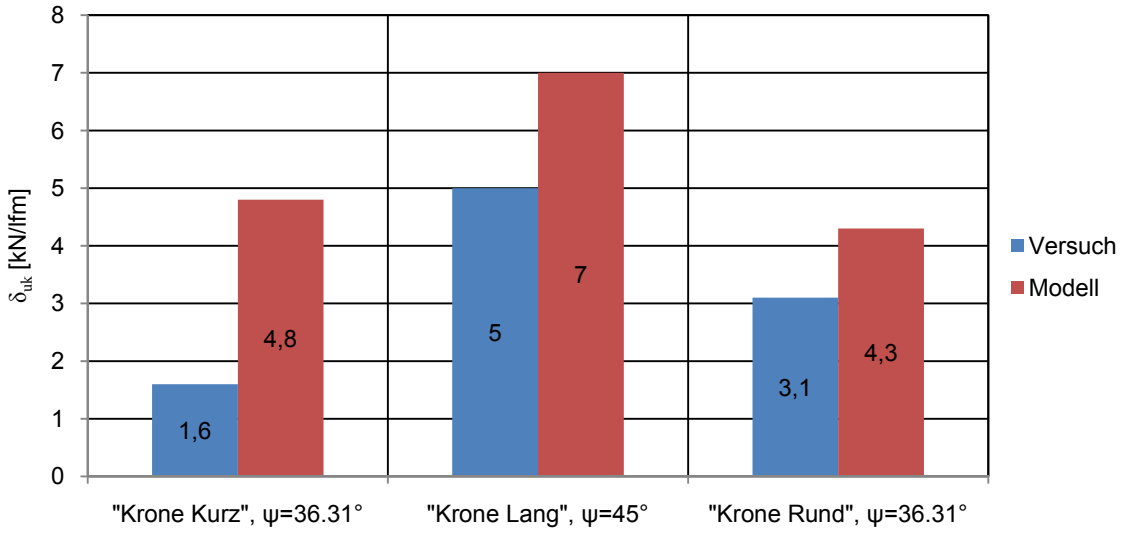


Diagramm 32: Vergleich von δ_{uk} zwischen Versuchs- und Modellkörper

Die Dübel „Krone Kurz“ und „Krone Rund wiesen in beinahe allen Analysen ähnliche Eigenschaften auf. Der größte Unterschied zum Dübel „Krone Lang“ liegt im Nachbruchbereich. Der Abfall der Traglast der Dübel „Krone Kurz“ und „Krone Rund“ beginnt bei ca. 3 mm Relativverschiebung. Bei dem Dübel „Krone Lang“ setzt dieser erst bei 4 mm Relativverschiebung ein. Zusätzlich ist der Lastabfall selbst bei Dübel „Krone Lang“ weniger ausgeprägt wie bei den beiden anderen.

Bei diesen ist der Grund für den raschen Lastabfall der, dass der Beton in die Aussparung bricht und sich somit die zur Aussparung nähere Stahlkrone der Lastübertragung entzieht. Bei Dübel „Krone Lang“ bricht der Beton nicht in die Aussparung, sonder nach oben hin weg. Grund dafür ist, das die Nasen der Stahlzahngeometrie sich nach oben verdrehen und somit eine Verschiebung der Betonplatte in vertikaler Richtung zulassen. Da dieser Bruch zu einem späteren Zeitpunkt als bei den Dübeln „Krone Kurz“ und „Krone Rund“ geschieht, beginnt eben auch der Nachbruchbereich erst bei 4 mm Relativverschiebung.

Tabelle 21: Gegenüberstellung von Versuch – und Modellkörper

Dübel	P_{max} [kN/lfm]		Δ	δ_{Pmax} [mm]		Δ	δ_{uk} [mm]		Δ
	Versuch	Modell	[%]	Versuch	Modell	[%]	Versuch	Modell	[%]
Krone K.	1901	1775	7,1	1,20	2,7	44,4	1,6	4,8	300
Krone L.	1512	1805	19,4	3,15	4,9	64,3	5,0	7,0	40
Krone R.	1212	1690	39,4	1,86	2,9	64,1	3,1	4,3	38,7

Die Auswertung der für das Duktilitätskriterium nach EC4 [1] maßgebenden Relativverschiebung δ_{uk} zeigt, dass zwar durch die numerische Simulation in allen drei Fällen ein größerer Wert erzielt wird als beim realen Versuch (siehe Tabelle 21). Die Überschreitung liegt zwischen ca. 40% für „Krone Lang“ und „Krone Rund“ und beträgt für „Krone Kurz“ sogar 300%. Trotzdem kann gesagt werden, dass die Modellierung generell stimmt. Denn bei genauer Betrachtung wurde mittels Simulation auch für „Krone Kurz“ der geringste Wert ermittelt und für „Krone Lang“ der größte. Für „Krone Kurz“ und „Krone Rund“ konnte das Duktilitätskriterium ebenso wie bei den Versuchen nicht erfüllt werden. „Krone Lang“ überschreitet zwar im Gegensatz zum realen Versuch die erforderliche Relativverschiebung von δ_{uk} = 6 mm. Allerdings muss für die erzielte Traglast auch hier gesagt werden, dass die Vergleichsgrundlage zu den numerisch erzielten Ergebnissen Einzelversuche sind. Somit unterliegt ein $\delta_{uk,Versuch}$ von 8 mm für „Krone Lang“ zum einen sicherlich einer Schwankungsbreite im Ergebnis. Zum anderen ist dieser Wert tendenziell weitaus näher dem Grenzwert von δ_{uk} = 6 mm als diejenigen von „Krone Kurz“ und „Krone Rund“.

Die Betrachtung der Spannungen in vier Punkten der Stahldübelleiste zeigt ebenso, dass die Wirkungsweise der beiden Dübel „Krone Kurz“ und „Krone Rund“ annähernd ident ist. In beiden Fällen schlagen die Spannungen σ_{11} nach Erreichen der Traglast, begründet durch eine starke rotatorische Verformung der

Stahlzähne, in den Zugbereich durch. Die Spannungen σ_V, σ_{11} und σ_{22} sind für alle drei Dübelgeometrien in Diagramm 33 und 34 abgebildet. Der Vergleich anhand dieser Spannungen wurde im Punkt 3 und 4 (siehe Abbildung 13) durchgeführt. Durch die starke rotatorische Verformung der Dübel „Korne Kurz“ und „Krone Lang“ sind im Punkt 4 bei beiden Dübelformen die Spannungen in Richtung 22 Zugspannungen und in Punkt 3 Druckspannungen.

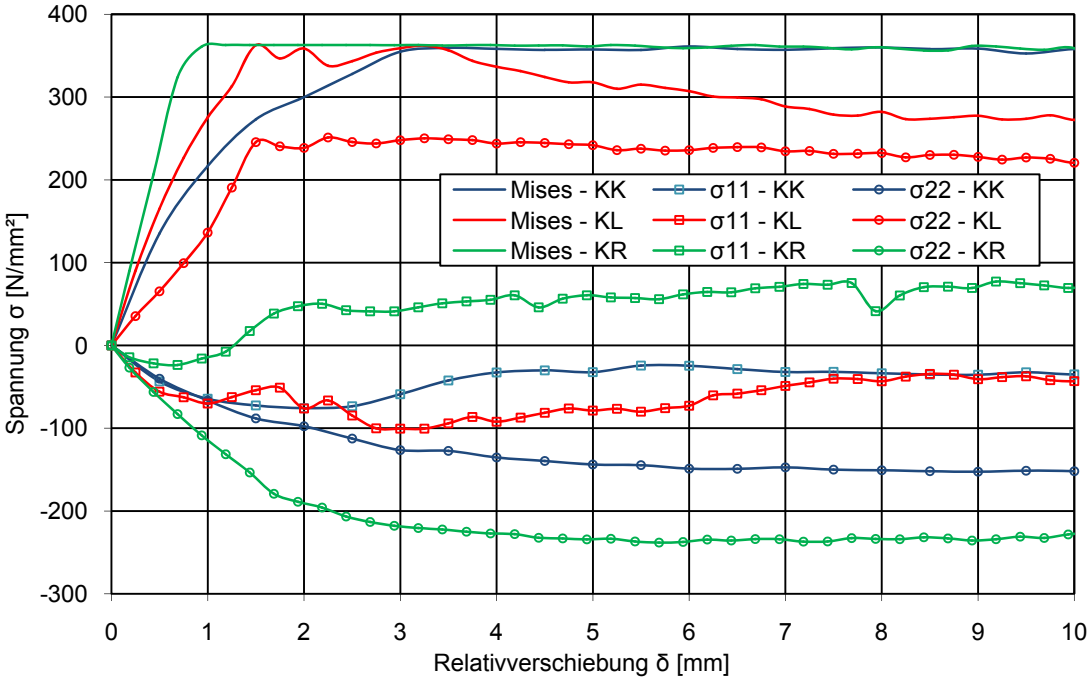


Diagramm 33: Spannungen für alle Dübelformen in Punkt 3

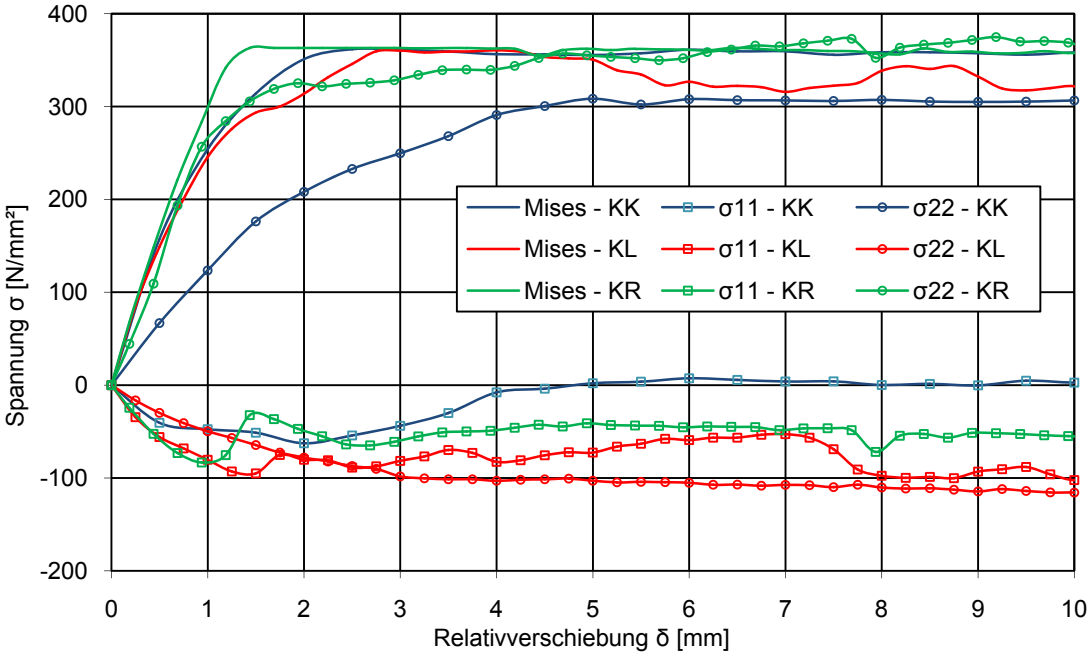


Diagramm 34: Spannungen für alle Dübelformen in Punkt 4

In den Abbildungen für die Erstellung der Fachwerkmodelle ist in allen Modellkörpern ersichtlich, dass sich die Druckstrebe nicht ungehindert an der Aussparung in der Mitte des Betonkörpers ausbreiten kann. Dieser Umstand führt bei den Dübeln „Krone Kurz“ und „Krone Rund“ zum Brechen des Betonkörpers in Lastrichtung, wobei wiederum eine Gemeinsamkeit dieser beiden aufgezeigt ist.
Zur Lösung dieses Problems könnte der Abstand des ersten Dübels zur Aussparung vergrößert oder die Aussparung selbst verkleinert werden.
Betrachtet man die Bügelbewehrung im Modellkörper, so zeigt sich, dass bei allen drei Geometrien jene Bügelbewehrung, welche quer zur Trägerlängsachse und näher zur Aussparung liegt, bei Erreichen der Traglast den Fließbereich erreicht.
Im Nachbruchbereich erreichen alle Bügel im Bereich der Symmetrieebene die Fließspannung.

4.6 Dübel der zweiten Versuchsserie

Für die Dübel der zweiten Versuchsserie waren zum Zeitpunkt der Simulationen noch keine ausgewerteten Ergebnisse vorhanden.

In Diagramm 35 werden lediglich die ausgewerteten Dübelkennlinien, die mit dem Berechnungsverfahren DYNAMIC, EXPLICIT ermittelt wurden, angegeben. Grund dafür ist, dass die Berechnungen mit STATIC, RIKS keine verwertbaren Ergebnisse lieferten. Die Berechnungen brachen nach kürzerster Zeit ab. Die Berechnungen selbst wurden mit Vernachlässigung der seitlichen Reibung zwischen Dübelleiste und umgebenden Beton durchgeführt. Die verwendeten Materialkennwerte sowie das Dehnverhalten von Beton sind in Kapitel 3.2.2 angegeben.

Eine detaillierte Untersuchung der Kronendübel der Serie 2 erfolgt in der Diplomarbeit von Herrn Antesberger [7]. Diese befindet sich zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit in Ausarbeitung.

Die Simulation eines Nachbruchverhaltens, das mit jenen des realen Versuchs in guter Näherung übereinstimmt, konnte nur für den Dübel „Krone Rund“ erzielt werden.

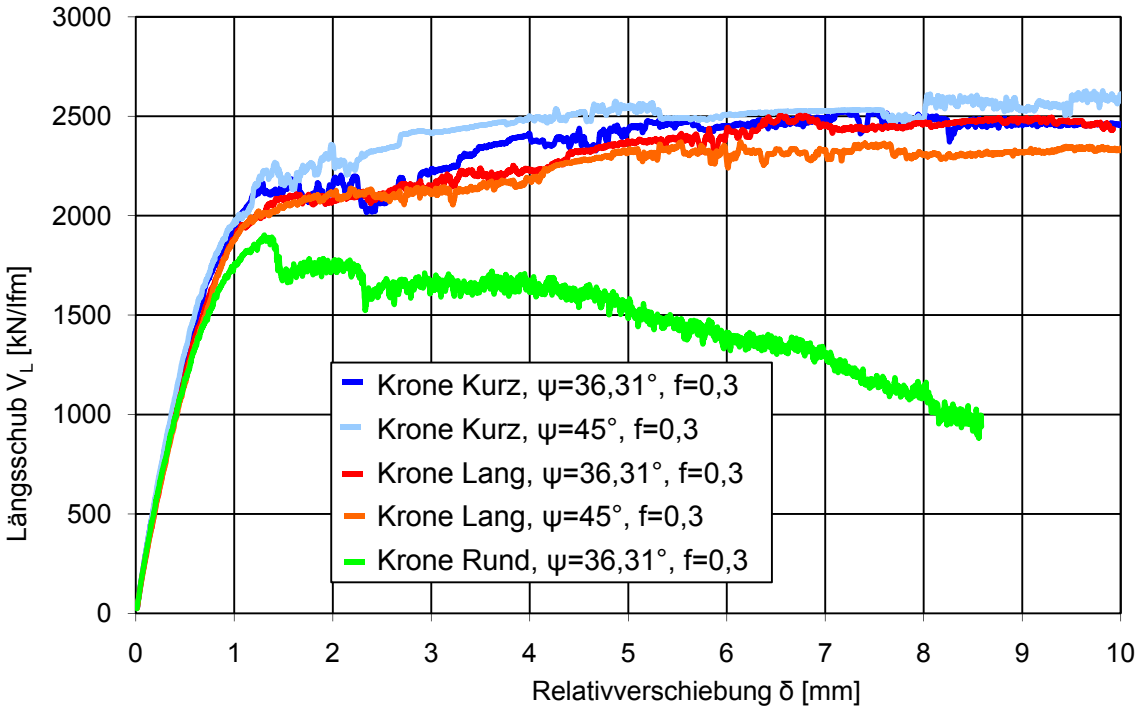


Diagramm 35: Dübelkennlinien für die zweiter Dübelserie mit DYNAMIC,EXPLICIT

In Tabelle 22 und Diagramm 36 sind die Ergebnisse der zweiten Versuchsserie tabellarisch und als Balkendiagramm zusammegefasst dargestellt.

Tabelle 22: Ergebnisse der zweiten Versuchsserie

Dübel		P_{max} [kN/lfm]	δ_{Pmax} [mm]
Krone K.	ψ=36,31°	2501	7,2
	ψ=45°	2620	8,1
Krone L.	ψ=36,31°	2498	6,8
	ψ=45°	2331	5,9
Krone R.	ψ=36,31°	1892	1,3

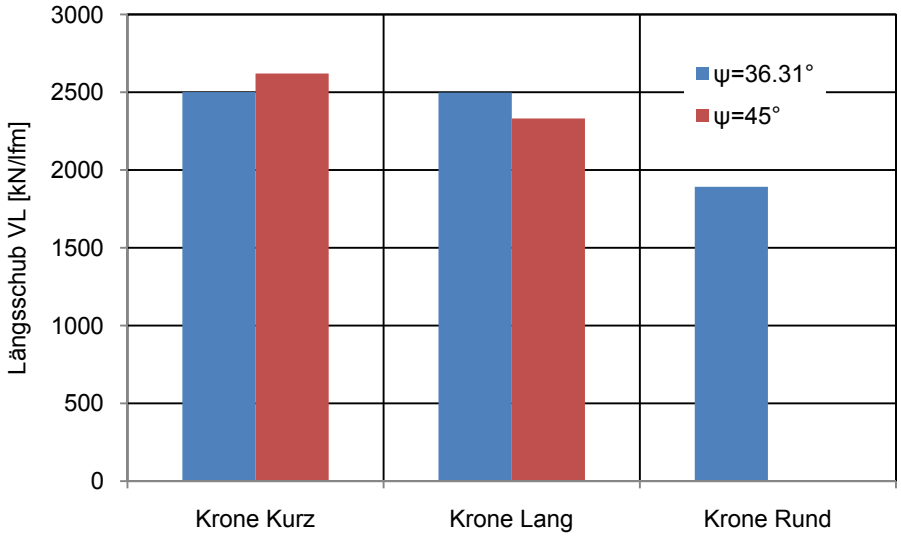


Diagramm 36: Ergebnisse der zweiten Versuchsserie

5. Zusammenfassung/Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente versucht, ein Problem aus dem Stahl-Beton Verbundbau numerisch abzubilden. Bei den untersuchten Strukturen handelt es sich um neuartige alternative Schubverbindern, welche am Institut für Tragkonstruktionen – Stahlbau der TU – Wien entwickelt wurden und anhand von Push-Out Versuchskörpern einer umfangreichen experimentellen Untersuchung unterzogen wurden. Anhand einer erfolgreichen numerischen Abbildung dieser Körper soll es später möglich sein, den Einfluss zusätzlicher Parameter wie die Dimension der Dübelleiste, deren Einbauhöhe in der Betonplatte und die Dimension der Betonplatte selber zu untersuchen. Diese zusätzlichen Untersuchungen, würden sie experimentell durchgeführt werden, wären entweder zu umfangreich oder die dafür erforderlichen Ergebnisse könnten meßtechnisch nicht ermittelt werden.

Vorerst muss aber gesagt werden, dass numerische Analysen von komplexen Problemen, wie sie im Fall der in dieser Arbeit untersuchten Kronendübelleisten durch geometrische Nichtlinearität und nichtlineare Materialmodelle vorliegen, nicht ohne Vergleich mit experimentellen Untersuchungen durchgeführt werden können.

Dieser ist vorallem deshalb immer notwendig, um das FE – Modell im Bezug auf Materialkonstanten, welche durch zusätzliche experimentelle Untersuchungen nicht oder nur sehr schwer zu bestimmen sind, zu kalibrieren. Ist diese Tatsache jedoch einmal gelungen, zeigt die FE – Analyse ihr großes Potential.

In dieser Arbeit wurden drei unterschiedliche Geometrien eines Kronendübels mittels numerischer Simulationen mit dem FE-Programm ABAQUS untersucht. Zur Anwendung kamen die beiden Berechnungsverfahren STATIC, RIKS und DYNAMIC, EXPLICIT.

Für den Fall des Kronendübels wurden mit der Berechnungsmethode STATIC, RIKS in keinem Fall zufriedenstellende Ergebnisse erzielt, da die Berechnungen praktisch immer zu früh abgebrochen wurden, und damit in den wenigsten Fällen ein Plateau erreicht wurde. Aus diesem Grund konnte weder ein Nachbruchverhalten noch die Traglast der Versuchskörper bestimmt werden. Deshalb wird zusammenfassend das Berechnungsverfahren STATIC, RIKS für die Abbildung von Push-Out Versuchen nicht weiterempfohlen.

Eine Nachbildung des Nachbruchverhaltens ist nur mit der Anwendung von DYNAMIC, EXPLICIT möglich. Der Zeitaufwand für eine solche Berechnung ist auch nicht wesentlich größer als mit STATIC, RIKS.

Durch die Anwendung der mittels umfangreicher Parameterstudien ermittelten Werte für den Dilation Angle ψ, den Reibungskoeffizienten f und das Materialverhalten von Beton im Zugbereich wurden Ergebnisse erzielt, welche bezüglich Traglast, Relativverschiebung und Abbildung des Nachbruchverhaltens für alle drei Kronenformen als sehr zufriedenstellend betrachtet werden können. Bezüglich des Reibungskoeffizienten f wurden die besten Ergebnisse durch Vernachlässigung der seitlichen Reibung zwischen Stahldübel und Beton erzielt.

Für die Dübel „Krone Kurz“ und „Krone Rund“ wurden mit ψ=36,31° und für den Dübel „Krone Lang“ mit ψ=45° die besten Ergebnisse erzielt. Für alle Kronenformen wurde für die Definition des Zugbereiches von Beton ein Beispiel aus ABAQUS [4] angewendet. Die übernommenen Werte wurden jedoch bezüglich der Zugfestigkeit reduziert.

Die beste Übereinstimmung der Ergebnisse mit den aus den Versuchen generierten Messdaten konnte für den Dübel „Krone Kurz“ erzielt werden. Die Ursache für die Überschreitung der numerisch erzielten Traglast gegenüber der experimentellen um 20% bzw. um 40% für „Krone Lang“ bzw. „Krone Rund“ kann unter anderem auch an den verwendeten Materialkennwerten des Betons liegen. Da für diese keine Kontrolle (Druckfestigkeit, E-Modul) im Labor durchgeführt wurden, mußte mit jenen gerechnet werden, deren Nennwerte im EC2 [6] angegeben sind.

Stellt man die Ergebnisse, erzielt jeweils mit identischen Parametern (außer ψ), für die drei unterschiedlichen Geometrien der Stahlkronen gegenüber, zeigt sich, dass das größte Potential an Duktilität der Dübel „Krone Lang“ besitzt. Der Grund dafür ist, dass für die Dübel „Krone Kurz“ und „Krone Rund“ der Beton in Kraftrichtung in die Aussparung gebrochen ist. Damit entzog sich jener Stahlzahn, welcher näher an der Aussparung lag, an der weiteren Lasteintragung. Damit setzte bei diesen Dübelformen der Traglastabfall früher und auch ausgprägter ein als bei dem Dübel „Krone Lang“, da bei diesem über die gesamte Berechnungsdauer betrachtet beide Stahlkronen im vollen Maße wirkten.

Der Grund für das Ausbrechen des Betons in die Aussparung ist der, dass jener Stahlzahn, der näher an dieser liegt, zu nahe an der Aussparung liegt. Damit konnte sich die Druckstrebe nicht ungehindert ausbilden.
Für weitere Analysen sollte der Versuchs- bzw. Modellkörper dahingehend angepaßt werden, dass sich die Druckstrebe ungehindert ausbreiten kann und es somit zu keinem Ausbrechen des Betons in die Aussparung des Betonkörpers kommt.
Für alle drei Dübelformen wurde die Beobachtung gemacht, dass im Traglastbereich jene Bügelbewehrung, welche quer zur Trägerlängsachse und gleichzeitig auch näher an der Aussparung lag, die Fließgrenze erreichte. Im weiteren Berrechnungsverlauf kamen aber alle Bügelbewehrungen im Bereich der Symmetrieebene in den Fließbereich.
Eine Betrachtung der Abhebung der Betonplatte kann für die Dübel „Krone Kurz“ und „Krone Rund“ als positiv angesehen werden. Für den Dübel „Krone Lang“ überschritt die Abhebung der Betonplatte den zulässigen Wert gegen Ende der Berechnung.

Nachdem für die diversen Dübelformen eine Übereinstimmung von experimentellen und numerischen Analysen gefunden wurde, kann die numerische Analyse auf Parameter ausgedehnt werden, welche aufgrund ihres hohen Aufwandes bezüglich Kosten und Zeitaufwand im Labor nicht durchführbar wären.
Zu diesen Parametern zählen, wie oben beschrieben, die Dimensionen der Dübelleiste, deren Einbauhöhe in der Betonplatte und die Dimension der Betonplatte selber.
In weiterer Folge kann der Einfluß geänderter Materialeigenschaften auf das Tragverhalten des Kronendübels untersucht werden. Materialkennwerte für den Beton sollten jedoch wenn möglich vermieden werden, da der Dilation Angle ψ eine Materialkonstante zur Beschreibung des plastischen Verhaltens von Beton darstellt. Somit müßte vorerst dieser Wert für eine geänderte Betongüte bestimmt werden, bevor mit diesen geänderten Werten Analysen durchgeführt werden können.

6. Literaturverzeichnis

[1] ÖNORM EN 1994-1-1: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton; Teil 1-1: Allgmeine Bemessungsregeln und Anwendungsregeln für den Hochbau. Österreichisches Normungsinstitut, 1020 Wien, Ausgabe 2005-06-01

[2] Fink J., Petraschek Th., Ondris L.: Experimentelle Untersuchungen zum Trag- und Verformungsvermögen alternativer Schubverbinder im Stahl-Beton Verbundbau. Technische Universität Wien, Institut für Tragkonstruktionen – Stahlbau, Wien, 2007; Veröffentlichung in Vorbereitung

[3] Zimmermann S.: Finite Elemente und ihre Anwendung auf physikalisch und geometrisch nichtlineare Probleme. Report TUE-BCO 01.05, Technische Universität Eindhoven, Niederlande, März 2001

[4] ABAQUS, Documentation Ver. 6.6, http://sunkist.matrix.tuwien.ac.at:2080/v6.6/index.html

[5] Fink J., Petraschek Th., Ondris L.: Push-Out Test Parametric Simulation of a New Sheet-Type Shear Connector, in Projekte an den zentralen Applikationsserver, Berichte 2006, Zentraler Informationsdienst (ZID) der Technischen Universität Wien, Wien 2007, pp. 131-153, also: http://www.zid.tuwien.ac.at/projekte

[6] ÖNORM EN 1992-1-1: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken; Teil 1-1: Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau. Österreichisches Normungsinstitut, 1020 Wien, Ausgabe 2007-02-01

[7] Antesberger E.: Numerische Vergleichbetrachtung an neuartigen Schubverbinserleisten. Technische Universität Wien, Institut für Tragkonstruktionen – Stahlbau, 2007; Diplomarbeit in Ausarbeitung

7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzipdarstellung eines Verbundquerschnitts 6
Abbildung 2: Dübelkennlinie, Definition der Duktilität [2] 7
Abbildung 3: Wegaufnehmer zur Messung der Relativverschiebungen [2] 10
Abbildung 4: Geometrie des Dübelbleches 15
Abbildung 5: Geometrie des Betonkörpers 16
Abbildung 6: Bewehrung im Modellkörper 17
Abbildung 7: Druckspannung am Auflager mit (links) und ohne (rechts) Einspannung bei Erreichen der Traglast 18
Abbildung 8: Geometrische Interpretation des Dilation Angles [4] 20
Abbildung 9: Verschiebungsrandbedingung 41
Abbildung 10: Seeds und Netz des Parts Dübelblech 46
Abbildung 11: Feines Netz des Betonkörpers 46
Abbildung 12: Gesamtes Modell 47
Abbildung 13: Definition der Richtung für die Dehnungen 51
Abbildung 14: Punkte zur Bestimmung der Abhebung Δ 52
Abbildung 15: Definition für die Richtung der Dehnungen 59
Abbildung 16: Verformung der Stahlzähne bei δ = 2,5 mm und δ = 5 mm 61
Abbildung 17: Spannungszustand im Betongurt bei Erreichen der Traglast 63
Abbildung 18: Verformungszustand in der Aussparung des Betongurtes 63
Abbildung 19: Fachwerkmodell, „Krone Kurz“ 64
Abbildung 20: Plastizierte Bügelbewehrung bei Erreichen der Traglast (δ=2,5 mm) 65
Abbildung 21: Plastizerte Bügelbewehrung im Nachbruchbereich (δ=5,0 mm) 65
Abbildung 22: Definition der Richtung der Dehnungen 67
Abbildung 23: Verformung der Stahlzähne δ=3,5mm und δ=7mm 70
Abbildung 24: Spannungszustand im Betongurt bei Erreichen der Traglast 71
Abbildung 25: Fachwerk, „Krone Lang“ 72
Abbildung 26: Verschiebung in Richtung 22 des Betongurtes (δ=7 mm) 73
Abbildung 27: Plastizierte Bügelbewehrung bei Erreichen der Traglast (δ=3,5mm) 73
Abbildung 28: Plastizierte Bügelbewehrung im Nachbruchbereich (δ=7mm) 73
Abbildung 29: Definition der Richtung der Dehnungen 75
Abbildung 30: Verformung der Stahlzähne bei δ=2,8mm und δ=5mm 78
Abbildung 31: Spannungszustand im Betongurt bei Erreichen der Traglast (δ=2,8 mm) 79
Abbildung 32. Fachwerk, Krone Rund 80
Abbildung 33: Verformungszustand im Betongurt in der Aussparung 80
Abbildung 34: Plastizierte Bügelbewehrung bei Erreichen der Traglast (δ=2,8 mm) 81
Abbildung 35: Plastizierte Bügelbewehrung im Nachbruchbereich (δ=5 mm) 81
Abbildung 36: Dübelgeometrie, „Krone Kurz“ III
Abbildung 37: Dübelgeometrie, „Krone Kurz“, Detail A III

Abbildung 38: Dübelgeometrie, „Krone Lang“ IV
Abbildung 39: Dübelgeometrie, „Krone Lang“, Detail A IV
Abbildung 40: Dübelgeometrie, „Krone Rund“ V
Abbildung 41: Dübelgeometrie, „Krone Rund“, Detail A V
Abbildung 42: Geometrie des Betonkörpers, „Krone Kurz“, Serie 1 VI
Abbildung 43: Geometrie der Bügel, „Krone Kurz“, Serie 1 VI
Abbildung 44: Geometrie des Betonkörpers, „Krone Lang“, Serie 1 VII
Abbildung 45: Geometrie der Bügel, „Krone Lang“, Serie 1 VII
Abbildung 46: Geometrie des Betonkörpers, „Krone Rund“, Serie 1 VIII
Abbildung 47: Geometrie der Bügel, „Krone Rund“, Serie 1 VIII
Abbildung 48: Geometrie des Betonkörpers, „Krone Kurz“, Serie 2 IX
Abbildung 49: Geometrie der Bügel, „Krone Kurz“, Serie 2 IX
Abbildung 50: Geometrie des Betonkörpers, „Krone Lang“, Serie 2 X
Abbildung 51: Geometrie der Bügel, „Krone Lang“, Serie 2 X
Abbildung 52: Geometrie des Betonkörpers, „Krone Rund“, Serie 2 XI
Abbildung 53: Geometrie der Bügel, „Krone Rund“, Serie 2 XI

8. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Geometrie der Schubverbinder [2] 8
Tabelle 2: Geometrie der Stahlbauelemente [2] 8
Tabelle 3: Übersicht und Bewehrungsführung [2] 9
Tabelle 4: Materialkennwerte für Dübelleiste, Bewehrung und Anker 22
Tabelle 5: Materialkennwerte für Beton 23
Tabelle 6: Spannungs – Dehnungs – Beziehug für C25/30 25
Tabelle 7: Tensile Behavior 26
Tabelle 8: Tensile Damage 27
Tabelle 9: Definition von Sets 29
Tabelle 10: Definition von Surfaces 30
Tabelle 11: Einstellungen für STATIC, RIKS und DYNAMIC, EXPLICIT 34
Tabelle 12: Field Output 34
Tabelle 13: History Output 35
Tabelle 14: Contact Property 38
Tabelle 15: Interaction 39
Tabelle 16: Constraint 39
Tabelle 17: Amplitude 41
Tabelle 18: Boundary Conditions 42
Tabelle 19: Einstellungen für das FE - Netz 49
Tabelle 20: Durchgeführte FE - Berechnungen 53
Tabelle 21: Gegenüberstellung von Versuch – und Modellkörper 84
Tabelle 22: Ergebnisse der zweiten Versuchsserie 88
Tabelle 23: Materialkennwerte des Betons der zweiten Serie XII

9. Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Spannungs – Dehnungs – Verlauf für Beton 24
Diagramm 2: Tensile Behavior 26
Diagramm 3: Tensile Damage 27
Diagramm 4: Amplituden 41
Diagramm 5: Amplitude 42
Diagramm 6: Unterschied verschieden feiner Netze mit STATIC, RIKS 47
Diagramm 7: Unterschied tie constraint und durchgehendes Netz 48
Diagramm 8: Dübelkennlinien, „Krone Kurz“, Berechnungsverfahren STATIC,RIKS 54
Diagramm 9: Traglast, „Krone Kurz“, Berechnungsverfahren STATIC, RIKS 55
Diagramm 10: Dübelkennlinien, „Krone Kurz“, Berechnungsverfahren DYNAMIC, EXPLICIT 56
Diagramm 11: Dübelkennlinien, „Krone Kurz“, Berechnungsvefahren DYNAMIC, EXPLICIT 57
Diagramm 12: Dübelkennlinie, „Krone Kurz“, gesamter Berechnungsverlauf 58
Diagramm 13: Energien ALLIE/ALLKE, „Krone Kurz“ 58
Diagramm 14: Spannungen von Mises, „Krone Kurz“ 59
Diagramm 15: Spannungen σ_{ii}, „Krone Kurz“ 60
Diagramm 16: Verzerrungen ε_{ii}, „Krone Kurz“ 60
Diagramm 17: Abhebekennlinie, „Krone Kurz“ 62
Diagramm 18: Dübelkennlinien, „Krone Lang“, Berechnungsverfahren STATIC, RIKS 66
Diagramm 19: Dübelkennlinien, „Krone Lang“, Berechnungsverfahren DYNAMIC,EXPLICIT 67
Diagramm 20: Spannungen von Mises, „Krone Lang“ 68
Diagramm 21: Spannungen σ_{ii}, „Krone Lang“ 68
Diagramm 22: Verzerrungen $\varepsilon_{ii,}$ „Krone Lang“ 69
Diagramm 23: Abhebekennlinie, „Krone Lang“ 70
Diagramm 24: Dübelkennlinien, „Krone Rund“, Berechnungsverfahren STATIC,RIKS 74
Diagramm 25: Dübelkennlinien, „Krone Rund“, Berechnungsverfahren DYNAMIC, EXPLICIT 75
Diagramm 26: Spannunge von Mises, „Krone Rund“ 76
Diagramm 27: Spannungen σ_{ii}, „Krone Rund“ 76
Diagramm 28: Verzerrungen ε_{ii}, „Krone Rund“ 77
Diagramm 29: Abhebekennlinie, „Krone Rund“ 78
Diagramm 30: Vergleich der Dübelformen anhand der Dübelkennlinien 82
Diagramm 31: Vergleich der Traglast zwischen Versuchs- und Modellkörper 83
Diagramm 32: Vergleich von δ_{uk} zwischen Versuchs- und Modellkörper 83
Diagramm 33: Spannungen für alle Dübelformen in Punkt 3 85
Diagramm 34: Spannungen für alle Dübelformen in Punkt 4 85
Diagramm 35: Dübelkennlinien für die zweiter Dübelserie mit DYNAMIC,EXPLICIT 87
Diagramm 36: Ergebnisse der zweiten Versuchsserie 88

Anhang A – Software

Installation und Betrieb von ABAQUS an einem externen Rechner

- Um eine Installations – CD und einen Account für den TU – Server zu bekommen muss der zuständige Assistent eine Anmeldung beim ZID durchführen.
- Für den Datentransfer zwischen Rechner und TU – Server ist ein VPN – Tunnel notwendig. Diese Datenleitung ist nicht notwendig, wenn man sich im TU – Netz (Datentankstelle oder WLAN) befindet.
    - Über den ZID kann online ein Account für den VPN – Tunnel, welcher sofort verfügbar ist, beantragt werden.
    - Als Konfiguration wird die Datei VPNTUONLY.ZIP benötigt, welche beim ZID heruntergeladen werden kann.
    - Der Client kann ebenfalls beim ZID heruntergeladen werden.
    - Nach dem Start des Clienten muss das Konfigurationsfile importiert werden.
    - Zur Kontrolle der Verbindung kann in der DOS – Eingabeaufforderung der Befehl „ping l1.zserv.tuwien.ac.at“ eingegeben werden.
- Zur Installation und zum Start von ABAQUS muss immer eine Verbindung über ein VPN hergestellt sein.
    - CD starten
    - Product Install auswählen
    - Doku Installation ignorieren
    - Lizens- und Dokuserver laut Angabe vom ZID eingeben
- Um Jobs am TU – Server rechnen zu lassen, wird ein Transfer Client und eine Secure Shell benötigt.
    - Bsp.: Transfer Client: WinSCP; Secure Shell: Putty
    - Das mit ABAQUS erstellte *.inp file wird mittels Transfer Client auf der TU – Server geladen.
    - Hostname des Servers wird vom ZID mitgeteilt.
        - Alter Server: sc.zserv.tuwien.ac.at
        - Neuer Server: icp5.zserv.tuwien.ac.at

- Anschließend Secure Shell öffnen und job starten.
  - Alter Server: abq653 analysis queue=rms job=JOBID input=*.inp double
  - Neuer Server: abq662 analysis job=JOBID input=*.inp double
- Nach Beendigung des Jobs kann wieder mittels Transfer Client ein *.odb file heruntergeladen werden und mit ABAQUS/CAE die Ergebnisse betrachtet werden.
- Um zu sehen, welche Jobs noch laufen, folgenden Befehl eningeben:
  - Alter Server : bjobs
  - Neuer Server: qstat
- Um laufende Jobs zu beenden:
  - Alter Server: bkill ID
  - Neuer Server: qdel ID

Anhang B – Pläne

Dübel, „Krone Kurz“

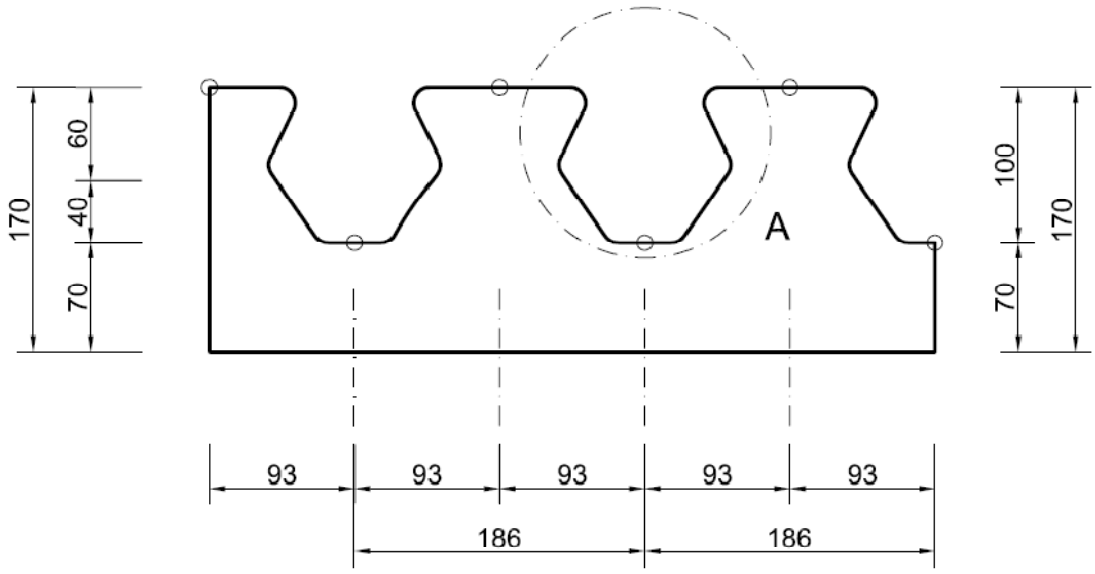


Abbildung 36: Dübelgeometrie, „Krone Kurz“

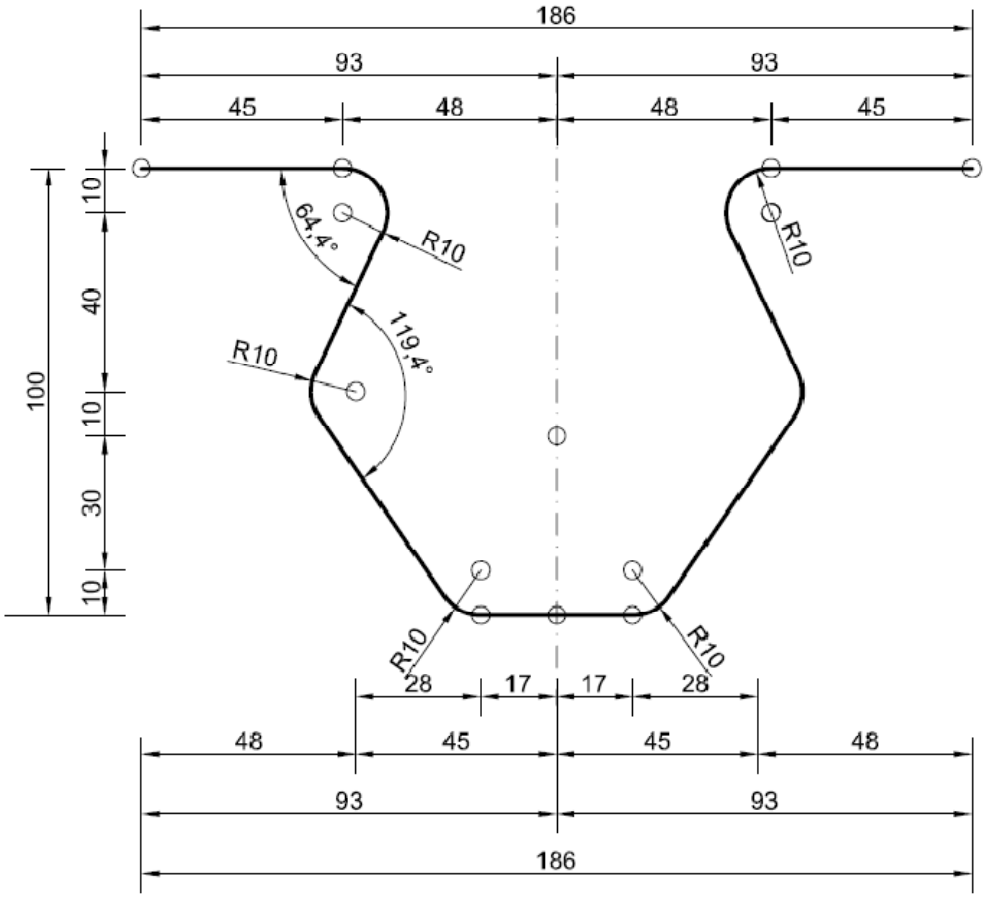


Abbildung 37: Dübelgeometrie, „Krone Kurz“, Detail A

Dübel, „Krone Lang“

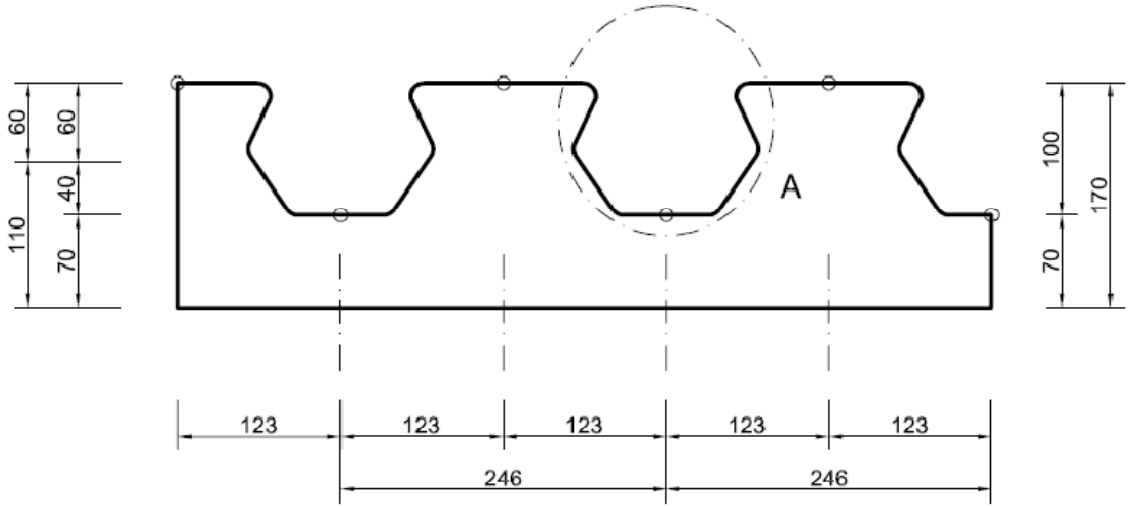


Abbildung 38: Dübelgeometrie, „Krone Lang“

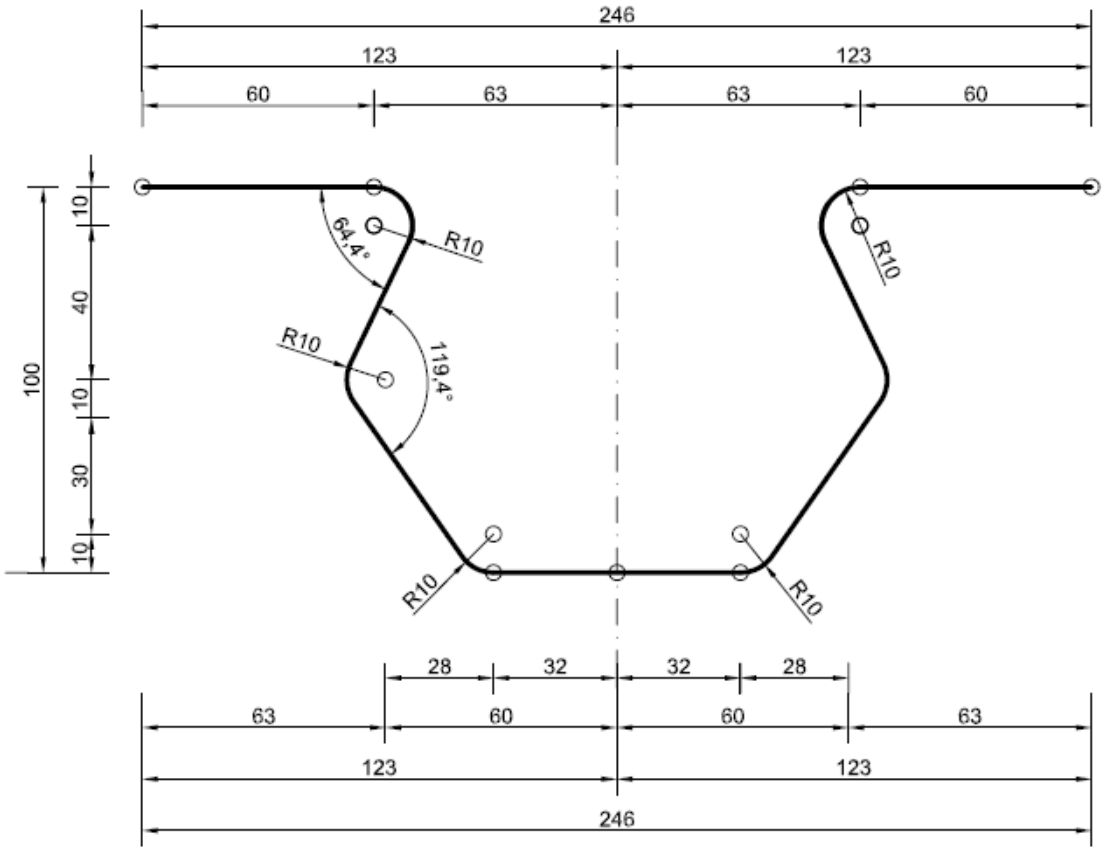


Abbildung 39: Dübelgeometrie, „Krone Lang“, Detail A

Dübel, „Krone Rund“

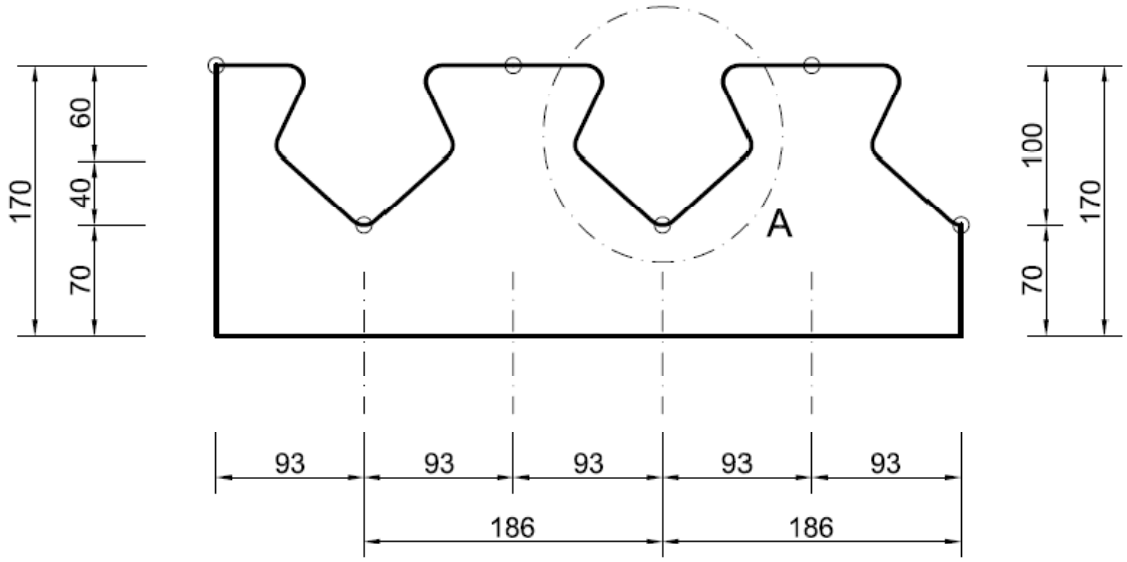


Abbildung 40: Dübelgeometrie, „Krone Rund“

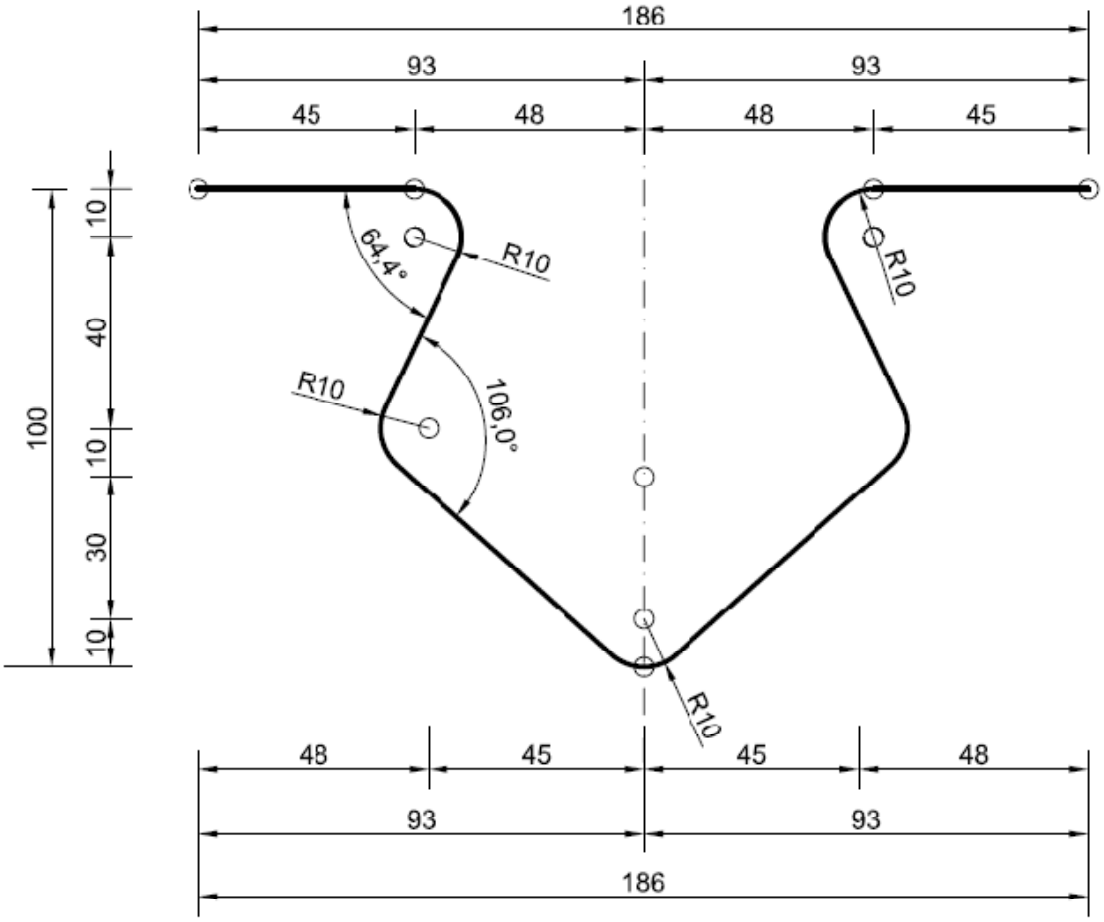


Abbildung 41: Dübelgeometrie, „Krone Rund“, Detail A

Geometrie des Betonkörpers und Lage der Anker, „Krone Kurz“, Serie 1

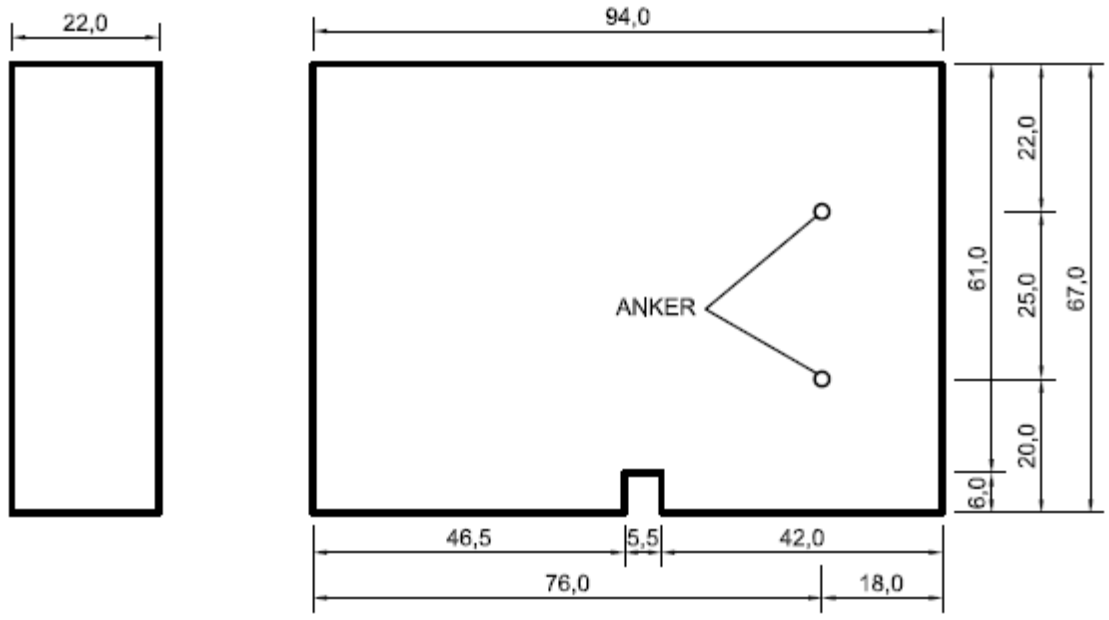


Abbildung 42: Geometrie des Betonkörpers, „Krone Kurz“, Serie 1

Geometrie der Bügel und Anker, „Krone Kurz“, Serie 1

Die Anker sind gerade Linienelemente mit einer Länge von 430 mm und einem Durchmesser von Ø = 15 mm.

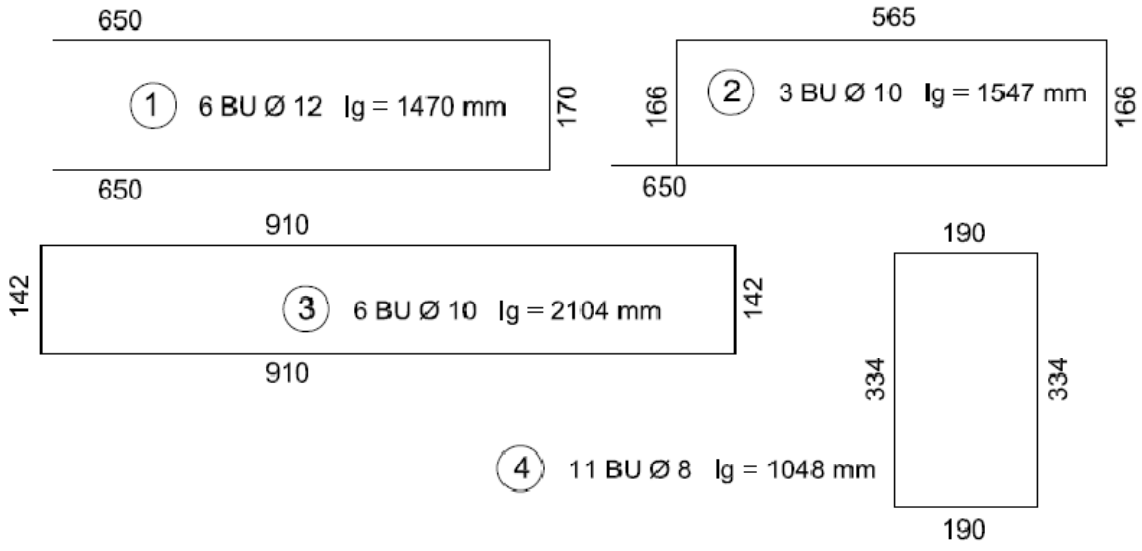


Abbildung 43: Geometrie der Bügel, „Krone Kurz“, Serie 1

Geometrie des Betonkörpers und Lage der Anker, „Krone Lang“, Serie 1

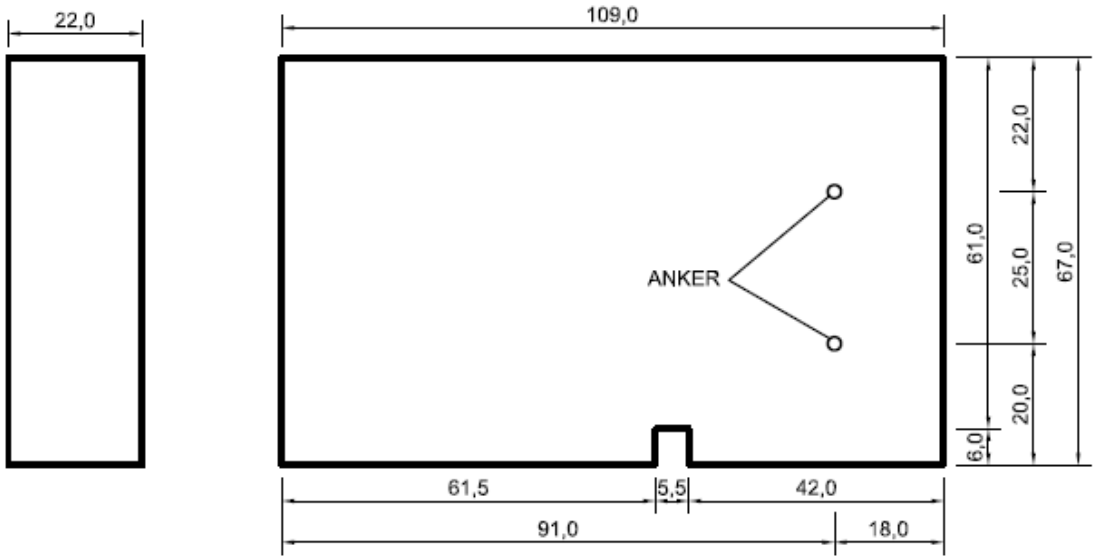


Abbildung 44: Geometrie des Betonkörpers, „Krone Lang“, Serie 1

Geometrie der Bügel und Anker, „Krone Lang“, Serie 1

Die Anker sind gerade Linienelemente mit einer Länge von 430 mm und einem Durchmesser von Ø = 15 mm.

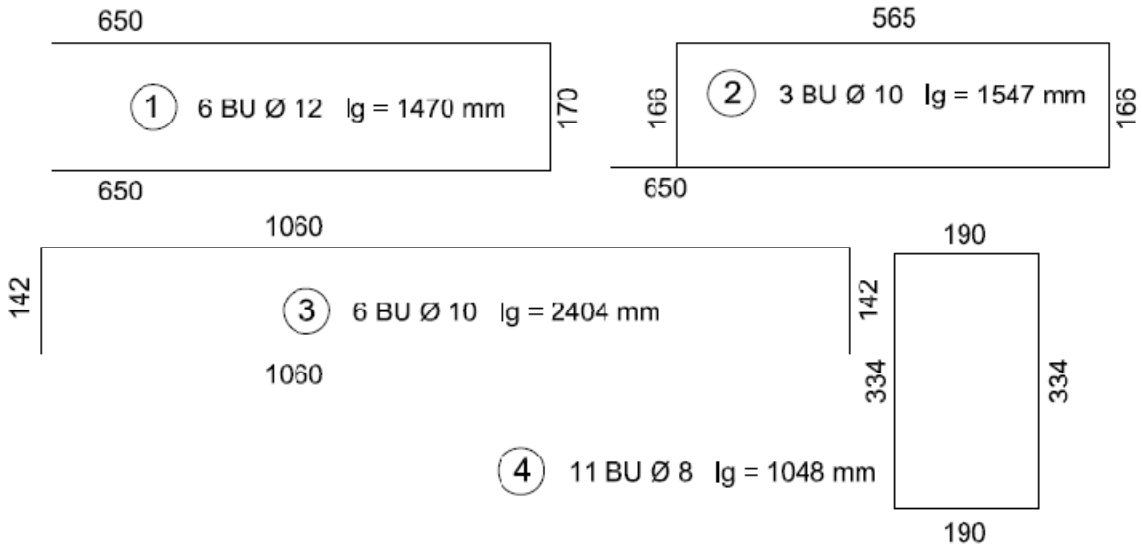


Abbildung 45: Geometrie der Bügel, „Krone Lang“, Serie 1

Geometrie des Betonkörpers und Lage der Anker, „Krone Rund“, Serie 1

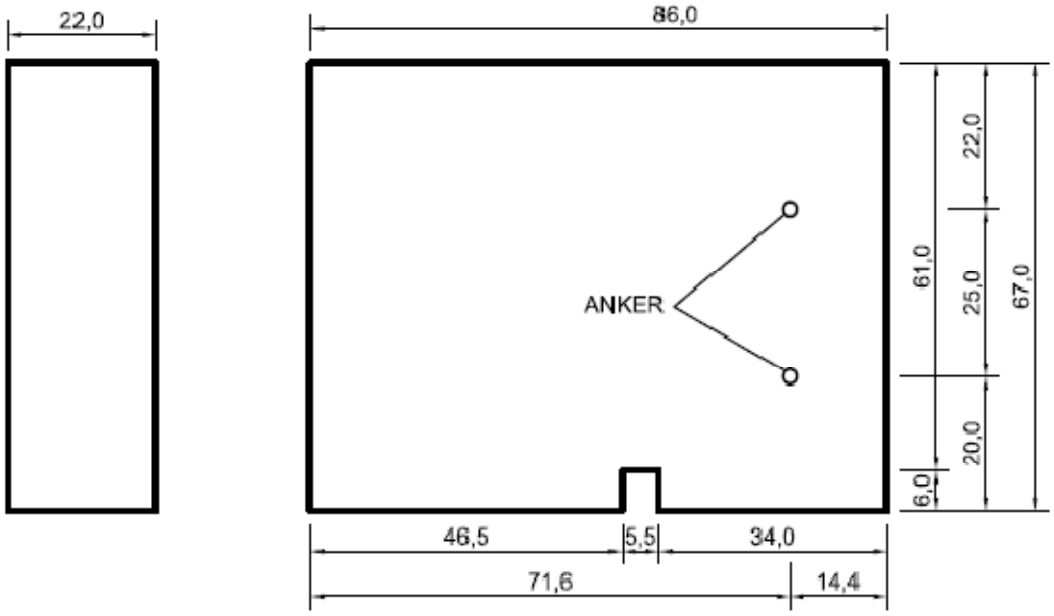


Abbildung 46: Geometrie des Betonkörpers, „Krone Rund“, Serie 1

Geometrie der Bügel und Anker, „Krone Rund“, Serie 1

Die Anker sind gerade Linienelemente mit einer Länge von 430 mm und einem Durchmesser von Ø = 15 mm.

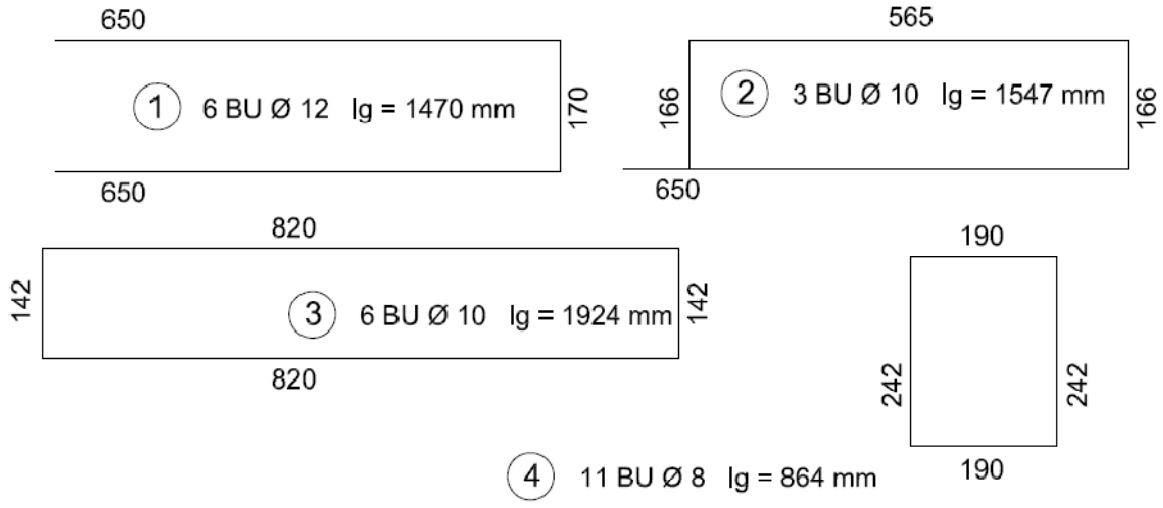


Abbildung 47: Geometrie der Bügel, „Krone Rund“, Serie 1

Geometrie des Betonkörpers und Lage der Anker, „Krone Kurz“, Serie 2

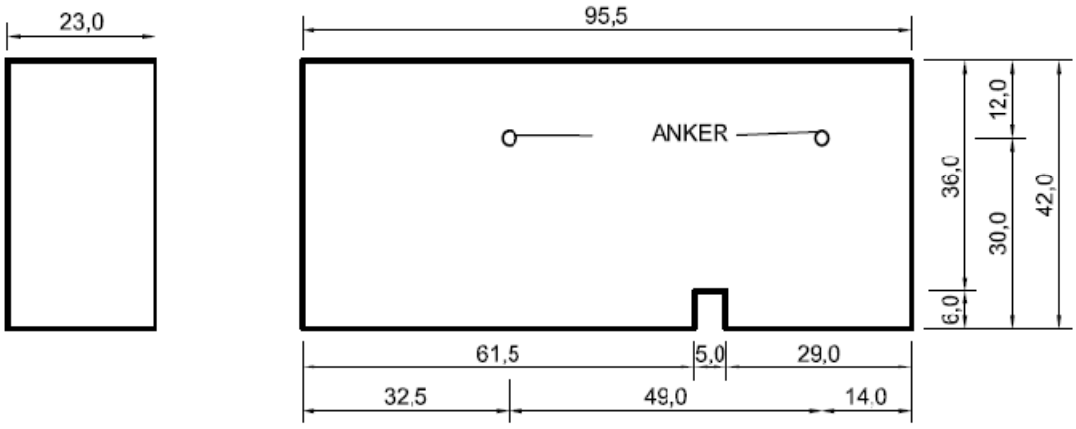


Abbildung 48: Geometrie des Betonkörpers, „Krone Kurz“, Serie 2

Geometrie der Bügel und Anker, „Krone Kurz“, Serie 2

Die Anker sind gerade Linienelemente mit einer Länge von 430 mm und einem Durchmesser von Ø = 15 mm.

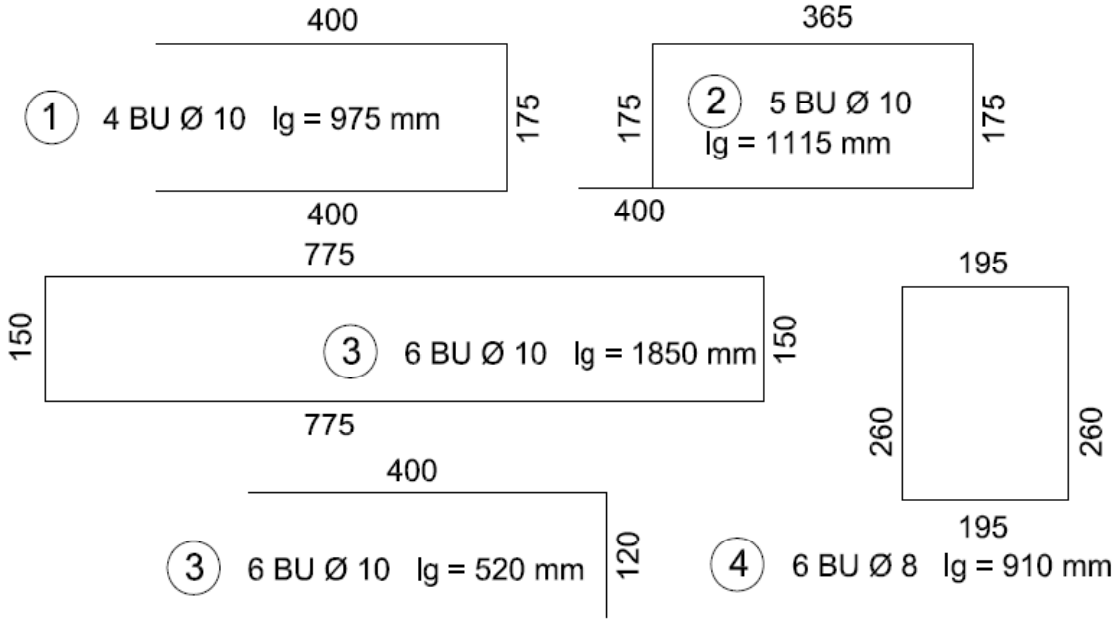


Abbildung 49: Geometrie der Bügel, „Krone Kurz“, Serie 2

Geometrie des Betonkörpers und Lage der Anker, „Krone Lang“, Serie 2

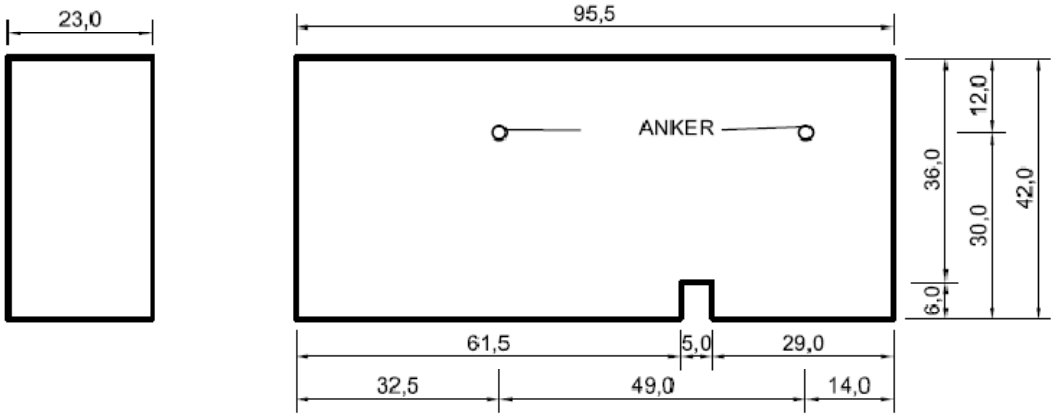


Abbildung 50: Geometrie des Betonkörpers, „Krone Lang“, Serie 2

Geometrie der Bügel und Anker, „Krone Lang“, Serie 2

Die Anker sind gerade Linienelemente mit einer Länge von 430 mm und einem Durchmesser von Ø = 15 mm.

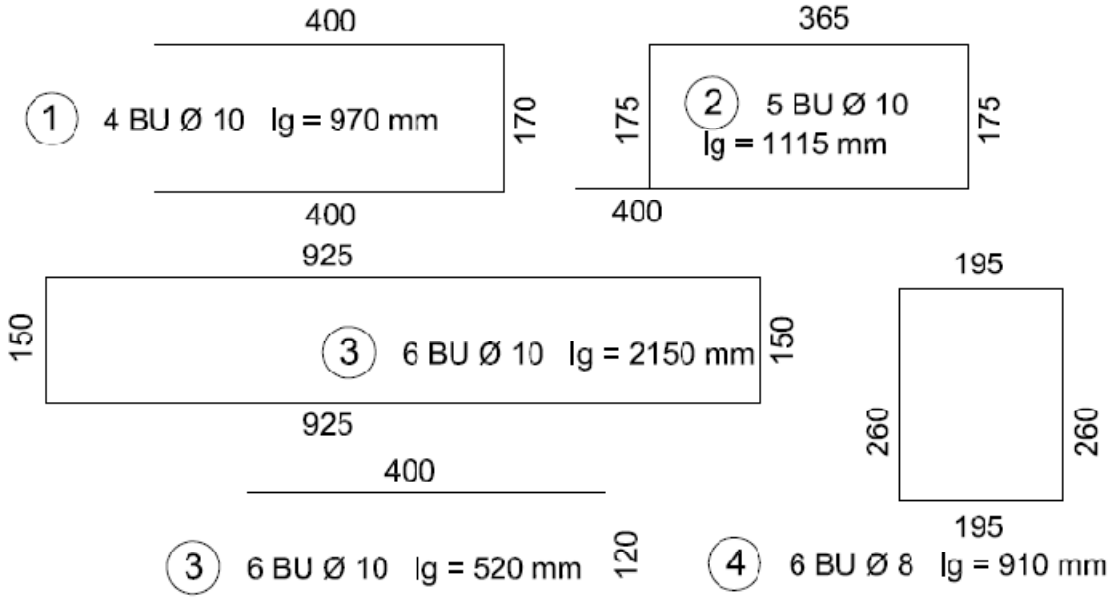


Abbildung 51: Geometrie der Bügel, „Krone Lang“, Serie 2

Geometrie des Betonkörpers und Lage der Anker, „Krone Rund“, Serie 2

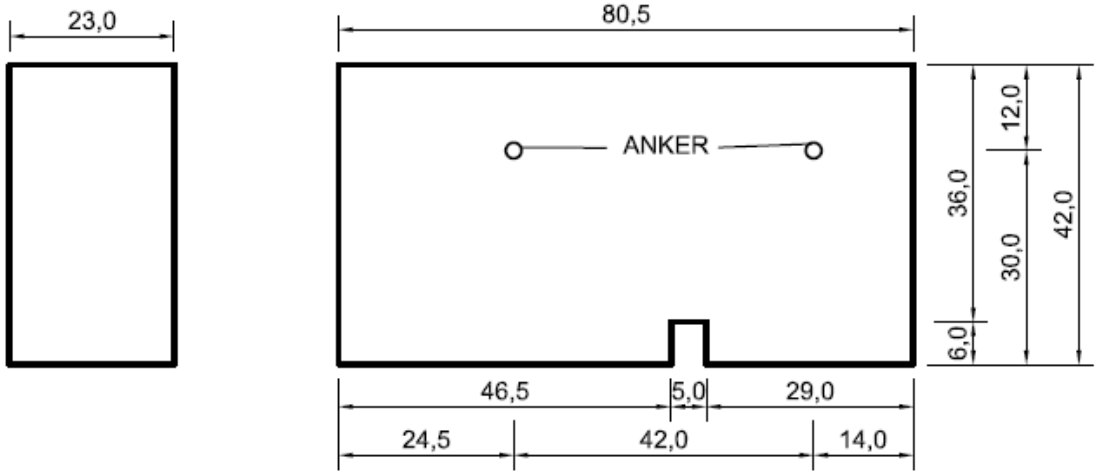


Abbildung 52: Geometrie des Betonkörpers, „Krone Rund“, Serie 2

Geometrie der Bügel und Anker, „Krone Rund“, Serie 2

Die Anker sind gerade Linienelemente mit einer Länge von 430 mm und einem Durchmesser von Ø = 15 mm.

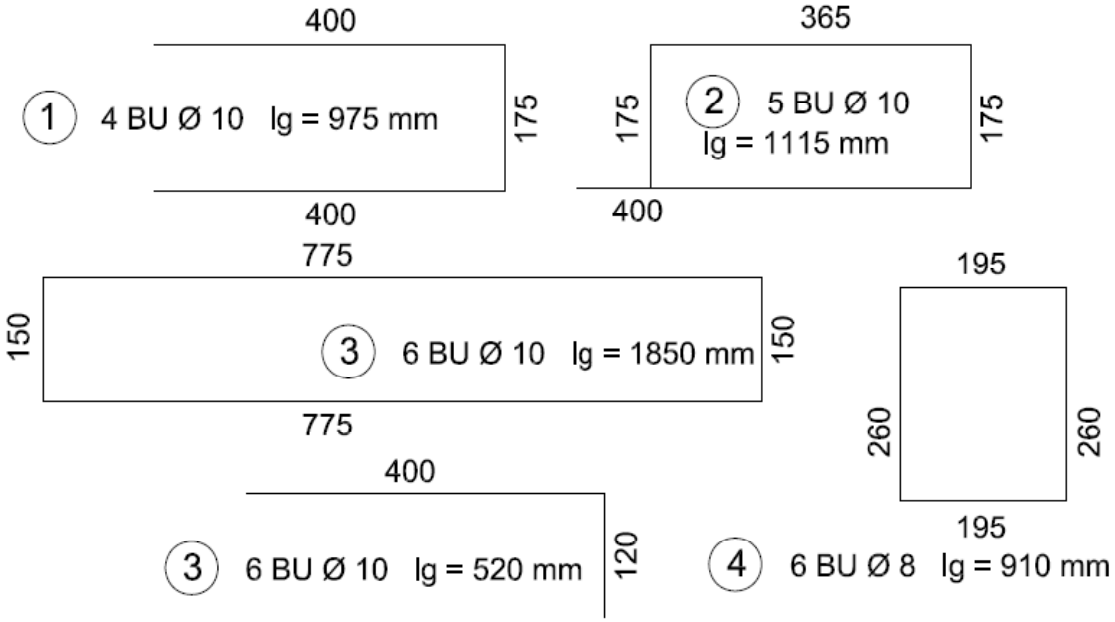


Abbildung 53: Geometrie der Bügel, „Krone Rund“, Serie 2

Anhang C – Materialbeschreibung für die zweite Dübelserie

Würfeldruckfestigkeit

v2_B_a.1	[N/mm²]	61,17
v2_B_b.1	[N/mm²]	61,17
v2_B_c.1	[N/mm²]	60,83

E – Modul

Der gemittelte E – Modul liegt für alle drei Dübelgeometrien bei

$E = 36598{,}59\ N/mm^2$

Mit diesen Materialkennwerten wurde der Beton der Betonfestigkeitsklasse C50/60 zugeordnet. Jene Materialkennwerte, welche nicht experimentell bestimmt werden konnten, wurden EC2 entnommen und sind in Tabelle 23 zusammengefaßt.

Tabelle 23: Materialkennwerte des Betons der zweiten Serie

ε_{c1}	[ ]	0,00245
$k_{6,7}$	[ ]	1,61
k_8	[ ]	1,62
ε_{cu1}	[ ]	0,0035

Anhang D – Beispiel eines *.inp – file

In einem ABAQUS Input File werden Definitionen von Parts, Loads, etc durch Keywords definiert. Keywords sind durch einen vorangestellten * gekennzeichnet.
Für eine bessere Übersichtlichkeit werden automatisch Kommentare eingefügt, welche durch zwei Sterne gekennzeichnet sind.
Da Parts durch die Angabe aller Koordinaten von Nodes und anschließend durch die Auflistung aller Elemente gekennzeichnet sind, wurde auf die Angabe dieser Auflistungen von Nodes und Elements verzichtet.

HEADING
Allgemeine Informationen

```
** Job name: d7td_36_0_ro Model name: Model-1
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
```

PARTS
Definition der Parts durch Angabe des Namens, der Nodes, des Elementtyps und gegebenfalls zusaätzliche Merkmale.

```
*Part, name=Anker
*End Part
**
*Part, name=Auflager
*End Part
**
*Part, name=Bügel1
*Node
*Element, type=T3D2
*Nset, nset=_PickedSet2, internal, generate
*Elset, elset=_PickedSet2, internal, generate
** Region: (Bewehrung D12:Picked)
*Elset, elset=_PickedSet2, internal, generate
** Section: Bewehrung D12
*Solid Section, elset=_PickedSet2, material="Bewehrung el-pl"
*End Part
**
*Part, name=Bügel2
*End Part
**
*Part, name=Bügel3
*Node
*Element, type=T3D2
*Nset, nset=_PickedSet2, internal, generate
*Elset, elset=_PickedSet2, internal, generate
** Region: (Bewehrung D10:Picked)
*Elset, elset=_PickedSet2, internal, generate
** Section: Bewehrung D10
*Solid Section, elset=_PickedSet2, material="Bewehrung el-pl"
*End Part
**
*Part, name=Bügel4
```

```
*Node
*Element, type=T3D2
*Nset, nset=_PickedSet2, internal, generate
*Elset, elset=_PickedSet2, internal, generate
** Region: (Bewehrung D8:Picked)
*Elset, elset=_PickedSet2, internal, generate
** Section: Bewehrung D8
*Solid Section, elset=_PickedSet2, material="Bewehrung el-pl"
*End Part
**
*Part, name=Betonblock2
*End Part
**
*Part, name=Dübelblech
*End Part
**
*Part, name=Part-4
*Node
*Element, type=C3D8R
*Nset, nset=_PickedSet2, internal, generate
*Elset, elset=_PickedSet2, internal, generate
** Region: (Beton CDP:Picked)
*Elset, elset=_PickedSet2, internal, generate
** Section: Beton CDP
*Solid Section, elset=_PickedSet2, material="Beton CDP"
*End Part
```

ASSEMBLY

Die gleichen Definitionen wie im Abschnitt Parts, allerdings mit dem Unterschied, dass sich die Koordinaten auf ein globales Koordinatensystem beziehen. In diesem Teil werden auch die Surfaces, Interactions und Randbedingungen definiert. Die Eigenschaften von Interactions und den Randbedingungen werden in einem anderen Teil definiert.

```
*Assembly, name=Assembly
**
*Instance, name=Bügel3-1, part=Bügel3
*End Instance
**
*Instance, name=Bügel3-2, part=Bügel3
*End Instance
**
*Instance, name=Bügel3-3, part=Bügel3
*End Instance
**
*Instance, name=Bügel2-1, part=Bügel2
*Node
*Element, type=T3D2
*Nset, nset=_PickedSet2, internal, generate
*Elset, elset=_PickedSet2, internal, generate
** Region: (Bewehrung D10:Picked)
*Elset, elset=_PickedSet2, internal, generate
** Section: Bewehrung D10
*Solid Section, elset=_PickedSet2, material="Bewehrung el-pl"
*End Instance
**
*Instance, name=Bügel2-2, part=Bügel2
*Node
```

```
*Element, type=T3D2
*Nset, nset=_PickedSet2, internal, generate
*Elset, elset=_PickedSet2, internal, generate
** Region: (Bewehrung D10:Picked)
*Elset, elset=_PickedSet2, internal, generate
** Section: Bewehrung D10
*Solid Section, elset=_PickedSet2, material="Bewehrung el-pl"
*End Instance
**
*Instance, name=Bügel2-3, part=Bügel2
*Node
*Element, type=T3D2
*Nset, nset=_PickedSet2, internal, generate
*Elset, elset=_PickedSet2, internal, generate
** Region: (Bewehrung D10:Picked)
*Elset, elset=_PickedSet2, internal, generate
** Section: Bewehrung D10
*Solid Section, elset=_PickedSet2, material="Bewehrung el-pl"
*End Instance
**
*Instance, name=Bügel1-1, part=Bügel1
*End Instance
**
*Instance, name=Bügel1-2, part=Bügel1
*End Instance
**
*Instance, name=Bügel1-3, part=Bügel1
*End Instance
**
*Instance, name=Bügel1-4, part=Bügel1
*End Instance
**
*Instance, name=Betonblock2-1, part=Betonblock2
*Node
*Element, type=C3D8R
*Nset, nset=_PickedSet2, internal, generate
*Elset, elset=_PickedSet2, internal, generate
** Region: (Beton CDP:Picked)
*Elset, elset=_PickedSet2, internal, generate
** Section: Beton CDP
*Solid Section, elset=_PickedSet2, material="Beton CDP"
*End Instance
**
*Instance, name=Anker-1, part=Anker
*Node
*Element, type=T3D2
*Nset, nset=_PickedSet2, internal
*Elset, elset=_PickedSet2, internal
** Region: (Ankerstange:Picked)
*Elset, elset=_PickedSet2, internal
** Section: Ankerstange
*Solid Section, elset=_PickedSet2, material="Ankerstange el"
*End Instance
**
*Instance, name=Anker-2, part=Anker
*Node
*Element, type=T3D2
*Nset, nset=_PickedSet2, internal
*Elset, elset=_PickedSet2, internal
** Region: (Ankerstange:Picked)
```

```
*Elset, elset=_PickedSet2, internal
** Section: Ankerstange
*Solid Section, elset=_PickedSet2, material="Ankerstange el"
*End Instance
**
*Instance, name=Bügel2-4, part=Bügel2
*Node
*Element, type=T3D2
*Nset, nset=_PickedSet2, internal, generate
*Elset, elset=_PickedSet2, internal, generate
** Region: (Bewehrung D10:Picked)
*Elset, elset=_PickedSet2, internal, generate
** Section: Bewehrung D10
*Solid Section, elset=_PickedSet2, material="Bewehrung el-pl"
*End Instance
**
*Instance, name=Part-1-1, part=Dübelblech
*Node
*Element, type=C3D8R
*Nset, nset=_PickedSet132, internal, generate
*Elset, elset=_PickedSet132, internal, generate
** Region: (Dübelblech:Picked)
*Elset, elset=_PickedSet132, internal, generate
** Section: Dübelblech
*Solid Section, elset=_PickedSet132, material=Dübel
*End Instance
**
*Instance, name=Part-4-2, part=Part-4
*End Instance
**
*Instance, name=Auflager-1, part=Auflager
*Node
*Element, type=C3D8R
*Nset, nset=_PickedSet2, internal, generate
*Elset, elset=_PickedSet2, internal, generate
** Region: (Beton CDP:Picked)
*Elset, elset=_PickedSet2, internal, generate
** Section: Beton CDP
*Solid Section, elset=_PickedSet2, material="Beton CDP"
*End Instance
**
*Nset, nset=Stahlunten, instance=Part-1-1
*Elset, elset=Stahlunten, instance=Part-1-1, generate
*Nset, nset=Symmetrieebene1, instance=Betonblock2-1
*Nset, nset=Symmetrieebene1, instance=Part-1-1
*Nset, nset=Symmetrieebene1, instance=Part-4-2
*Elset, elset=Symmetrieebene1, instance=Betonblock2-1, generate
*Elset, elset=Symmetrieebene1, instance=Part-1-1
*Elset, elset=Symmetrieebene1, instance=Part-4-2
*Nset, nset=Betonauflage, instance=Auflager-1, generate
*Nset, nset=AuflagerBody, instance=Betonblock2-1
*Elset, elset=AuflagerBody, instance=Betonblock2-1
*Nset, nset=AuflagerFest, instance=Auflager-1
*Elset, elset=AuflagerFest, instance=Auflager-1, generate
*Elset, elset=__PickedSurf79_S4, internal, instance=Betonblock2-1, generate
*Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf79, internal
__PickedSurf79_S4, S4
*Elset, elset=__PickedSurf81_S4, internal, instance=Betonblock2-1, generate
*Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf81, internal
__PickedSurf81_S4, S4
```

```
*Elset, elset=_Betonseitlich_S1, internal, instance=Part-4-2
*Surface, type=ELEMENT, name=Betonseitlich
_Betonseitlich_S1, S1
*Elset, elset=_Betonmaster_S5, internal, instance=Part-4-2
*Elset, elset=_Betonmaster_S2, internal, instance=Part-4-2
*Elset, elset=_Betonmaster_S4, internal, instance=Part-4-2
*Surface, type=ELEMENT, name=Betonmaster
_Betonmaster_S5, S5
_Betonmaster_S2, S2
_Betonmaster_S4, S4
*Elset, elset=_Betonstirn_S4, internal, instance=Part-4-2
*Elset, elset=_Betonstirn_S6, internal, instance=Part-4-2
*Elset, elset=_Betonstirn_S5, internal, instance=Part-4-2
*Surface, type=ELEMENT, name=Betonstirn
_Betonstirn_S4, S4
_Betonstirn_S6, S6
_Betonstirn_S5, S5
*Elset, elset=_Stahlseitlich_S2, internal, instance=Part-1-1
*Surface, type=ELEMENT, name=Stahlseitlich
_Stahlseitlich_S2, S2
*Elset, elset=_Stahlstirn_S4, internal, instance=Part-1-1
*Elset, elset=_Stahlstirn_S6, internal, instance=Part-1-1
*Elset, elset=_Stahlstirn_S5, internal, instance=Part-1-1
*Elset, elset=_Stahlstirn_S3, internal, instance=Part-1-1
*Surface, type=ELEMENT, name=Stahlstirn
_Stahlstirn_S4, S4
_Stahlstirn_S6, S6
_Stahlstirn_S5, S5
_Stahlstirn_S3, S3
*Elset, elset=_Auflagermaster_S5, internal, instance=Betonblock2-1
*Surface, type=ELEMENT, name=Auflagermaster
_Auflagermaster_S5, S5
*Elset, elset=_Auflagerslave_S3, internal, instance=Auflager-1, generate
*Surface, type=ELEMENT, name=Auflagerslave
_Auflagerslave_S3, S3
*Elset, elset=_Betonslave_S2, internal, instance=Betonblock2-1
*Surface, type=ELEMENT, name=Betonslave
_Betonslave_S2, S2

** Constraint: Anker1
*Coupling, constraint name=Anker1, ref node=_PickedSet80, surface=_PickedSurf79, influence radius=36.
*Kinematic
** Constraint: Anker2
*Coupling, constraint name=Anker2, ref node=_PickedSet82, surface=_PickedSurf81, influence radius=35.
*Kinematic
1, 1
2, 2
3, 3
** Constraint: Bewehrung
*Embedded Element
_PickedSet517
** Constraint: tie constraint
*Tie, name="tie constraint", adjust=yes, type=SURFACE TO SURFACE
Betonmaster, Betonslave
*End Assembly
```

AMPLITUDE

Bei der Anwendung von DYNAMIC, EXPLICIT wird hier die Amplitude definiert.

```
*Amplitude, name=Ramp
0., 0., 100., 1.
```

MATERIALS

Definition der Materialzuordnung und –eigenschaften.

```
*Material, name="Ankerstange el"
*Density
 7.8e-06,
*Elastic
210000., 0.3
*Material, name="Beton CDP"
*Density
 2.643e-06,
*Elastic
31000., 0.2
*Concrete Damaged Plasticity
 36.31,0.,0.,0.,0.
*Concrete Compression Hardening
  13.2,        0.
 20.14, 0.0003055
 24.62, 0.0005555
 28.09, 0.0008055
  30.6, 0.0010555
 32.41, 0.0013555
   33., 0.0016555
 32.75, 0.0018555
   32., 0.0020555
 30.41, 0.0023055
 28.12, 0.0025555
 25.17, 0.0028055
 21.57, 0.0030555
*Concrete Tension Stiffening, type=DISPLACEMENT
 2.97,   0.
 1.99, 0.03
 1.33, 0.06
 0.89, 0.09
  0.6, 0.11
  0.4, 0.13
 0.27, 0.16
 0.18, 0.18
 0.12,  0.2
 0.08, 0.22
 0.05, 0.24
*Concrete Tension Damage, type=DISPLACEMENT
    0.,   0.
 0.381, 0.03
 0.617, 0.06
 0.763, 0.09
 0.853, 0.11
  0.91, 0.13
 0.944, 0.16
 0.965, 0.18
 0.979,  0.2
 0.987, 0.22
 0.992, 0.24
```

```
*Material, name="Bewehrung el-pl"
*Density
 7.8e-06,
*Elastic
210000., 0.3
*Plastic
550.,0.
*Material, name=Dübel
*Density
 7.8e-06,
*Elastic
210000., 0.3
*Plastic
363.,0.
```

INTERACTION PROPERTIES

Eigenschaften von Interactions

```
*Surface Interaction, name=Reibungseitlich
*Friction
0.,
*Surface Behavior, pressure-overclosure=HARD
*Surface Interaction, name=Reibungstirn
*Friction
 0.3,
*Surface Behavior, pressure-overclosure=HARD
** ----------------------------------------------------------------
```

STEP

Definition und Eigenschaften des Berechnungsverfahrens.

```
*Step, name=Static
*Dynamic, Explicit
, 50.
*Bulk Viscosity
0.06, 1.2
```

BOUNDARY CONDITIONS

Eigenschaften der Randbedingungen.

```
** Name: Betonauflage Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Betonauflage, 1, 1
Betonauflage, 2, 2
Betonauflage, 3, 3
** Name: Stahlunten Type: Displacement/Rotation
*Boundary, amplitude=Ramp
Stahlunten, 1, 1, 25.
Stahlunten, 2, 2
** Name: YSYMM Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
_PickedSet83, YSYMM
** Name: ZSYMM1 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
Symmetrieebene1, ZSYMM
```

INTERACTIONS

Definition der Reibungsinteraktionen.

** Interaction: Auflager
*Contact Pair, interaction=Reibungstirn, mechanical constraint=KINEMATIC, cpset=Auflager
Auflagermaster, Auflagerslave
** Interaction: Kontaktseitlich
*Contact Pair, interaction=Reibungseitlich, mechanical constraint=KINEMATIC, cpset=Kontaktseitlich
Stahlseitlich, Betonseitlich
** Interaction: Kontaktstirn
*Contact Pair, interaction=Reibungstirn, mechanical constraint=KINEMATIC, cpset=Kontaktstirn
Stahlstirn, Betonstirn

OUTPUT REQUESTS

Festlegung der Outputs.

*Restart, write, number interval=1, time marks=NO
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, variable=PRESELECT, number interval=400
**
** HISTORY OUTPUT: Energy
**
*Output, history, frequency=400
*Energy Output
ALLIE, ALLKE
**
** HISTORY OUTPUT: Auflager
**
*Contact Output, cpset=Auflager
CFN, XN
**
** HISTORY OUTPUT: Kontrollpunkt
**
*Node Output, nset=Kontrollpunkt
U1,
*End Step