Schubdübel – Shear Lugs

Ein Modell zur Berechnung von Einbauteilen mit Schubdübeln

ANHANG

Zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
eingereichte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Harald Michler
geb. am 24.02.1964 in Tübingen

Gutachter:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Curbach
o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Dr. phil. Konrad Bergmeister
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell

Eingereicht am: 24.5.2006
Tag der mündlichen Prüfung: 15.12.2006
Dresden, 2007

Inhaltsverzeichnis Seite

A1 ABSCHLUSSBERICHT CU 37 3 1 ... 3

A2 ERGÄNZUNG DER DATENBASIS MIT ATENA ... 21

A3 MODELL LUG – DÜBEL ... 23

A3.1 GRUNDWERTE AM MODELL LUG – UNENDLICHSTEIFER ZUGANKER ... 23
A3.2 MODELL UND PARAMETER ... 23
A3.2.1 Einfluss der Modellierung ... 24
A3.3 ERGEBNISSE DER BERECHNUNG ... 26
A3.3.1 Bruchlasten vor dem Dübel ... 26
A3.3.2 Auswertung Kurventeil 1 ... 32
A3.3.3 Auswertung Kurventeil 2 ... 49
A3.3.4 Zusammenfassung und Vergleich – R*Lug Grundwert der Lastübertragung vor dem Dübel ... 59
A3.3.5 Grundwert des Lastangriffes vor dem Dübel ... 61
A3.3.6 Grundwert der Verschiebung vor dem Dübel ... 63
A3.3.7 Zusammenstellung der Grundwerte ... 64
A3.4 EINFLUSS DER ZUGANKERSTEIFIGKEIT ... 65
A3.4.1 Modell und Parameter ... 65
A3.4.1.1 Zugankersteifigkeit ... 66
A3.4.1.2 System und Belastung ... 66
A3.4.1.3 Lagerung ... 66
A3.4.1.4 Kohäsion ... 69
A3.4.1.5 Beton ... 70
A3.4.2 Exzentrizität – e ... 72
Auswertung A114 ... 73
A3.4.2.1 Auswertung A116 ... 76
A3.4.2.2 Auswertung A216 ... 79
Auswertung A236 ... 79
Auswertung A316 ... 80
A3.4.2.3 Auswertung A416 ... 81
A3.4.3 Exzentrizität der Last V mit Normalbeanspruchung ... 82
A3.4.3.1 Auswertung A136 ... 83
A3.4.3.2 Auswertung A236 ... 86
A3.5 NACHRECHNUNG DER FEM-VERSUCHE MIT ENDLICH STEIFEM ZUGANKER ... 89
A3.5.1 Ankerkraft, Querdruckkraft und neues RLug ... 90
A3.5.2 Auswertung der FEM-Versuche ... 91
A3.5.3 Ankerkraft im Zuganker ... 95
A3.5.4 Gleichgewichtskomponente $F_{Dübel}$ ... 97
A3.5.5 Querdruckkraft F vor dem Dübel ... 98
A3.5.6 Lastübertragung vor dem Dübel – R_{Lug} ... 99
A3.5.7 Erweiterung der Dübelverformung ... 104
A3.5.8 Erweiterung um ein rückseitiges Anliegen ... 104
A3.5.9 Verbesserung rückseitiges Anliegen und Verformung ... 107
A3.6 DOKUMENTATION VON "@NACHRECHNEN.XLS" ... 114
A3.7 DISKUSSION DER NACHRECHNUNG FEM-WERTE ... 116
A3.8 NACHRECHNUNG DER VERSUCHE ... 120

Inhaltsverzeichnis Seite

A3.9 ÜBERTRAGEN AUF DIE VERSUCHE – KALIBRIERUNG AN DEN VERSUCHEN. 122
A3.10 EIN RÜCKBLICK AUF DIE WERTE 122
A3.11 VERFORMUNGEN AM EINBAUTEIL - VERFORMUNGSBERECHNUNG 124

A4 MODELL BASE – STANZE 128

A4.1 GRUNDWERTE AM MODELL BASE – UNENDLICH STEIFER ZUGANKER..... 128
A4.1.1 Lagerung 129
A4.1.2 Auswertung Stanze horizontal..... 130
A4.2 HERLEITUNG DER FORMELN 131
A4.2.1 Last vor der Stirnseite – R*Base 131
A4.2.2 übertragbare Spannung vor der Stirn – σ*Base..... 137
A4.2.3 Vergleich R*Base und σ*Base 138
A4.2.4 Lastangriff vor der Stirn – e*Base 142
A4.2.5 Verschiebungen – v*Base 143
A4.2.6 Qualität der Nachrechnung 144
A4.3 EINFLUSS DER ZUGANKERSTEIFIGKEIT – STANZE MIT ANKER 150
A4.3.1 Modell und Parameter..... 150
A4.3.2 Zugankersteifigkeit..... 150
A4.3.3 Ergebnisse der Berechnung – Dokumentation der Berechnungen .. 150
A4.4 HERLEITUNG DER FORMELN 159
A4.4.1 übertragbare Last vor der Stirnseite – R_{Base} und Φ_{Grenz} 159
A4.4.2 übertragbare Spannung vor der Stirn – σ_{Base} 166
A4.4.3 Lastangriff vor der Stirn – e_{Base} –..... 166
A4.4.4 Verschiebungen – v^*_{Base} bzw u_x 168
A4.5 NACHRECHNUNG 178
A4.5.1 Grundwerte am unverformten System 181
A4.5.2 1ter Schritt am verformten System..... 183
A4.5.3 Verbesserungen am verformten System 184
A4.6 ERWEITERUNG DER NACHRECHNUNG 188
A4.6.1 Iterationshilfe - Festhalten Winkel Φ 188
A4.6.2 Grenzwinkel Φ nach Gleichung (1.4) 190
A4.6.3 Spannungsblock mit 0,8 und 0,9 191
A4.7 NACHRECHNUNG DER VERSUCHE – KALIBIRERUNG 192
A4.8 VERFORMUNGSBERECHNUNG 195

A5 ZUSAMMENFÜHREN DER MODELLE 197

A5.1 IDEE..... 197
A5.2 GRUNDMODELLE 197
A5.2.1 STANZE – Zusammenstellung Modell der Verschiebung..... 197
A5.2.2 DUEBEL – Zusammenstellung Modell der Verschiebung 198
A5.3 ÜBERLAGERUNG UND KOMBINATION 199
A5.4 VORGEHEN 200
A5.4.1 Überlagerung der Modelle 200
A5.4.2 Umsetzung..... 201
A5.4.3 Gültigkeit der Ergebnisse 205
A5.5 VERGLEICH MIT DEN VERSUCHSERGEBNISSEN..... 206

Inhaltsverzeichnis Seite

A5.5.1 Ohne Berücksichtigung der Ankerlast aus jeweils 2tem Traganteil .. 207
A5.5.2 Mit „exakter“ Berücksichtigung der Ankerkraft 208
A5.5.3 Darstellung aller Versuche nach 1 209
A5.5.4 Vergleich 210
A5.6 BETRACHTUNG ZU E^*_{LUG} 213
A5.7 WIEDERGABE DER TABELLENKÖPFE 218

Inhaltsverzeichnis Seite

HAUPTARBEIT:

1 EINFÜHRUNG

2 STAND DER FORSCHUNG

3 DAS VERSUCHSPROGRAMM

4 AUSWERTUNG DER VERSUCHE

5 BETRACHTUNG DER LASTÜBERTRAGUNG IN DEN BETON

6 ERGÄNZUNG DER DATENBASIS MIT FEM –ATENA

7 NACHRECHENMODELL FÜR SCHUBDÜBEL

8 BEMERKUNGEN ZUM SICHERHEITSKONZEPT

9 FAZIT ZUR TRAGWIRKUNG – AUSBLICK

10 VERZEICHNISSE

A1 ABSCHLUSSBERICHT CU 37 3 1

Die Auswertung der Versuche wurde bereits im Abschlussbericht CU 37 3-1 an die DFG veröffentlicht. In dieser Arbeit werden die Versuche auch ausführlich dokumentiert. Die PDF-Ausgabe des Abschlussberichtes über die DFG oder den Autor bezogen werden. Zur Orientierung werden an dieser Stelle die Inhaltsverzeichnisse und die Einleitung wiedergegeben:

Abschlussbericht an die Deutsche Forschungsgemeinschaft zum Forschungsvorhaben Cu 37/3-1 mit dem Titel:

Tragfähigkeit von Befestigungen mit Schubdübeln im Betonbau zur Übertragung großer Schubkräfte

Dresden, im April 2001

Im Teil 1 wird das Forschungsvorhaben beschrieben und ausgewertet. Eine erweiterte Auswertung findet sich in der vorliegenden Arbeit. Im Teil 2 werden dann die einzelnen Versuche mit den Messwerten und Bildaufnahmen dokumentiert. Die ZIP Dateien enthalten dann alle aufgenommenen Messwerte aufbereitet als Microsoft-Excel Arbeitsblätter. Die Abkürzung „G“ steht hier für Grundmessung und beinhaltet alle aufgenommenen Werte mit einem Ableseintervall von 1,0 Sekunden. In den Dateien „S“ für Schnellmessung sind einige spezielle Messpunkte für interessante Bereiche der Kurven mit einer Abtastrate von 0,001 Sekunden dokumentiert.

Dateien: Abschlussbericht Schubdübel.pdf

Anhang Abschlussbericht Schubdübel.pdf

Werte_G

Werte_S

Doku_GM

Doku_SM1

Doku_SM2

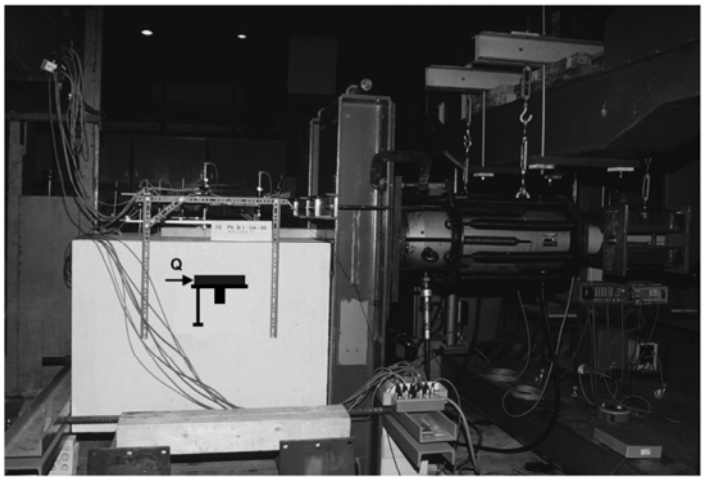
Doku_SM3

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Fakultät Bauingenieurwesen
Lehrstuhl für Massivbau

Abschlussbericht
an die Deutsche Forschungsgemeinschaft
zum Forschungsvorhaben Cu 37/3-1

Tragfähigkeit von Befestigungen mit Schubdübeln im Betonbau zur Übertragung großer Schubkräfte



Manfred Curbach
Christoph Körner
Harald Michler

Forschungsbericht

Deutsche Forschungsgemeinschaft

(DFG)

Förderkennzeichen:

Cu 37/3-1

Projekt:

Tragfähigkeit von Befestigungen mit Schubdübeln im Betonbau zur Übertragung großer Schubkräfte

Manfred Curbach

Christoph Körner

Harald Michler

Abschlussbericht

Dresden, im April 2001

Inhaltsverzeichnis Seite

Vorwort 1
1 Einleitung 3
2 Entwicklungsstand 11
2.1 Forschung 11
2.2 Richtlinien 13
2.3 Informationsbedarf zur Richtlinie 14
3 Aufgabenstellung des Forschungsvorhabens 15
4 Versuchsprogramm 17
4.1 Zielstellung 17
4.2 Versuchsdurchführung 27
4.2.1 Versuchswerkstoffe 27
4.2.2 Versuchskörper 28
4.2.3 Versuchsaufbau 32
4.2.4 Versuchsaufnahme und Auswertung 34
5 Bruchmechanismen – visuelle Auswertung 39
5.1 Schubtragfähigkeit 43
5.2 Bruchmechanismus 47
5.2.1 Grundfall a) Prüfkörper I/1 B2-I0-00 (Bild 22 und Bild 23) 50
5.2.2 Grundfall b) Prüfkörper I/1 B1-I4-00 (Bild 24 und Bild 25) 54
5.2.3 Grundfall c) Prüfkörper I/2 B1-U8-00 (Bild 26 und Bild 27) 58
5.2.4 Grundfall d) Prüfkörper II/3 HB 1-I8-00 (Bild 28 und Bild 29) 62
5.3 Lastausbreitung 67
6 Versuchsauswertung und Modell 75
6.1 Bekanntes Berechnungsmodell zum Nachweis der Schubtragfähigkeit 75
6.2 Lastabtragung im Modell 79
6.3 Darstellung der Versuchswerte 83
6.4 Betonversagen 87
6.4.1 Betonversagen vor der Grundplatte 89
6.4.2 Betonversagen vor dem Dübel – Gesamtversagen 99
6.5 Stahlversagen im Dübel 111
6.6 Ankerversagen 117
7 Bemessungskonzept 119
7.1 Herleitung der Nachweisführung 119
7.1.1 Versuche mit reiner Schubbeanspruchung 120
7.1.2 Versuche mit zusätzlicher Beanspruchung 125
7.2 Allgemeine Bemessungsgleichung 131
7.3 Bemessungsmodell 135
8 Zusammenfassung 141
9 Literatur und Verzeichnisse 143
10 Versuchsdokumentation 149

1 Einleitung

Befestigungssysteme zur Einleitung von Kräften in Betonbauteile sind integrale Bestandteile des modernen Betonbaus.

Die zunehmende Rationalisierung der Bauabläufe erfordert ein Umdenken in der baulichen Durchbildung von Gebäuden. Verbindungen werden zunehmend punktweise, also konzentriert ausgeführt, um den Fertigungsablauf so gering wie möglich zu behindern oder besser gesagt zu vereinfachen.
Ein bezeichnendes Beispiel hierfür ist der Anschluss einer Querwand an eine durchlaufende Längswand. Wurde dieser Eckbereich früher noch aufwendig mit über Eck gestoßenen Schalungselementen modelliert und beide Wände anschließend in einem Arbeitsgang monolithisch hergestellt, so wird heute die Längswand mit glattflächigen Schalungselementen durchlaufend hergestellt und in einem zweiten Arbeitsschritt die Querwand stumpf angeschlossen. Um dennoch Kräfte in der Fuge übertragen zu können, werden beim Herstellen der Längswand entsprechende Verbindungsmittel eingelegt, die aber die Schalung nicht verletzen oder durchdringen dürfen, um die rationelle Herstellung der Schalung zu garantieren und deren Wiederverwendung nicht zu behindern.

Weiter geht diese Entwicklung im Fertigteilbau. Betrachtet man die mögliche Lagerung eines im Werk gefertigten Wandelementes, so ist es verhältnismäßig einfach, dieses Element auf eine vorhandene Deckenplatte aufzusetzen. Zur Ausbildung dieser Lagerung ist es lediglich notwendig, das Element in ein vorbereitetes Mörtelbett zu setzen. Der erhärtete Mörtel kann dann die Vertikallasten aus dem Element sicher übertragen und auch die geringen Horizontalbeanspruchungen, wie sie zum Beispiel aus Windlasten entstehen, bereiten in dieser Fuge keine Schwierigkeiten. Gegen ein Umkippen wird das Element am oberen Rand eventuell punktförmig mit zugbeanspruchten Ankern an eine Stütze oder andere Wandelemente angeschlossen.

Findet dieses Wandelement nun kein vertikales Auflager, auf dem es stehen kann, so müssen auch die Vertikallasten zum Beispiel über diese Befestigungselemente übertragen werden. Die Dübel werden jetzt aber einer erheblich ungünstigeren Beanspruchungskombination ausgesetzt. Der Dübelbolzen wird nicht mehr allein auf Zug, sondern auch auf Querkraft und Biegung beansprucht, wobei vornehmlich die Übertragung der Querkraft auch Probleme im Ankergrund verursacht. Hier wird der umgebende Beton einer Lochleibungspressung ausgesetzt. Wegen der großen Festigkeitsunterschiede zwischen Beton und Stahl und insbesondere wegen der geringen Betonzugfestigkeit kann dies nicht als besonders materialgerechte Auslegung einer Verbindung zwischen Beton und Stahl bezeichnet werden. Es sei darauf hingewiesen, dass die Rundung des Ankerschaftes entfernt an einen Keil erinnert, der in den Beton getrieben wird.

Eine Möglichkeit, dieser ungünstigen Beanspruchung zu entgehen, besteht nun darin, das zu befestigende Teil gegen das Lagerelement zu spannen und die senkrecht zum Befestigungsmittel

wirkende Vertikalkraft nicht dem Befestigungsmittel, sondern der Lagerfuge in Form von Reibkraftübertragung zuzuweisen. Die jetzt zur Verfügung stehenden größeren Übertragungsflächen entschärfen das Problem. Eine gewisse Ebenheit der Oberflächen ist aber Voraussetzung für diese Lastübertragung.

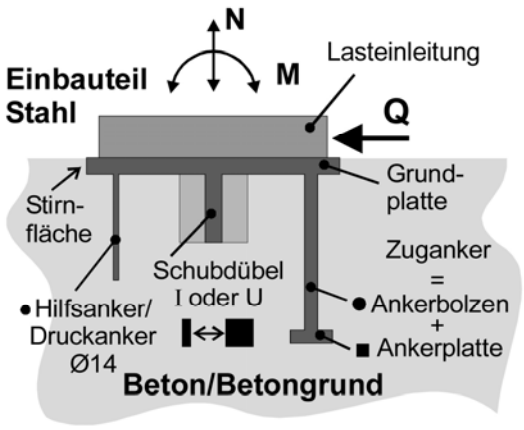
Eine weitere Möglichkeit, diese Befestigung auszubilden, besteht darin, die Beanspruchungen auf verschiedene Befestigungselemente aufzuteilen, die dann jeweils optimal genutzt werden. So wird also die normal zur Oberfläche gerichtete Zugkraft, z.B. aus Wind, wieder dem Anker zugewiesen. Die in Oberflächenrichtung abzutragende Vertikallast wird dem ebenfalls in die Betonoberfläche eingreifenden Schubdübel zugeordnet, der nun aber eine größere geometrische Ausdehnung, im Sinn einer größeren Lasteinleitungsfläche, zur Übertragung der oberflächenparallelen Last erhält und diese Last vor allem über eine ebene Kontaktfläche in den Beton überträgt. Diese günstigere Lasteinleitung erlaubt es nun, größere oberflächenparallele Lasten zu übertragen.

Im weiteren wird dieses Bauteil zur oberflächenparallelen Lasteintragung als Schubdübel bezeichnet. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Lastabtragung beziehungsweise der Tragfähigkeit dieser Befestigung mit Schubdübeln.

Die Befestigungstechnik, insbesondere die Anwendung von nachträglich gesetzten Dübeln und der Einbau von Verankerungselementen, hat in den letzten Jahren sowohl in der konstruktiven Entwicklung als auch in der Anwendung einen hohen Reifegrad erreicht. Damit waren Voraussetzung und Notwendigkeit zugleich gegeben, das Tragverhalten von Befestigungen systematisch zu analysieren und Berechnungsverfahren zum Nachweis der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit für grundlegende Anwendungsfälle bereitzustellen.

Diesem Anliegen dienen auch die in diesem Bericht beschriebenen Forschungsarbeiten zur experimentell-theoretischen Analyse des Tragverhaltens von Verankerungen, die zur Einleitung großer Schubkräfte mittels Schubdübel eingesetzt werden.

Die Auslegung der Einbauteile geschieht in Anlehnung an schon früher durchgeführte Versuche. Jedoch wird der übliche doppeltsymmetrische Aufbau zugunsten einer richtungsabhängigen Ausbildung aufgegeben. Die Spezialisierung der einzelnen Elemente kann hierdurch konsequenter umgesetzt werden. Im nebenstehenden Bild ist ein Längsschnitt durch ein Einbauteil schematisch dargestellt. Es ist einsichtlich, dass die so gestalteten Einbauteile nur in einer Richtung maßgebend durch die Schubkraft Q belastet werden dürfen. Konsequenterweise wird auch nur ein Zuganker zur Aufnahme des Ausgleichmomentes aus der exzentrischen Einleitung der Querkraft hinter



Schema Einbauteile

dem Dübel angeordnet. Vor dem Dübel kommt ein schwächerer Hilfsanker, auch Druckanker genannt, zum Einsatz. Die Einbauteile bestehen immer aus drei grundlegenden Elementen – Grundplatte, Dübel und Zuganker. Die Grundplatte, die oberflächenparallel zum Befestigungsgrund liegt, stellt hierbei die Verbindung zwischen Lasteinleitung und eigentlicher Verankerung dar. Sie bildet somit die Basis für alle Verbindungen und verteilt die Beanspruchung auf die eigentlichen Verankerungselemente. Der quaderförmige Schubdübel dient der Übertragung der Schubbeanspruchung. Der Ankerbolzen schließlich dient, wie gesagt, zur Aufnahme der Zugnormalkomponenten aus Versatzmoment und äußerer Normalkraftbeanspruchung. Drucknormalkomponenten hingegen werden direkt durch die Grundplatte auf den Beton übertragen und benötigen kein eigenes Lasteinleitungselement. Im Gegensatz zu den gebräuchlichen Ankerausbildungen, bei denen der hauptsächlich normal beanspruchte Bolzenschaft durch die Querbeanspruchung zusätzlich beansprucht wird, wird hier die Querbeanspruchung durch ein eigenes Bauteil, den Schubdübel, aufgenommen und befreit somit den Bolzenschaft von der ungünstigen Beanspruchungskombination Normalkraft mit Biegung. Durch die ebene, flächige Beschaffenheit des Schubdübels kann dieser die Beanspruchung höchst effektiv beziehungsweise materialgerecht in den Beton eintragen. Der runde Ankerbolzen hingegen würde in der auf Lochleibungsdruck beanspruchten Kontaktfläche zwischen Bolzenschaft und Beton eine höchst ungünstige lokale Spitzenbeanspruchung erzeugen. Auch setzt der Schubdübel der Querbeanspruchung einen größeren Widerstand gegen Abscheren entgegen, als dies der Kreisquerschnitt des Ankerbolzens kann.

Anwendungsgebiete für diese Befestigungen mit Schubdübeln lassen sich in der Verbindung von Betonfertigteilen untereinander, der Einbindung von Stahlbauteilen in Betonkonstruktionen und in der Verbindung von Betonkonstruktionen zur Erhöhung der Tragfähigkeit bei statischer oder dynamischer Beanspruchung, z.B. zur Erdbebenertüchtigung, sehen.

Im besonderen soll hier der Einsatz als Konsole zur Trägerlagerung erwähnt werden. Konsolen sollen als Auflager für größere Lasten dienen und diese in das lastableitende Bauteil einleiten. Die Einleitung der Last geschieht also exzentrisch, beziehungsweise die Last wird in ihrer Wirkungslinie versetzt. Die zu übertragende Last als Querkraft überwiegt als Hauptbeanspruchung die anderen Kraftkomponenten bei weitem. Denkbar sind Konstruktionen, die beim Herstellen bündig mit der Bauteiloberfläche abschließen und somit die Schalarbeiten nicht behindern, nach dem Ausschalen dann aber mittels stahlbautypischer Verbindungen ergänzt werden. Ebenfalls möglich sind bereits fertig montierte Einbauteile, die dann aber gewisser Kompromisse bei der Gestaltung der Schalung bedürfen. Diese Konsolen können aber nicht nur zur Auflagerung von Trägern verwendet werden. Möglich ist auch eine Ankerkonsole zur Einleitung von Vorspannkräften aus einer externen Spanngliedführung in neue oder zu verstärkende Betonbauteile, z.B. bei Brückenüberbauten oder Behältern.

Weitere Einsatzgebiete finden sich in der Fußeinbindung von Stahl- oder Verbundstützen in Betonplatten, wenn gleichzeitig große Querbeanspruchungen aus Rahmenwirkung oder angreifenden Diagonalausfachungen übertragen werden sollen. Im modernen Fertigteilbau werden die

aussteifenden Felder zunehmend als Störung der Konstruktion empfunden, und es wird versucht, diese aussteifenden Felder möglichst selten und damit konzentriert auszuführen. Hierbei treten dann aber entsprechend höhere Lasten in der Aussteifung auf, welche sicher übertragen werden müssen.

An dieser Stelle soll kurz in die nachfolgenden Kapitel eingeführt und deren Inhalt umrissen werden.

1. Entwicklungsstand

An der Technischen Universität Dresden wird mit Förderung durch die DFG eine Forschungsarbeit zur experimentell-theoretischen Analyse des Tragverhaltens von Verankerungen durchgeführt. Im Rahmen der Bearbeitung des CEB Bulletin d'Information Nr. 226 "Design of Fastenings in Concrete (Design Guide)" [3] werden hierbei Verankerungen untersucht, die zur hauptsächlich oberflächenparallelen Einleitung großer Schubkräfte ausgelegt sind. Vorangegangen sind experimentelle Arbeiten, die an der Bechtel Power Corporation in Ann Arbor, Michigan [4] und am vormaligen Institut für Stahlbeton Dresden [5] ausgeführt wurden. Letztere werden in diesem Vorhaben direkt fortgeführt.

2. Aufgabenstellung des Forschungsvorhabens

Im wesentlichen können drei Mechanismen zum Versagen dieser Einbauteile führen. Dies sind:

1) Versagen des Ankers:
   a) Stahlversagen auf Zug infolge einer Überschreitung der Ankerstahlzugtragfähigkeit
   b) Betonausbruch auf Zug infolge einer Überschreitung der Betonzugfestigkeit des Ankergrundes
2) Stahlversagen des Schubdübels mit Abscheren oder Abbiegen des Dübels
3) Betonversagen vor dem Dübel beziehungsweise der lastübertragenden Flächen.

Die Versuche sind so ausgelegt, dass das Betonversagen vor dem Dübel maßgebend wird. Dieser Aspekt soll auch hauptsächlich untersucht werden. Ein Versagen nach 1) und 2) ist nicht geplant, grenzt aber wichtige Randbedingungen zum Versagen nach 3) ein.

3. Versuchsprogramm

Die Versuche wurden am Otto-Mohr-Laboratorium der TU Dresden durchgeführt. Die Auslegung der Einbauteile geschieht in Anlehnung an schon früher durchgeführte Versuche. Das Layout der Einbauteile wird jedoch der Aufgabenstellung angepasst. Um die wesentlichen Versuchsparameter Betonfestigkeit, Dübelsteifigkeit, Dübeleinbindetiefe, Zugankertragfähigkeit und Einflusszone des Zugankers strukturiert zu untersuchen, werden die Versuche in 3 Gruppen unterteilt. Bei der ersten Gruppe werden die Betonfestigkeiten des Ankergrundes, die Dübelsteifigkeit und Einbindetiefe sowie die Länge der Zuganker variiert. Eine unterschiedliche Dübelsteifigkeit wird dabei durch zwei unterschiedliche Dübelkonstruktionen erreicht. Zum einen werden Flachblechdübel aus 2 cm starkem Stahlblech eingesetzt, die im weiteren als weiche Dübel bezeichnet werde. Zum anderen kommen starre Kastendübel aus 2 verschweißten U-Profilen zum Einsatz, deren Hohlraum mit ausbetoniert wird. Diese Dübel werden jeweils mit den Einbindetiefen 4 cm und 8 cm untersucht, womit die baupraktisch relevanten Dimensionen abgedeckt werden. Zum Vergleich werden in jeder Serie auch Einbauteile ohne Dübel, also nur die Grundplatte mit Zuganker und Druckanker geprüft. Die Ankerlänge der Zuganker wird mit 20 und 30 cm variiert. Hiermit wird der Einfluss der entstehenden Betonausbruchskörper des Zugankers auf die Lastübertragung vor dem Dübel untersucht. Bei der zweiten Gruppe wird dann die Betonfestigkeit konstant gehalten, und die Belastungskombination wird variiert. Hier kommen lediglich die weichen Flachblechdübel mit 4 und 8 cm Einbindetiefe zur Anwendung. Neben einer zusätzlichen Exzentrizität der Schubkraft Q wird eine konstante Zug- oder Drucknormalkraft aufgebracht. Die Ankereinbindetiefe wird hierbei konstant mit 30 cm gewählt. Bei der dritten Gruppe wird dann der Versuchskörper geändert und die Lage der Grundplatte wird zum Ersten in den Beton eingebunden und zum Zweiten auf diesem aufliegend gewählt. Hier werden ebenfalls 4 cm und 8 cm einbindende, weiche Flachblechdübel eingesetzt. Der massige, im Bereich des Ausbruchkegels unbewehrte und 120·120·90 cm messende Versuchskörper der ersten beiden Gruppen wird bei der letzten Gruppe durch einen schmalen, 45·45 cm messenden bewehrten Stützenquerschnitt ersetzt. Hiermit soll die Auswirkung einer randnahen Platzierung der Einbauteile und der Einfluss der Bewehrung untersucht werden.

Alle Versuche sind so ausgelegt, dass ein Versagen des Betons vor den lastübertragenden Flächen erwartet wird. Lediglich bei den hohen Betonfestigkeiten und den steifen Kastendübel kann ein Ausbrechen oder Reißen der Zuganker erwartet werden.

4. Versuchsauswertung

Das Verformungsverhalten der Einbauteile unter den verschiedenen Lasteinwirkungskombinationen und in Abhängigkeit der unterschiedlichen Einbauteilausbildung wird beschrieben und diskutiert. Hierbei werden die verschiedenen Parameter sowohl einzeln als auch in der praxisrelevanten Kombination betrachtet. Hauptsächlich anhand der Last-Verschiebungs-Diagramme wird die einbauteilinterne Umlagerung der Schubkraftübertragung von der summarischen Dübelfläche, bestehend aus der im Beton eingebunden Stirnplatte und der eigentliche Dübelfläche, auf die reine Dübelfläche gezeigt. Diese Unterscheidung ist vorzunehmen, da die Lastübertragung vor der eingebundenen Stirnplatte – bedingt durch die freie Bauteiloberfläche - lediglich einen 2-axialen Spannungszustand im Beton aufbauen kann. Dies ist durch die freie Betonoberfläche an der Bauteiloberseite bedingt. Vor dem eigentlichen Schubdübel hingegen kann sich ein dreiaxialer Spannungszustand aufbauen, womit wesentlich höhere Betondruckspannungen aufgenommen werden können.

5. Bruchmechanismen

Dieses Kapitel beschreibt die verschieden Bruchbilder der Befestigungen. Hier wird ein qualitativer Anschluss an die Vorläuferversuche hergestellt. Eine genaue Analyse der Tragmechanismen der Vorgängerversuche am Institut für Stahlbeton kann aufgrund der geringen Datenbasis nicht erfolgen, lediglich Bruchlasten sind von diesen Versuchen vorhanden. In diesem Zusammenhang wird auf die Arbeiten des zweitgenannten Verfassers hingewiesen ([7] und [11]), die hauptsächlich eine unteren Schranke der aufnehmbaren Dübellast ermitteln wollen. Daher wurden diese Versuche mit extrem geringfesten Betonen durchgeführt. Dies wurde erreicht, indem zum Beispiel der Wasserzementwert ungünstig gestaltet wurde. Leider wurden Auswirkungen auf andere Betonparameter hierbei nicht dokumentiert und fließen somit nicht in die Betrachtung ein.

6. Versuchsauswertung und Modellbildung

Ausgehend von den Modellen aus den Vorgängerarbeiten des zweitgenannten Verfassers werden die Versuchsdaten analysiert und die Bruchmechanismen beschrieben und gewertet. Hierbei wird den drei grundlegenden Versagensmechanismen das Hauptaugenmerk gezollt.

a. Betonversagen vor dem Dübel beziehungsweise der lastübertragenden Flächen
b. Stahlversagen des Dübels mit Abscheren oder Abbiegen des Dübels
c. Versagen des Zugankers:
   - Stahlversagen auf Zug infolge einer Überschreitung der Ankerstahlzugtragfähigkeit
   - Betonausbruch auf Zug infolge einer Überschreitung der Betonzugfestigkeit.

7. Bemessungskonzept

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein einfaches Bemessungsmodell vorgestellt, das auf einer linearen Regression der auf die Betondruckfestigkeit bezogenen Schubbruchlasten basiert. Das einfache Bemessungsmodell für die im Versuch untersuchten Einbauteile berücksichtigt die drei grundlegenden Versagensmechanismen einzeln.

Auch wenn die verschiedenen Versagensmechanismen nicht vollständig eigenständig betrachtet werden dürfen, ist es für die Nachweisführung hilfreich, dieses dennoch zu tun. Im Rahmen dieser einfachen und wohl auch überschlägigen Bemessung wird eine hinreichende Genauigkeit erzielt, wenn die Versagensmechanismen entkoppelt werden und auf eine Verformungsabschätzung vollständig verzichtet wird. Den Schlüssel zur rechnerischen Dimensionierung der Einbauteile bildet hierbei das Betonversagen vor dem Dübel beziehungsweise der lastübertragenden Flächen. Für diese grobe Bemessungsformel wird eine mittlere aufnehmbare Betondruckspannung vor dem Dübel angegeben, die Verformungen im Einbauteil selber wird nicht berücksichtigt. Diese Näherung wird das Bemessungsverfahren wesentlich vereinfachen, schränkt die Anwendung der Näherungsformeln aber auch ein. Die dargestellten Formeln zeigen eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen Versuch und Nachrechnung. Größere Abweichungen ergeben sich zwangsläufig bei größeren Verformungen der Einbauteile. Dies trifft für alle tief einbindenden Flachblechdübel zu und kann auf die Näherung durch das Modell zurückgeführt werden. Bedingt durch die größere Schiefstellung der Dübel stellt sich eine deutlich nicht rechteckförmige Spannungsverteilung vor diesen Dübeln ein.

Fazit

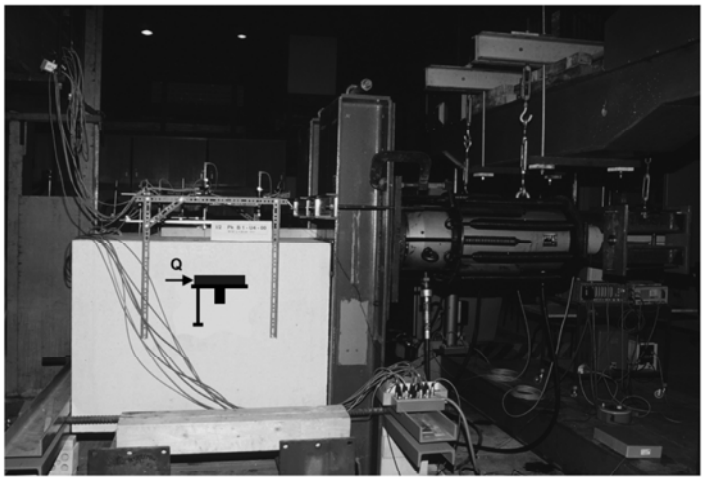
Der Vorteil der Schubdübelkonstruktionen liegt darin begründet, dass die Lastübertragung in den Beton einzelnen spezialisierten Konstruktionselementen zugewiesen wird. Während beim herkömmlichen stabförmigen Dübel vornehmlich eine axiale Zugkraft in den Ankergrund eingeleitet wird, werden diese zugbeanspruchten Ankerbolzen noch zusätzlich durch eine Querkraft beansprucht. Somit wird das Ankerbolzenmaterial einer ungünstigeren Beanspruchung unterworfen. Die bisherige Normalbeanspruchung durch Zug wird mit einer Schubbeanspruchung kombiniert, für die die zulässigen Spannungen erheblich geringer anzusetzen sind. Noch ungünstiger sieht es für den Beton des Ankergrundes aus. Stellt die Lasteinleitung über Verbund noch eine verhältnismäßig gleichmäßige und verteilte Lasteinleitung dar, so ist dies bei einer kombinierten Normalkraft-Querkraftbeanspruchung bei weitem nicht mehr der Fall. Aufgrund der Biegelinie im Ankerbolzen liegt dieser am oberen Bohrlochrand an und erzeugt hier lokale Beanspruchungen mit den zugehörenden Spannungsspitzen. Erst ein Nachgeben des Ankergrundes an dieser hochbelasteten Stelle kann größere Bereiche an der Lastabtragung beteiligen oder über ein reißverschlussartiges Versagen zum Gesamtversagen der Konstruktion führen. Aufgrund der geringen Zugfestigkeit ist Beton kein idealer Baustoff für diese örtliche Art der Beanspruchung, die eine Kombination aus Lochleibungspressung und Biegebeanspruchung darstellt. Daher liegt der Gedanke nahe, diese Übertragung der Lastanteile Normalkraft und Querkraft zu trennen. Der herkömmliche Dübel, zum Beispiel in der Ausbildung als Kopfbolzendübel, stellt eine ideale Konstruktion zur Einleitung einer Normalkraft in den tiefen Ankergrund dar. Die Querkraft wird dann einem flächigen Bauteil, dem Schubdübel, zugewiesen und materialgerecht in den Betongrund eingeleitet.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Fakultät Bauingenieurwesen
Lehrstuhl für Massivbau

Abschlussbericht
an die Deutsche Forschungsgemeinschaft
zum Forschungsvorhaben Cu 37/3-1

Tragfähigkeit von Befestigungen mit Schubdübeln im Betonbau zur Übertragung großer Schubkräfte



Manfred Curbach
Christoph Körner
Harald Michler

Forschungsbericht Anhang

Deutsche Forschungsgemeinschaft

(DFG)

Förderkennzeichen:

Cu 37/3-1

Projekt:

Tragfähigkeit von Befestigungen mit Schubdübeln im Betonbau zur Übertragung großer Schubkräfte

Manfred Curbach

Christoph Körner

Harald Michler

Abschlussbericht - Anhang

Dresden, im April 2001

/erzeichnis der Versuche:

Nr.	Versuch	Seite
1.1	I/1 B1-I0-00	1
1.2	I/1 B2-I0-00	9
2.1	I/1 B1-I4-00	17
2.2	I/1 B2-I4-00	25
3.1	I/1 B1-I8-00	33
3.2	I/1 B2-I8-00	41
4.1	I/2 B1-U0-00	49
4.2	I/2 B2-U0-00	57
5.1	I/2 B1-U4-00	65
5.2	I/2 B2-U4-00	73
6.1	I/2 B1-U8-00	81
6.2	I/2 B2-U8-00	89
7.1	II/3 HB1-I4-00(P)	97
7.2	II/3 HB2-I4-00(P)	105
8.1	II/3 HB1-I4-00	113
8.2	II/3 HB2-I4-00	121
9.1	II/3 HB1-I8-00	131
9.2	II/3 HB2-I8-00	139
10.1	II/4 HB1-U0-00	147
10.2	II/4 HB2-U0-00	155
11.1	II/4 HB1-U4-00	163
11.2	II/4 HB2-U4-00	171
12.1	II/4 HB1-U8-00	179
12.2	II/4 HB2-U8-00	187
13.1	III/5 B1-I0-00	195
13.2	III/5 B2-I0-00	205
14.1	III/5 B1-I4-00	213
14.2	III/5 B2-I4-00	223
15.1	III/5 B1-I8-00	233
15.2	III/5 B2-I8-00	243
16.1	III/6 B1-U0-00	253
16.2	III/6 B2-U0-00	263
17.1	III/6 B1-U4-00	275
17.2	III/6 B2-U4-00	285

Nr.	Versuch	Seite
18.1	III/6 B1-U8-00	295
18.2	III/6 B2-U8-00	305
19.1	IV/7 B1-I4-Z0	315
19.2	IV/7 B2-I4-Z0	327
20.1	IV/7 B1-I4-00	337
20.2	IV/7 B2-I4-00	347
21.1	IV/7 B1-I4-D0	357
21.2	IV/7 B2-I4-D0	367
22.1	IV/8 B1-I4-ZE	377
22.2	IV/8 B2-I4-ZE	387
23.1	IV/8 B1-I4-0E	397
23.2	IV/8 B2-I4-0E	407
24.1	IV/8 B1-I4-DE	417
24.2	IV/8 B2-I4-DE	427
25.1	V/9 B1-I8-Z0	437
25.2	V/9 B2-I8-Z0	449
26.1	V/9 B1-I8-00	457
26.2	V/9 B2-I8-00	467
27.1	V/9 B1-I8-D0	477
27.2	V/9 B2-I8-D0	489
28.1	V/10 B1-I8-ZE	499
28.2	V/10 B2-I8-ZE	515
29.1	V/10 B1-I8-0E	523
29.2	V/10 B2-I8-0E	535
30.1	V/10 B1-I8-DE	551
30.2	V/10 B2-I8-DE	563
31.1	VI/11 B1-I4-MG	577
31.2	VI/11 B2-I4-MG	587
31.3	VI/11 B1-I4-MG	597
31.4	VI/11 B2-I4-MG	607
31.5	VI/11 B1-I8-OG	619
31.6	VI/11 B2-I8-OG	629
31.7	VI/11 B1-I8-OG	639
31.8	VI/11 B2-I8-OG	649

:usammenstellung der Versuche

dent.	Ver-suchs-Reihe	Serie Herst.-Datum	Prüfkörper-bezeichnung	Beton festigkeit	Schub-dübel Stahlgüte	Zug-anker-länge [cm]	DMS Beton	DMS Höhe Umfang	Prüfdatum	Beton-alter [d]	Betonkennwerte Würfeldruckfestigkeit $\beta_{D,ist}$ [N/mm²]	$f_c = f_{c,cyl\,ist}$ [N/mm²]	$f_{ck,cyl\,200}$ [N/mm²]	Spaltzugfestigkeit β_{SZ} [N/mm²]	E-Modul [N/mm²]	Buchlast [KN] Beton	Buchlast [KN] Absolut
1,1		1	B1-I0-00	**B25**	St 52	20			7. Aug 97	28	41,2	30,9	26,0	2,5	33744		350
1,2			B2-I0-00	130171	St 52	30			12. Aug 97	33	42,9	32,2	27,2	2,5	33744	355	455
2,1		10.07.97	B1-I4-00		St 52	20		2/1	18. Aug 97	39	45,0	33,7	28,7	2,5	33744		600
2,2			B2-I4-00		St 52	30		2/1	21. Aug 97	42	46,0	34,5	29,4	2,5	33744		625
3,1			B1-I8-00		St 52	20			26. Aug 97	47	47,7	35,8	30,6	2,5	33744		650
3,2	I		B2-I8-00		St 52	30			28. Aug 97	49	48,3	36,3	31,1	2,5	33744	665	727
4,1		2	B1-U0-00	**B25**	St 52	20			25. Sep 97	20	42,9	32,2	27,2	2,5	31164	280	405
4,2			B2-U0-00	130171	St 52	30			30. Sep 97	25	44,0	33,0	27,9	2,5	31206	350	450
5,1		05.09.97	B1-U4-00	bestellt	St 52	20		2/4	2. Okt 97	27	44,4	33,3	28,2	2,5	31223		527
5,2			B2-U4-00	war	St 52	30		2/4	9. Okt 97	34	45,9	34,4	29,3	2,5	31282		610
6,1			B1-U8-00	130121	St 52	20			6. Okt 97	31	45,2	33,9	28,9	2,5	31256		750
6,2			B2-U8-00		St 52	30			20. Okt 97	45	48,2	36,1	31,0	2,5	31374		750
7,1		3	HB1-I4-00(P)	**B45**	St 52	20			11. Nov 97	32	67,1	50,3	44,6	3,6	34320		851
7,2			HB2-I4-00(P)	130212	St 52	30			14. Nov 97	35	67,1	50,3	44,7	3,6	34320		900
8,1		10.10.97	HB1-I4-00		St 52	20		2/4	18. Nov 97	39	67,1	50,3	44,7	3,6	34320		825
8,2			HB2-I4-00		St 52	30		2/4	25. Nov 97	46	67,2	50,4	44,7	3,7	34320		875
9,1			HB1-I8-00		St 52	20			3. Dez 97	54	67,2	50,4	44,7	3,8	34320		875
9,2	II		HB2-I8-00		St 52	30			5. Dez 97	56	67,2	50,4	44,7	3,8	34320		900
10,1		4	HB1-U0-00	**B45**	St 52	20	5		9. Jan 98	58	65,7	49,3	43,6	3,8	34320		463
10,2			HB2-U0-00	130212	St 52	30	5		27. Jan 98	76	67,5	50,6	44,9	3,9	34320	475	515
11,1		12.11.97	HB1-U4-00		St 52	20	5	2/4	2. Feb 98	82	68,1	51,1	45,4	3,9	34320		925
11,2			HB2-U4-00		St 52	30	5	2/4	4. Feb 98	84	68,3	51,2	45,5	4,0	34320		941
12,1			HB1-U8-00		St 52	20	5		6. Feb 98	86	68,5	51,4	45,7	4,0	34320		1040
12,2			HB2-U8-00		St 52	30			11. Feb 98	91	69,0	51,8	46,0	4,0	34320		750
13,1		5	B1-I0-00	**B25**	St 52	20	5	2/4	18. Feb 98	42	39,7	29,8	24,9	2,8	27095	200	317
13,2			B2-I0-00	130121	St 52	30	5	2/4	11. Mrz 98	63	40,2	30,1	25,2	2,9	27095		406
14,1		07.01.98	B1-I4-00		St 52	20	5	2/4	9. Mrz 98	61	40,1	30,1	25,2	2,9	27095		536
14,2		Frost?	B2-I4-00		St 52	30	5	1/4	26. Mrz 98	78	40,5	30,3	25,4	3,0	27095		595
15,1			B1-I8-00		St 52	20	5	1/4	18. Mrz 98	70	40,3	30,2	25,3	2,9	27095		648
15,2	III		B2-I8-00		St 52	30	5	1/4	2. Apr 98	85	40,6	30,5	25,5	3,0	27095		717
16,1		6	B1-I0-00	**B15**	St 52	20	5	2/3	9. Apr 98	35	27,5	20,6	16,1	2,1	23000	165	325
16,2			B2-I0-00	130111	St 52	30	5	1/3	20. Apr 98	46	31,3	23,5	18,8	2,3	23000	198	350
17,1		05.03.98	B1-I4-00		St 52	20	5	2/3	16. Apr 98	42	29,9	22,4	17,8	2,2	23000	347	358
17,2			B2-I4-00		St 52	30	2	2/3	24. Apr 98	50	32,7	24,5	19,8	2,3	23000		498
18,1			B1-I8-00		St 52	20	5	1/3	22. Apr 98	48	32,0	24,0	19,3	2,3	23000	504	523
18,2			B2-I8-00		St 52	30	5		28. Apr 98	54	34,0	25,5	20,8	2,4	23000		635
19,1		7	B1-I4-Z0	**B25**	St 37	30	5	1/3	5. Mai 98	27	38,3	28,7	23,8	2,7	31566	400	431
19,2			B2-I4-Z0	130121	St 52	30	5	1/3	19. Mai 98	41	38,3	28,7	23,9	2,7	31630		377
20,1		08.04.98	B1-I4-00		St 37	30	5	Bewehr.	8. Mai 98	30	38,3	28,7	23,8	2,7	31579		511
20,2			B2-I4-00		St 52	30	5	Bewehr.	5. Jun 98	58	38,4	28,8	23,9	2,7	31707		551
21,1			B1-I4-D0		St 37	30	5		11. Jun 98	64	38,4	28,8	23,9	2,7	31735		724
21,2	IV		B2-I4-D0		St 52	30	5		19. Jun 98	72	38,4	28,8	23,9	2,7	31771		678
22,1		8	B1-I4-ZE	**B25**	St 37	30	5	1/3	8. Jul 98	55	40,7	30,5	25,6	2,7	33657		351
22,2			B2-I4-ZE	130121	St 52	30	5	1/3	14. Jul 98	61	40,7	30,5	25,6	2,7	33684		327
23,1		14.05.98	B1-I4-0E		St 37	30	5		6. Jul 98	53	40,7	30,5	25,6	2,7	33647		447
23,2			B2-I4-0E		St 52	30	5		10. Jul 98	57	40,7	30,5	25,6	2,7	33666		470
24,1			B1-I4-DE		St 37	30	5		16. Jun 98	33	40,6	30,5	25,5	2,7	33556		511
24,2			B2-I4-DE		St 52	30	5		2. Jul 98	49	40,7	30,5	25,6	2,7	33629		515
25,1		9	B1-I8-Z0	**B25**	St 37	30	5	1/3	19. Aug 98	63	39,9	30,0	25,0	2,7	31730		504
25,2			B2-I8-Z0	130121	St 52	30	5	1/3	27. Aug 98	71	40,8	30,6	25,7	2,7	31767		548
26,1		17.06.98	B1-I8-00		St 37	30	5		24. Aug 98	68	40,5	30,4	25,4	2,7	31753		651
26,2			B2-I8-00		St 52	30	5		1. Sep 98	76	41,4	31,0	26,1	2,7	31790		686
27,1			B1-I8-D0		St 37	30	5		3. Sep 98	78	41,6	31,2	26,2	2,7	31799		771
27,2	V		B2-I8-D0		St 52	30	5		15. Sep 98	90	42,9	32,2	27,1	2,7	31854		750
28,1		10	B1-I8-ZE	**B25**	St 37	30	5	1/3	12. Okt 98	58	37,8	28,4	23,5	2,7	32833		378
28,2			B2-I8-ZE	130121	St 52	30	5	1/3	16. Okt 98	62	37,8	28,4	23,5	2,7	32852		375
29,1		15.08.98	B1-I8-0E		St 37	30	5		22. Sep 98	38	37,8	28,3	23,5	2,7	32742		471
29,2			B2-I8-0E		St 52	30	5		24. Sep 98	40	37,8	28,3	23,5	2,7	32751		436
30,1			B1-I8-DE		St 37	30	5		29. Sep 98	45	37,8	28,3	23,5	2,7	32774		565
30,2			B2-I8-DE		St 52	30	5		2. Okt 98	48	37,8	28,4	23,5	2,7	32788		557
31,1			B1-I4-MG	**B25**	St 52	30	X		10. Mrz 99	132	46,3	34,7	29,6	2,6	31845		572,8
31,2			B2-I4-MG		St 52	30	X		16. Mrz 99	138	46,3	34,7	29,6	2,6	31873		601,7
31,3		29.10.98	B1-I8-MG		St 52	30	X		17. Mrz 99	139	46,3	34,7	29,6	2,6	31877		716,4
31,4	VI	11	B2-I8-MG	**B25**	St 52	30	X		18. Mrz 99	140	46,3	34,7	29,6	2,6	31882		700,6
31,5			B1-I4-OG	130121	St 52	30	X		8. Apr 99	161	46,3	34,8	29,7	2,6	31978		524,9
31,6			B2-I4-OG		St 52	30	X		12. Apr 99	165	46,4	34,8	29,7	2,6	31996		549,5
31,7			B1-I8-OG		St 52	30	X		9. Apr 99	162	46,3	34,8	29,7	2,6	31982		625,7
31,8			B2-I8-OG		St 52	30	X		13. Apr 99	166	46,4	34,8	29,7	2,6	32001		650,6

A2 ERGÄNZUNG DER DATENBASIS MIT ATENA

An dieser Stelle soll die Herleitung des Rechenverfahrens zur Nachrechnung der Versuche und Dimensionierung von Einbauteilen mit Schubdübel näher erörtert werden. Einen kurzen Überblick zur Herleitung gibt bereits das Kapitel 6. Hier sollen die Hintergründe näher erörtert werden und die zugrunde liegenden Daten dokumentiert werden.

Die Entwicklung basiert auf 2 Annahmen:

- Rechentechnisch wird sie ermöglicht, indem das FE-Modell vom 3dimensionalen in den 2dimensionalen Raum transferiert wird, eigentlich 2½D. Hier werden die Gleichungen entwickelt und anschließend über einen 3D-Faktor wieder in den 3dimensionalen Raum zurück übertragen.
- Das Modell wird einfacher überblickbar, wenn das Einbauteil in die unterschiedlichen Lastübertragungsmechanismen aufgespalten wird. Weiterhin werden diese Teilsysteme auf „unverformte" Grundsysteme reduziert, und anschließend eine verformungsabhänige Korrektur der Grundsysteme durchgeführt. Im letzten Schritt werden die Teilsysteme dann wieder zum Gesamtsystem zusammengeführt.

Um die Einflüsse der einzelnen Modellparameter besser untersuchen, bzw. voneinander abgrenzen zu können, ist es notwendig die vorhandene Basis aus Versuchswerten zu ergänzen. Erforderlich sind Versuche mit eigentlich extrem aufwendig zu realisierenden Parametern, wie zum Beispiel einer unendlich großen Zugankerdehnsteifigkeit. Diese extremen Parameter sollen sozusagen Nullversuche liefern, bei denen ein bestimmter Einfluss, zum Beispiel die Zugankersteifigkeit ausgeschaltet ist, um die restlichen Parameter ungestört beobachten zu können, und deren Gesetzmäßigkeit feststellen zu können.

Mit dieser Basis können neuen Versuchswerte mit der FEM erzeugt werden. Die Erzeugung und die Auswertung werden in dem folgenden Kapitel zusammen behandelt:

- Kapitel A3: Modell Lug – Dübel
- Kapitel A4: Modell BASE – Stanze / Stirnseite
- Kapitel A5: Zusammenführen der Modelle

A3 MODELL LUG – DÜBEL

A3.1 GRUNDWERTE AM MODELL LUG – UNENDLICHSTEIFER ZUGANKER

Simuliert wird ein unendlich steifer Zuganker, somit wird keine Verdrehung der Grundplatte zugelassen, die Grundplatte wird horizontal geführt. Aus diesem Grund wird diese Berechnung auch unter dem Namen „horizontal“ gelistet.

A3.2 MODELL UND PARAMETER

Siehe Hauptteil.

Hauptparameter:

- Dübeleinbindetiefe h mit 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100 und 150 mm
- Dübelbiegesteifigkeit über Stärke t mit 20, 40 60 und 80 mm
- Betonfestigkeit f_c mit 28, 38 und 48 N/mm²

Zur Auswertung wurden diese Parameter wie in Tabelle 1 dargestellt zu einzelnen Berechnungen verknüpft.

Dübel	**t = 20 mm**			**t = 40 mm**			**t = 60 mm**			**t = 80 mm**		
f_c [N/mm²]	**28**	**38**	**48**	**28**	**38**	**48**	**28**	**38**	**48**	**28**	**38**	**48**
h = 10 mm	111	121	131	211	221	231	311	321	331	411	421	431
h = 20 mm	112	122	132	212	222	232	312	322	332	412	422	432
h = 30 mm	113	123	133	213	223	233	313	323	333	413	423	433
h = 40 mm	114	124	134	214	224	234	314	324	334	414	424	434
h = 60 mm	115	125	135	215	225	235	315	325	335	415	425	435
h = 80 mm	116	126	136	216	226	236	316	326	336	416	426	436
h = 100mm	117	127	137	217	227	237	317	327	337	417	427	437
h = 150mm	118	128	138	218	228	238	318	328	338	418	428	438

Tabelle 1: Benennung der Rechnungen, Modell „LUG“

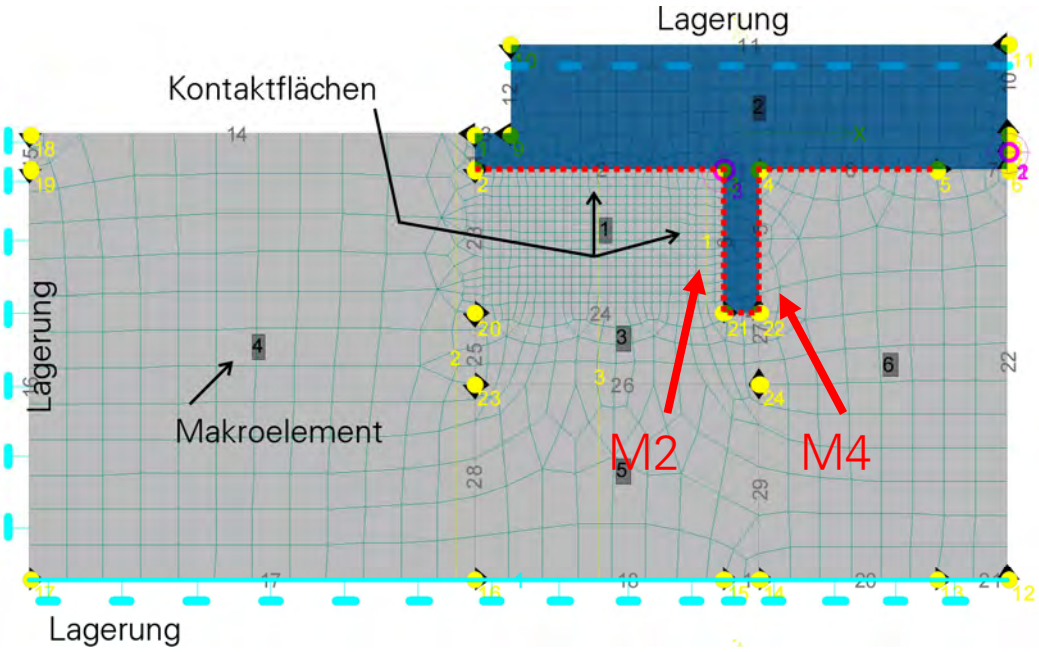


Abbildung 1 System, Geometrie und Lagerung

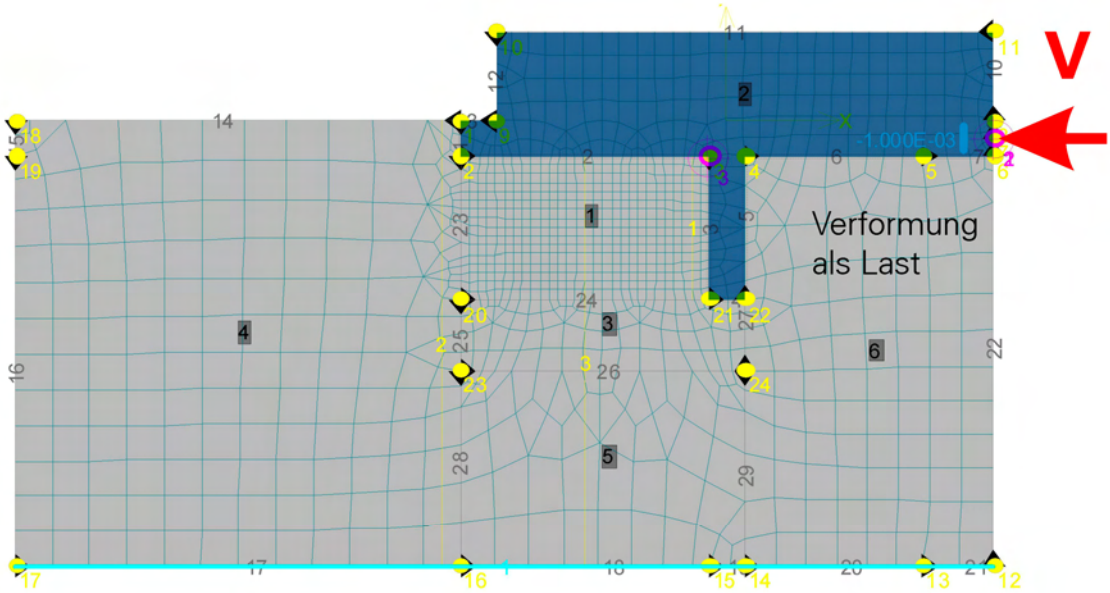


Abbildung 2 System, Geometrie und Belastung

A3.2.1 EINFLUSS DER MODELLIERUNG

Hier soll die Frage erörtert werden, inwieweit der Faktor der „Breite" also der Tiefe in der 2D Modellierung Einfluss auf das Ergebnis nimmt, beziehungsweise wie sich dieser Einfluss auswirkt. Es soll untersucht werden, wie sich ATENA hier verhält.

Generell ist die 3te Richtung bei dem gewählten Modell frei. Somit wird auch keine Spannung in dieser Richtung indiziert, es gilt $\sigma_3 = 0$. Die Auswirkungen dieser Tatsache auf die Berechnung werden im Abschnitt „Anwendung 2D" erörtert.

An dieser Stelle ist lediglich die „Tiefe“ des Systems als geometrischer Wert von Bedeutung. Im Weiteren wird diese Ausdehnung in die „Tiefe“ als „Breite“ bezeichnet, da eigentlich die Breite des Schubdübels gemeint ist, bzw. untersucht wird. Konkret geht es um die breite des Dübels und die anzusetzende Biegesteifigkeit im Dübel.

Die generelle Modellierung der Einbauteile unterstellt einen 20 cm breiten Versuchskörper. Der Dübel wird ebenfalls mit 20 cm Breite modelliert, da dieser in einem Stück mit der Grundplatte und dem Versteifungsblock generiert wird. Die Kontaktfläche zwischen Dübel und Beton hat hingegen lediglich eine Breite von 8 cm. Dieses Grundmodell „115“ wird dann variiert, wie in der Tabelle 2 angegeben. Die allgemeinen Modellparameter für alle Modelle sind:

- f_c = 28 N/mm²
- $t_{Dübel}$ = 20 mm
- $h_{Dübel}$ = 60 mm

	Beschreibung
115	Grundmodell
115_8	b = 8 cm im Beton und im Stahl und in der Kontaktfläche
115_8b	Der Dübel wird mit b = 8 cm abgebildet
115_8c	Dübel mit b = 8 cm aber Kontaktfläche ist b = 20 cm, eigentlich widersinnig
115_20	auch die Kontaktfläche wird mit b = 20 cm abgebildet
115_10	alles mit 10 cm wie Anker

Tabelle 2 Variationen im Modell 115

Das Grundsystem „115“ liefert eine Bruchlast von 281,1 kN, diese wird auch erreicht, wenn die Kontaktfläche mit 20 cm modelliert wird. Begründung hierfür ist, dass die Kontaktfläche nicht maßgebend wird, sondern der Beton. Das Modell mit b = 8 cm (115_8) liefert den gleichen Wert der Bruchlast, wenn man ihn um die Systembreite korrigiert. Das System mit b = 8 cm im Dübel (115_8b) bestätigt diesen Wert siehe Tabelle 3.

	F_x [kN]	u_x [mm]	u_{xB} [mm]	σ_{oben}	σ_{max} [N/mm²]
115	281,1	0,3800	0,3410	-20,99	-31,83
115_8	112,5	0,3800	0,3411	-21,00	-31,93
115_8b	112,5	0,3800	0,3411	-19,05	-31,29
115_8c	216,3	0,3400	0,3107	-22,98	-32,13
115_20	281,1	0,3800	0,3411	-21,01	-31,96
115_10 19	140,5	0,3800	0,3411	-21,01	-31,96
	112,5 kN / 8 cm · 20 cm = 281,25 kN				

Tabelle 3 Ergebnisse Modell 115x

Wie erwartet hat die „Breite“ in einer 2D Untersuchung keinen Einfluss auf das Ergebnis. Die Biegesteifigkeiten werden mit einer Einheitsbreite ermittelt, daraus ergeben sich Dehnungen, die über die Querschnittsbreite konstant sind, und die wiederum in Spannungen umgesetzt werden. Erst bei der Ermittlung der Lasten kommt die „Breite“ als multiplikativer Faktur wieder ins Spiel.

Solange in der Berechnung keine Kräfte benötigt werden ist die „Breite“ im Modell unbedeutend. Die „Breite“ geht nicht in die Ermittlung der Steifigkeiten und im Besonderen in die Ermittlung der Beigesteifigkeit ein.

Im speziellen Fall kommt die im Modell übertragenen Kraft - als Absolutwert - in Form der Kontaktkraft in der Kontaktfuge Beton/Dübel zum wirken. Im Modell 115_8c wird die Kontaktkraft für eine 20 cm breite Fuge auf den nur 8 cm breiten Dübel aufgebracht, womit hier dann Stahlversagen im Dübel eintritt. Der Stahl beginnt in der Anschlussfuge Grundplatte/Dübel zu fließen.

Als Fazit kann vermerkt werden, die Steifigkeit des Dübels ist als Einheitssteifigkeit einzuführen. Es gilt:

$$I'_{Dübel} = I_{Dübel} / b$$

mit (3.1)

$$I_{Dübel} = \frac{b \cdot t^3_{Dübel}}{12} \text{ für einen Rechteckdübel}$$

A3.3 ERGEBNISSE DER BERECHNUNG

A3.3.1 BRUCHLASTEN VOR DEM DÜBEL

In den folgenden Tabellen sind die Ergebnisse der Berechnung am horizontal geführtem System zusammengefasst und grafisch aufbereitet. Diese Daten sind Datenbasis für die Ermittlung der Grundwerte am System LUG.

Stellt man alle Ergebnisse nach der erreichten Bruchlast $V_{Dübel}$ dar, so ergeben sich Kurven wie in Abbildung 3 dargestellt. Aufgetragen über die Dübeleinbindetiefe h_D zeigt sich deutlich eine bilineare Verteilung/Anordnung der Werte der Bruchlasten. Bis zu einer “Grenzeinbindetiefe“ nimmt die aufnehmbare Beanspruchung V relativ stark mit wachsender Dübeleinbindetiefe zu. Überschreite die Dübeleinbindetiefe h_D jedoch die “Grenzeinbindetiefe“, so nimmt die aufnehmbare Beanspruchung V nur noch relativ gering zu. Diese “Grenzeinbindetiefe“ ist abhängig von der vorhanden Betonfestigkeit f_c und der Dübelsteifigkeit, hier ausgedrückt über die Dübelstärke t.

Abbildung 8 zeigt das Gleiche, lediglich ausgedrückt in Spannungen σ_u, wobei die Linearität verloren geht. Prinzipiell ist die Zweiteilung der Kurven aber genauso zu erkennen.

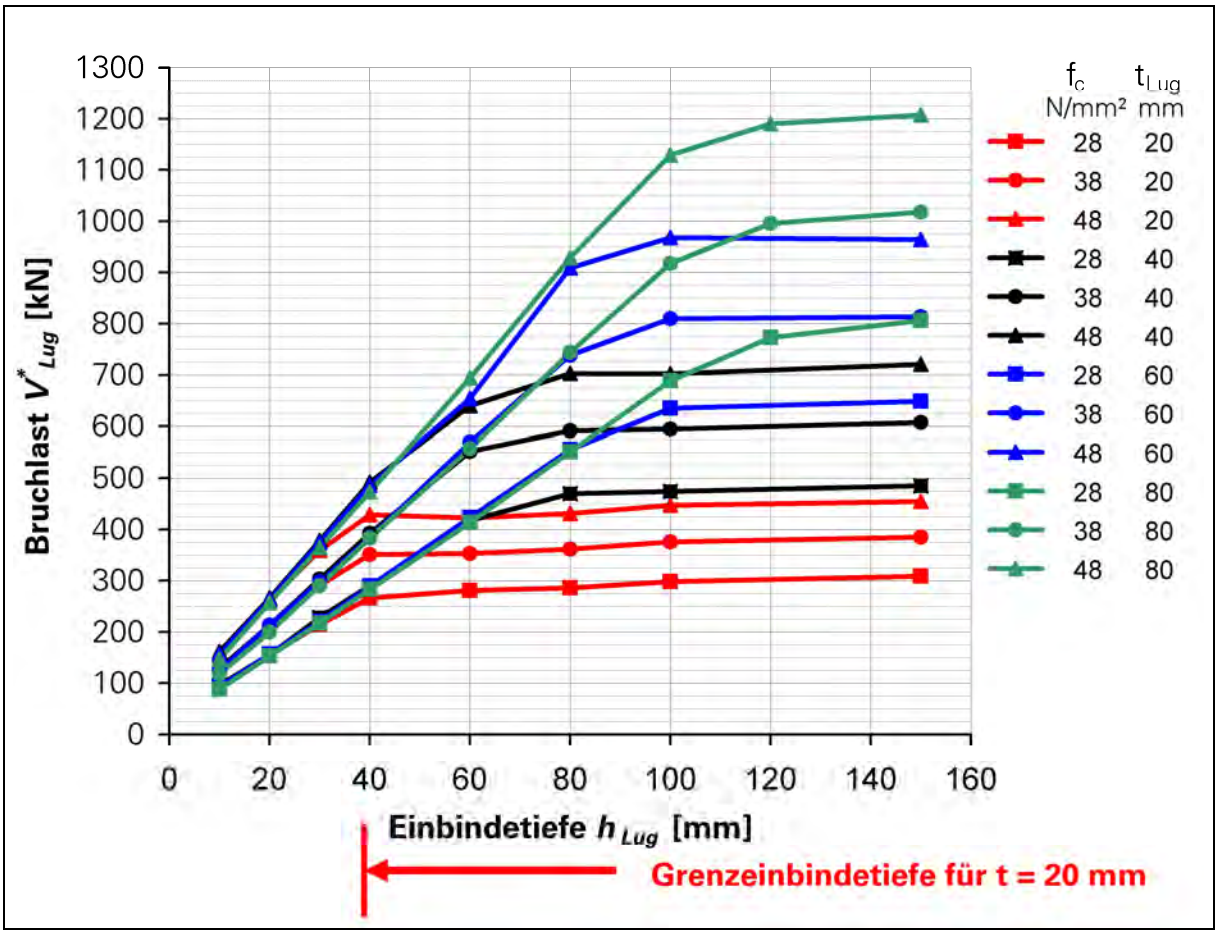


Abbildung 3 Zusammenstellung aller Bruchlasten [kN]

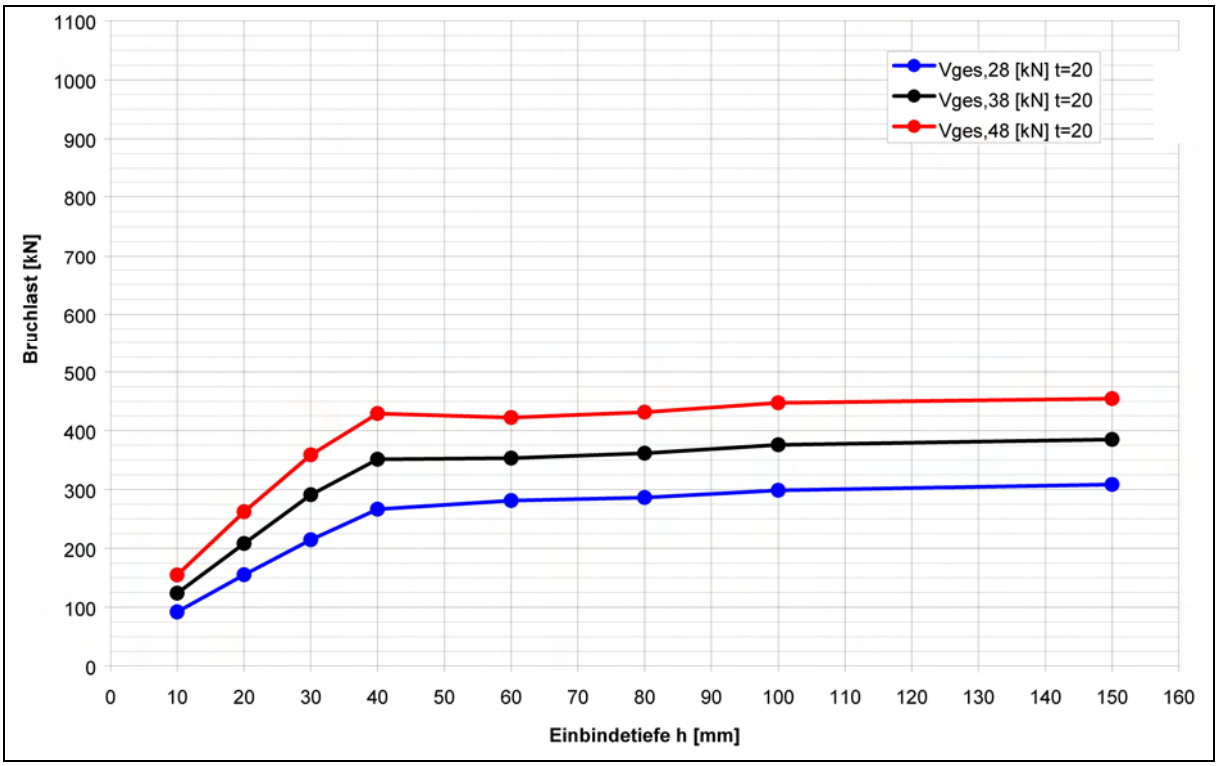


Abbildung 4 Werte für 20mm Dübelstärke

Versuch	f_c [N/mm²]	b [mm]	h [mm]	t [mm]	Step [-]	Last u_x [mm]	Beton vor Dübel u_x [mm]	V_{ges} [kN]	σ_u [N/mm²]	σ_u / f_c [-]
								$V_{ges,28}$ [kN] t=20	$\sigma_{u,28}$ [N/mm²] t=20	
DübelH 111	28	80	10	20	5	0,1000	0,0870	92,0	115,00	4,1071
DübelH 112	28	80	20	20	8	0,1600	0,1387	155,2	97,00	3,4643
DübelH 113	28	80	30	20	11	0,2200	0,1905	214,4	89,33	3,1905
DübelH 114	28	80	40	20	14	0,2800	0,2433	266,4	83,25	2,9732
DübelH 115	28	80	60	20	19	0,3800	0,3410	281,1	58,56	2,0915
DübelH 116	28	80	80	20	19	0,3800 f		286,1	44,70	1,5965
DübelH 117	28	80	100	20	20	0,4000	0,3589	298,5	37,31	1,3326
DübelH 118	28	80	150	20	21	0,4200 f		308,5	25,71	0,9182
								$V_{ges,38}$ [kN] t=20	$\sigma_{u,38}$ [N/mm²] t=20	
DübelH 121	38	80	10	20	6	0,1200	0,1025	123,8	154,75	4,0724
DübelH 122	38	80	20	20	9	0,1800	0,1513	208,0	130,00	3,4211
DübelH 123	38	80	30	20	13	0,2600	0,2201	290,9	121,21	3,1897
DübelH 124	38	80	40	20	18	0,3600	0,3116	351,3	109,78	2,8890
DübelH 125	38	80	60	20	20	0,4000	0,3513	353,1	73,56	1,9359
DübelH 126	38	80	80	20	21	0,4200	0,3704	361,5	56,48	1,4864
DübelH 127	38	80	100	20	22	0,4400	0,3884	376,0	47,00	1,2368
DübelH 128	38	80	150	20	23	0,4600	0,4071	385,0	32,08	0,8443
								$V_{ges,48}$ [kN] t=20	$\sigma_{u,48}$ [N/mm²] t=20	
DübelH 131	48	80	10	20	7	0,1400	0,1182	154,5	193,13	4,0234
DübelH 132	48	80	20	20	11	0,2200	0,1839	262,0	163,75	3,4115
DübelH 133	48	80	30	20	15	0,3000	0,2508	358,9	149,54	3,1155
DübelH 134	48	80	40	20	21	0,4200 f		428,9	134,03	2,7923
DübelH 135	48	80	60	20	22	0,4400	0,3817	422,3	87,98	1,8329
DübelH 136	48	80	80	20	23	0,4600 f		431,3	67,39	1,4040
DübelH 137	48	80	100	20	24	0,4800	0,4181	447,2	55,90	1,1646
DübelH 138	48	80	150	20	24	0,4800 f		454,3	37,86	0,7887

Tabelle 4 Werte für 20 mm Dübelstärke

Versuch	f_c [N/mm²]	b [mm]	h [mm]	t [mm]	Step [-]	Last u_x [mm]	Beton vor Dübel u_x [mm]	V_{ges} [kN]	σ_u [N/mm²]	σ_u / f_c [-]
								$V_{ges,28}$ [kN] t=40	$\sigma_{u,28}$ [N/mm²] t=40	
DübelH 211	28	80	10	40	5	0,1000	0,0868	96,9	121,06	4,3237
DübelH 212	28	80	20	40	7	0,1400	0,1197	155,8	97,38	3,4777
DübelH 213	28	80	30	40	10	0,2000	0,1709	228,2	95,08	3,3958
DübelH 214	28	80	40	40	12	0,2400	0,2032	290,3	90,72	3,2400
DübelH 215	28	80	60	40	18	0,3600	0,3072	417,4	86,96	3,1057
DübelH 216	28	80	80	40	23	0,4600	0,3994	469,9	73,42	2,6222
DübelH 217	28	80	100	40	24	0,4800	0,4188	474,4	59,30	
DübelH 218	28	80	150	40	24	0,4800	0,4177	485,1	40,43	1,4438
								$V_{ges,38}$ [kN] t=40	$\sigma_{u,38}$ [N/mm²] t=40	
DübelH 221	38	80	10	40	6	0,1200	0,1023	129,1	161,38	4,2467
DübelH 222	38	80	20	40	9	0,1800	0,1522	213,2	133,25	3,5066
DübelH 223	38	80	30	40	12	0,2400	0,2013	303,4	126,42	3,3268
DübelH 224	38	80	40	40	15	0,3000	0,2502	392,4	122,63	3,2270
DübelH 225	38	80	60	40	22	0,4400	0,3680	551,8	114,96	3,0252
DübelH 226	38	80	80	40	26	0,5200	0,4411	591,5	92,42	2,4322
DübelH 227	38	80	100	40	27	0,5400	0,4608	594,4	74,30	1,9553
DübelH 228	38	80	150	40	27	0,5400	0,4576	607,6	50,63	1,3325
								$V_{ges,48}$ [kN] t=40	$\sigma_{u,48}$ [N/mm²] t=40	
DübelH 231	48	80	10	40	7	0,1400	0,1178	161,8	202,25	4,2135
DübelH 232	48	80	20	40	11	0,2200	0,1854	266,0	166,25	3,4635
DübelH 233	48	80	30	40	14	0,2800	0,2317	378,2	157,58	3,2830
DübelH 234	48	80	40	40	18	0,3600	0,2964	492,0	153,75	3,2031
DübelH 235	48	80	60	40	29	0,5800	0,4297	639,9	133,31	2,7773
DübelH 236	48	80	80	40	28	0,5600	0,4710	702,6	109,78	2,2871
DübelH 237	48	80	100	40	29	0,5800	0,4911	702,2	87,78	1,8286
DübelH 238	48	80	150	40	29	0,5800	0,4886	720,8	60,07	1,2514

Tabelle 5 Werte für 40 mm Dübelstärke

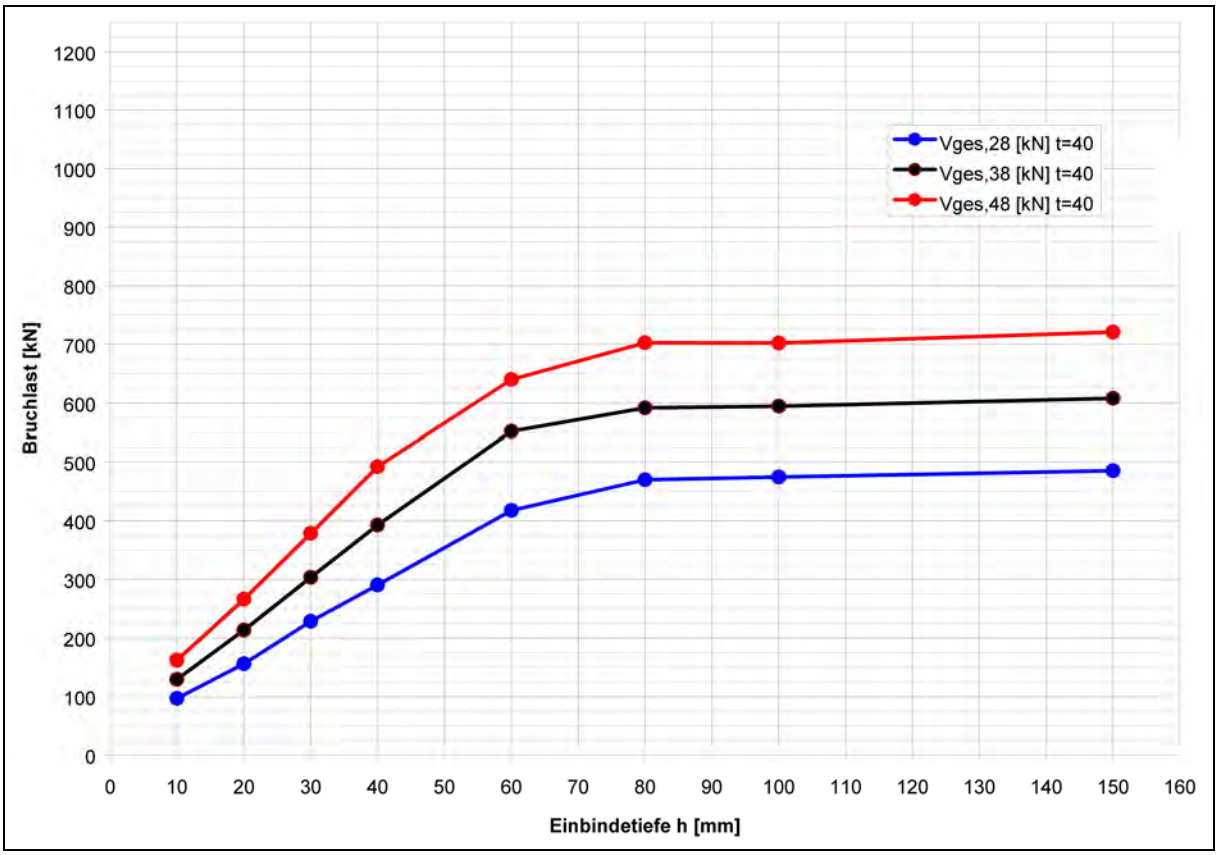


Abbildung 5 Werte für 40mm Dübelstärke

Versuch	f_c [N/mm²]	b [mm]	h [mm]	t [mm]	Step [-]	Last u_x [mm]	Beton vor Dübel u_x [mm]	V_{ges} [kN]	σ_u [N/mm²]	σ_u / f_c [-]
								$V_{ges,28}$ [kN] t=60	$\sigma_{u,28}$ [N/mm²] t=60	
DübelH 311	28	80	10	60	5	0,1000	0,0872	93,0	116,25	4,1518
DübelH 312	28	80	20	60	7	0,1400	0,1200	157,0	98,13	3,5045
DübelH 313	28	80	30	60	10	0,2000	0,1727	220,0	91,67	3,2738
DübelH 314	28	80	40	60	12	0,2400	0,2045	289,6	90,50	3,2321
DübelH 315	28	80	60	60	16	0,3200	0,2683	423,1	88,15	3,1481
DübelH 316	28	80	80	60	21	0,4200	0,3499	555,0	86,72	3,0971
DübelH 317	28	80	100	60	26	0,5200	0,4231	635,5	79,44	
DübelH 318	28	80	150	60	29	0,5800	0,4933	648,6	54,05	1,9304
								$V_{ges,38}$ [kN] t=60	$\sigma_{u,38}$ [N/mm²] t=60	
DübelH 321	38	80	10	60	6	0,1200	0,1028	125,0	156,25	4,1118
DübelH 322	38	80	20	60	9	0,1800	0,1528	213,1	133,19	3,5049
DübelH 323	38	80	30	60	12	0,2400	0,2030	297,6	124,00	3,2632
DübelH 324	38	80	40	60	14	0,2800	0,2329	384,4	120,13	3,1612
DübelH 325	38	80	60	60	20	0,4000	0,3272	569,4	118,63	3,1217
DübelH 326	38	80	80	60	26	0,5200	0,4309	738,4	115,38	3,0362
DübelH 327	38	80	100	60	30	0,6000	0,5011	809,7	101,21	2,6635
DübelH 328	38	80	150	60	31	0,6200	0,5210	813,5	67,79	1,7840
								$V_{ges,48}$ [kN] t=60	$\sigma_{u,48}$ [N/mm²] t=60	
DübelH 331	48	80	10	60	7	0,1400	0,1184	157,1	196,38	4,0911
DübelH 332	48	80	20	60	10	0,2000	0,1664	263,4	164,63	3,4297
DübelH 333	48	80	30	60	14	0,2800	0,2334	374,5	156,04	3,2509
DübelH 334	48	80	40	60	17	0,3400	0,2791	485,7	151,78	3,1621
DübelH 335	48	80	60	60	23	0,4600	0,3739	709,8	147,88	3,0807
DübelH 336	48	80	80	60	30	0,6000	0,4875	908,6	141,97	2,9577
DübelH 337	48	80	100	60	33	0,6600	0,5396	968,0	121,00	2,5208
DübelH 338	48	80	150	60	33	0,6600	0,5404	964,1	80,34	1,6738

Tabelle 6 Werte für 60 mm Dübelstärke

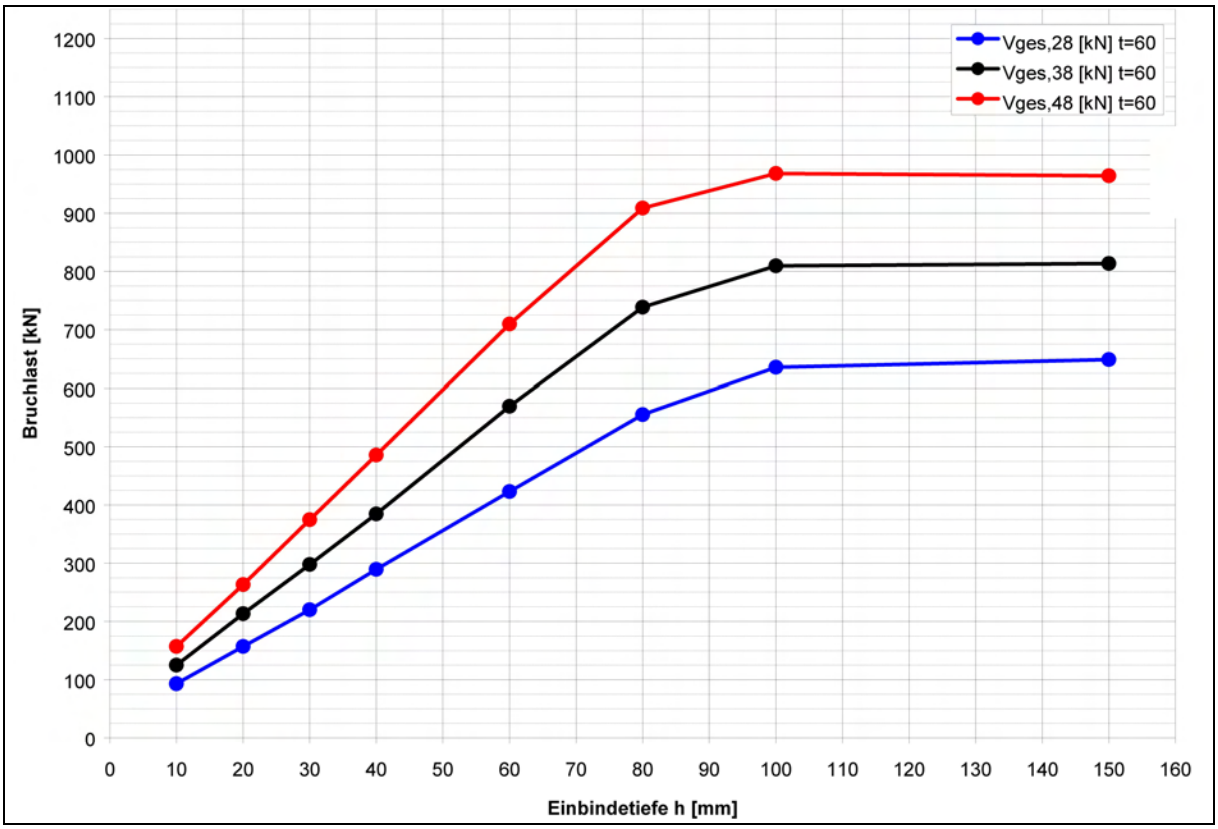


Abbildung 6 Werte für 60 mm Dübelstärke

Versuch	f_c [N/mm²]	b [mm]	h [mm]	t [mm]	Step [-]	Last u_x [mm]	Beton vor Dübel u_x [mm]	V_{ges} [kN]	σ_u [N/mm²]	σ_u / f_c [-]
							$V_{ges,28}$ [kN] t=80		$\sigma_{u,28}$ [N/mm²] t=80	
DübelH 411	28	80	10	80	5	0,1000	0,0877	87,9	109,88	3,9241
DübelH 412	28	80	20	80	7	0,1400	0,1210	153,2	95,75	3,4196
DübelH 413	28	80	30	80	9	0,1800	0,1533	217,0	90,42	3,2292
DübelH 414	28	80	40	80	12	0,2400	0,2051	283,1	88,47	3,1596
DübelH 415	28	80	60	80	15	0,3000	0,2511	413,4	86,13	3,0759
DübelH 416	28	80	80	80	20	0,4000	0,3335	550,9	86,08	3,0742
DübelH 417	28	80	100	80	24	0,4800	0,3998	688,9	86,11	3,0754
DübelH 417_2	28	80	120	80	27	0,5400	0,4501	773,2	80,54	2,8765
DübelH 418	28	80	150	80	29	0,5800	0,4860	806,3	67,19	2,3997
							$V_{ges,38}$ [kN] t=80		$\sigma_{u,38}$ [N/mm²] t=80	
DübelH 421	38	80	10	80	6	0,1200	0,1036	118,0	147,50	3,8816
DübelH 422	38	80	20	80	8	0,1600	0,1344	199,8	124,88	3,2862
DübelH 423	38	80	30	80	11	0,2200	0,1842	290,5	121,04	3,1853
DübelH 424	38	80	40	80	14	0,2800	0,2337	383,1	119,72	3,1505
DübelH 425	38	80	60	80	19	0,3800	0,3119	556,9	116,02	3,0532
DübelH 426	38	80	80	80	24	0,4800	0,3928	744,3	116,30	3,0604
DübelH 427	38	80	100	80	29	0,5800	0,4708	917,4	114,68	3,0178
DübelH 427_2	38	80	120	80	32	0,6400	0,5209	995,3	103,68	2,7283
DübelH 428	38	80	150	80	32	0,6400	0,5181	1018,0	84,83	2,2325
							$V_{ges,48}$ [kN] t=80		$\sigma_{u,48}$ [N/mm²] t=80	
DübelH 431	48	80	10	80	7	0,1400	0,1195	147,2	184,00	3,8333
DübelH 432	48	80	20	80	10	0,2000	0,1670	257,1	160,69	3,3477
DübelH 433	48	80	30	80	13	0,2600	0,2151	364,7	151,96	3,1658
DübelH 434	48	80	40	80	16	0,3200	0,2620	472,9	147,78	3,0788
DübelH 435	48	80	60	80	29	0,5800	0,3646	694,5	144,69	3,0143
DübelH 436	48	80	80	80	28	0,5600	0,4485	928,8	145,13	3,0234
DübelH 437	48	80	100	80	34	0,6800	0,5391	1129,0	141,13	2,9401
DübelH 437_2	48	80	120	80	37	0,7400	0,5790	1190,0	123,96	2,5825
DübelH 438	48	80	150	80	38	0,7600	0,5926	1207,0	100,58	2,0955

Tabelle 7 Werte für 80 mm Dübelstärke

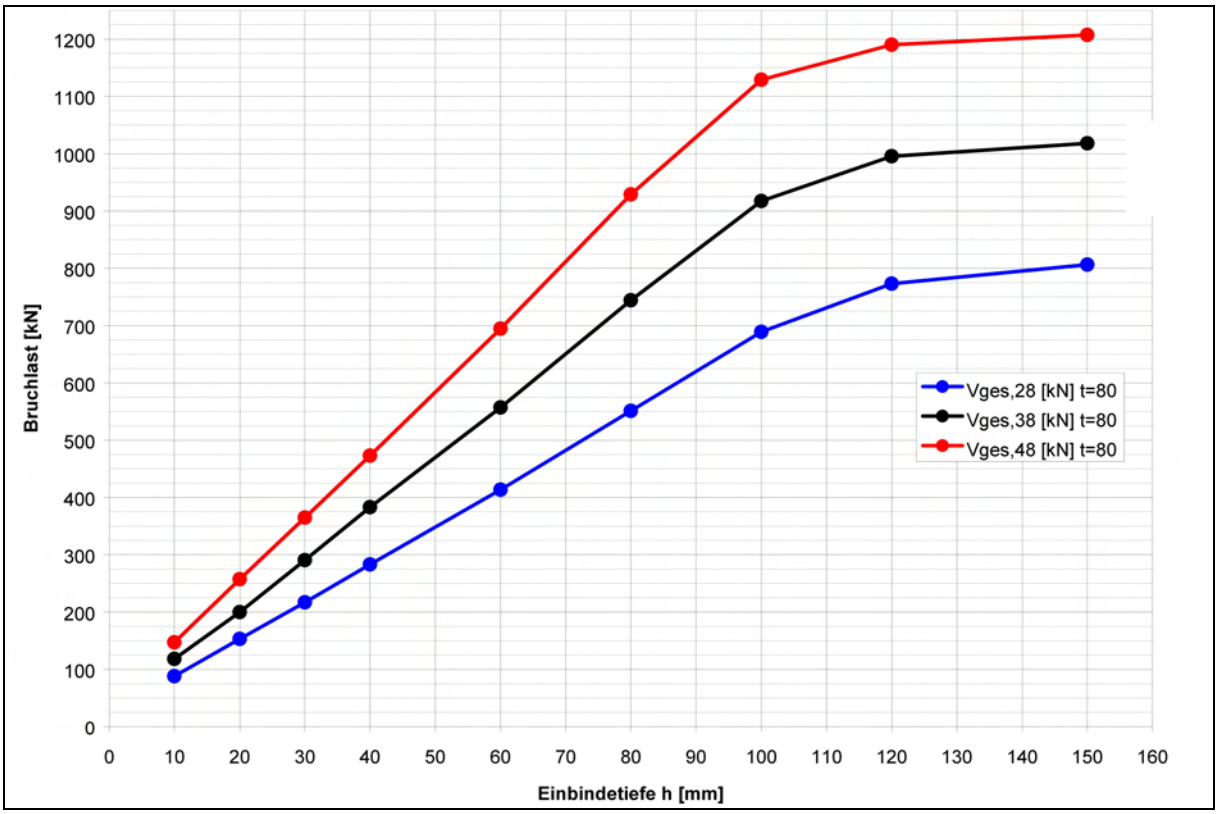


Abbildung 7 Werte für 80 mm Dübelstärke

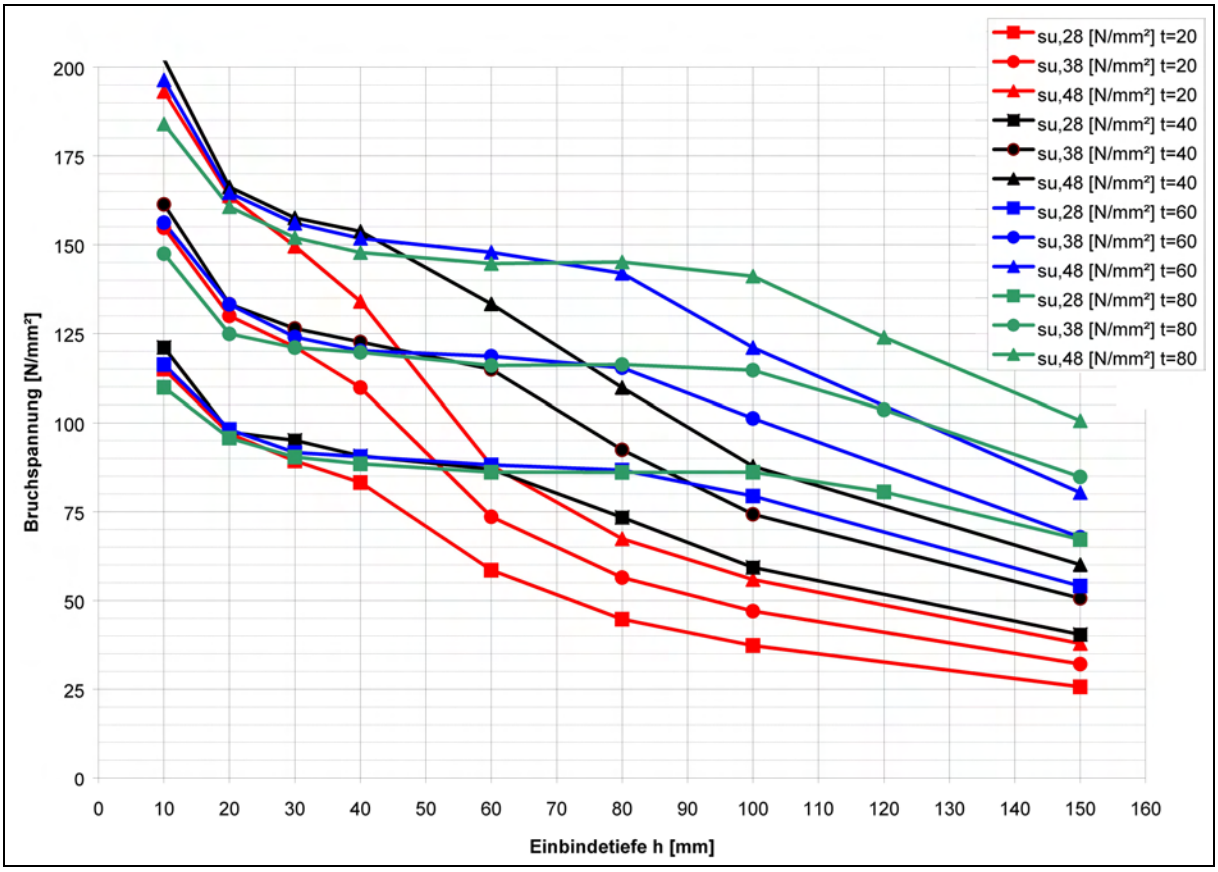


Abbildung 8 Zusammenstellung aller Bruchspannungen [N/mm²]

Die Darstellung der Bruchlast $V_{Dübel}$ aufgetragen über die Dübeleinbindetiefe h_D, wie in Abbildung 3 und im Folgenden dargestellt, läst einen bilineare Verlauf der Bruchlast erkennen. Im Weiteren soll nun dieser bilineare Verlauf untersucht und definiert werden. Hierbei wird der steil ansteigende erste Bereich als „Kurventeil 1" angesprochen, der mehr horizontal verlaufende 2te Teil als „Kurventeil 2".

A3.3.2 AUSWERTUNG KURVENTEIL 1

Für die erreichten Bruchlasten wird eine Gleichung aufgestellt. Es gilt:

$$V_1 = a_1 \cdot h + b_1 \quad [\mathrm{N}] \qquad a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, d_2 = f\left(f_c, t \text{ bzw. } EI_{Dübel}\right)$$

$$V_2 = a_2 \cdot h + b_2 \quad [\mathrm{N}] \qquad EI_{Dübel} = \frac{E \cdot 200mm \cdot t^3}{12} \quad [\mathrm{Nmm^2}]$$

oder

$$V_1 = a_1 \cdot (h - c_1) \quad [\mathrm{N}] \qquad E \quad [\mathrm{N/mm^2}] \qquad (3.2)$$

$$V_2 = d_2 \quad [\mathrm{N}] \qquad t \quad [\mathrm{mm}]$$

Die entsprechenden Werte für V_i sind auf den Blättern „Werte Teil i" zusammengefasst. Die Parameter a_1 und b_1 für die einzelnen Kurven werden abschnittsweise ermittelt. Hierbei fällt auf, dass vor allem der Achsenabschnitt b für größere Einbindetiefen h_D stark variiert. Daher werden im Weiteren diese Werte gestrichen um den Durchschnitt nicht negativ zu beeinflussen. Es ergeben sich dann näherungsweise lineare Abhängigkeiten für *a* und *b* bezogen auf die Betonfestigkeit f_c, siehe Abbildung 9. Die Geradengleichung wird mit dem jeweils Ersten und letzten zulässigen Kurvenwert gebildet. Hierbei sinkt der maximale Fehler von 16 % bzw. 10 % auf weniger als 3 %, und es ergibt sich naturgemäß die gleichmäßigste Verteilung für *a* und *b*.

Zusammenfassung

fc [N/mm²]	t [mm]	a	b
28	20	5,813	33,867
38	20	7,583	47,967
48	20	9,147	63,033
28	40	6,411	27,580
38	40	8,454	44,120
48	40	11,007	51,733
28	60	6,600	22,000
38	60	8,763	34,714
48	60	10,736	52,429
28	80	6,678	15,989
38	80	8,882	27,811
48	80	10,909	36,544

maximaler Fehler in V	2,8%
mittlerer Fehler in V	-1,0%

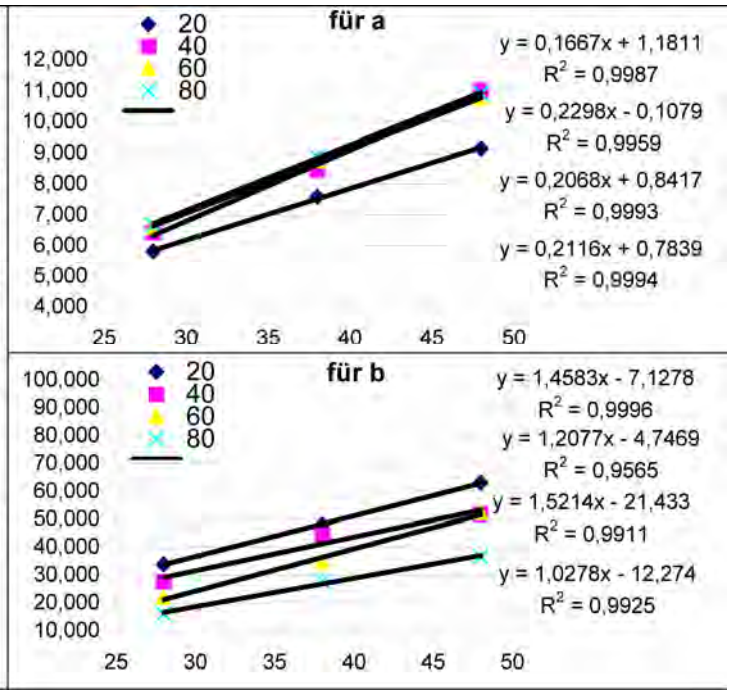
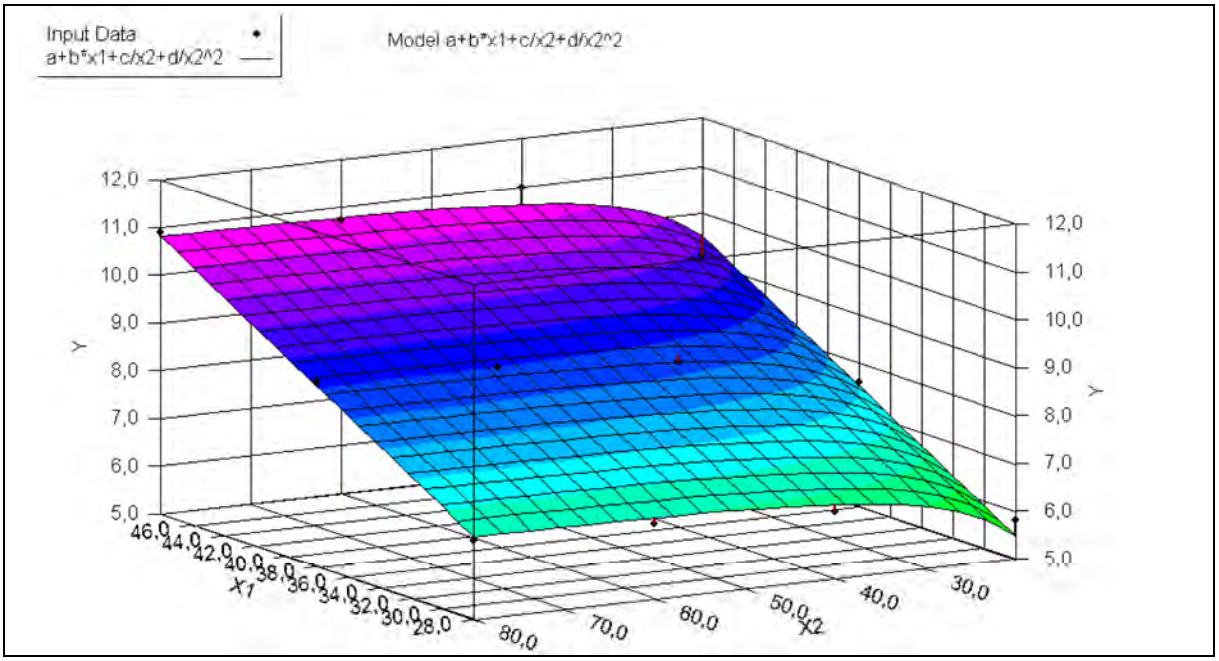


Abbildung 9 Kurvenparameter a und b

Blatt	maximaler Fehler in V	mittlerer Fehler in V
Werte Teil1 (2)	16,2 %	0,9 %
Werte Teil1 (3)	2,8 %	-1,0 %
Werte Teil1 (4)	10,5 %	0,6 %

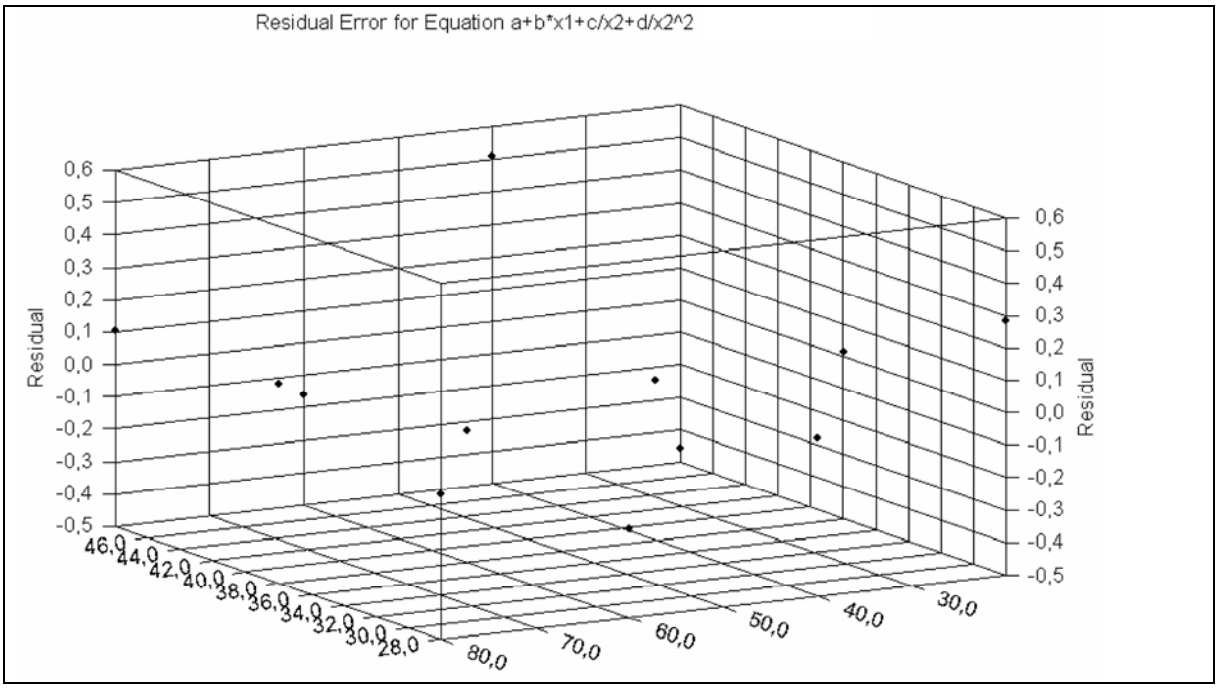
Untersucht man prinzipiell mögliche Gleichungen für den Parameter *a*, so liefern die alle folgenden Gleichungen gute mathematische Annäherungen. Die bekannten Werte sind hier $x1 = f_c$ und $x2 = t$. Im Allgemeinen sind die Konstanten *a*, *b*, *c* und *d* notwendig um die Steigung der Geradengleichung zu ermitteln. Das Ergebnis kann dann wie folgt dargestellt werden.



Für die Gleichung: $y = a + b \cdot x_1 + \frac{c}{x_2} + \frac{d}{x_2^2}$ (y = a + b * x1 + c / x2 + d / x2 ^ 2)

mit a = 1,007187537 b = 0,2037125
c = 12,78567552 d = -748,4884956

Während die Kurvenfläche für große Steifigkeiten des Dübels ($x2 = t$) gut angenähert wird, werden die Abweichungen für kleine Werte *x2* relativ größer. Der Gesamtfehler bleibt jedoch unter 0,5 %, wie dem nächsten Bild zu entnehmen ist. Negativ fällt auf, dass das erwartete Ergebnis im Allgemeinen überschätzt wird (negative Werte Residual). Das heißt die Steigung der Geraden fällt zu steil aus, und damit werden die Bruchlasten überschätzt.



Prinzipiell fallen bei dieser Betrachtung die Gleichungen subjektiv aber zu kompliziert aus. Es sollte eine einfachere Form gefunden werden, hierbei kann dann auch ein größerer Fehler akzeptiert werden. Wie in Abbildung 3 dargestellt, ist die Bruchlast linear von der Dübeleinbindetiefe abhängig. Aus Erfahrung kann diese Aussage auf die Dübelfläche ausgeweitet werden, da auch die Dübelbreite linear eingeht.

Lediglich die Steigung der Geraden, die das lineare Anwachsen der Bruchlast mit der vorhandenen Dübelfläche darstellt, ist von den Parametern Betonfestigkeit und Dübelsteifigkeit abhängig. Die Betonfestigkeit f_c ist für alle Werte bekannt, in Anlehnung an bestehende Normen, und bekannte Auswertungen von Versuchen sollte diese ebenfalls linear oder als Wurzelfunktion in die zu findenden Gleichungen eingehen.

also: f_c oder $\sqrt{f_c}$ oder $\sqrt[3]{f_c^2}$ *(3.3)*

Der untersuchte Parameter t stellt einen Hauptanteil der Steifigkeit des Dübels dar. Im konkreten Fall ist es die Biegesteifigkeit des starr eingespannten Dübelkragarms, es gilt also:

$$I_{Dübel,starr} = \frac{b_{Dübel} \cdot t_{Dübel}^3}{12} \qquad (3.4)$$

Es liegt also nahe, den Parameter t in der 3ten Potenz einzusetzen. Für kleinere Dübelsteifigkeiten fällt die erwartete Bruchlast kleiner aus. Daher ist es nahe liegend die Dübelsteifigkeit nicht als Querschnittsbiegesteifigkeit, sondern als Systembiegesteifigkeit aufzufassen. Wird dann eine nicht biegestarre Grundplatte gewählt, so kann die Verdrehung des Dübelkragarms in der Einspannstelle gleichartig wie eine geringere Dübelbiegesteifigkeit in die Ermittlung der Bruchlast einbezogen werden. Für die Bruchlast ist dann nicht mehr die Steifigkeit des Dübels von Bedeutung, son-

dern die Verformung des Dübels. Hiermit ist dann auch eine physikalische Kontinuität zum Vorgehen bei der Ermittlung der „korrigierten Werte“ am verformten System gegeben.

Rank	Model	StdError	Residual Sum	Residual Avg.	RSS	R^2	Ra^2
1	a+b*x1+c/x2+d/x2^2	0,249849314	-5,77316E-14	-4,81097E-15	0,49939744	0,986499895	0,981437356
2	a+b*x1+c*log(x2)+d*log(x2)^2	0,256723118	-1,77636E-15	-1,4803E-16	0,527254073	0,985746853	0,980401923
3	a+b*x1+c*x1^2+d/x2	0,274980018	-2,08722E-13	-1,73935E-14	0,604912083	0,98364754	0,977515368
4	a+b*log(x1)+c*log(x1)^2+d/x2	0,274980018	-4,79616E-13	-3,9968E-14	0,604912083	0,98364754	0,977515368
5	a+b/x1+c/x1^2+d/x2	0,274980018	-8,17124E-14	-6,80937E-15	0,604912083	0,98364754	0,977515368
6	a+b*x1+c/x2	0,259289083	1,77636E-15	1,4803E-16	0,605077458	0,98364307	0,980008197
7	a+b*x1+c*x2+d*x2^2	0,287543393	0	0	0,661449625	0,982119173	0,975413863
8	a+b*log(x1)+c/x2+d/x2^2	0,292213493	1,42109E-14	1,18424E-15	0,683109803	0,981533638	0,974608753
9	a+b*log(x1)+c*log(x2)+d*log(x2)^2	0,298112067	-1,77636E-15	-1,4803E-16	0,710966436	0,980780596	0,973573319
10	a*x1^b*x2^c	0,293095193	0,00155749	0,000129791	0,773143128	0,979099786	0,974455295
11	a+b*log(x1)+c/x2	0,296046134	2,4869E-13	2,07242E-14	0,788789821	0,978676813	0,973938327
12	a+b*log(x1)+c*x2+d*x2^2	0,32503115	1,20526E-11	1,00438E-12	0,845161988	0,977152916	0,968585259
13	a+b*x1+c*x1^2+d*log(x2)	0,335496961	1,16618E-12	9,71815E-14	0,900465687	0,975657903	0,966529616
14	a+b/x1+c/x1^2+d*log(x2)	0,335496961	-8,88178E-16	-7,40149E-17	0,900465687	0,975657903	0,966529616
15	a+b*log(x1)+c*log(x1)^2+d*log(x2)	0,335496961	-3,9968E-14	-3,33067E-15	0,900465687	0,975657903	0,966529616
16	a+b*x1+c*log(x2)	0,316338613	1,77636E-15	1,4803E-16	0,900631062	0,975653432	0,970243084
17	a*b^x1*x2^c	0,324188346	-0,019262256	-0,001605188	0,945882752	0,974430153	0,968747965
18	a+b*log(x1)+c*log(x2)	0,34710604	6,21725E-14	5,18104E-15	1,084343425	0,970687175	0,964173214
19	a+b/x1+c/x2+d/x2^2	0,391545278	1,86517E-14	1,55431E-15	1,226461639	0,966845324	0,95441232
20	a+b/x1+c*log(x2)+d*log(x2)^2	0,395966898	7,10543E-15	5,92119E-16	1,254318272	0,966092281	0,953376887
21	a*x1^b*c^x2	0,384493798	-0,001021872	-8,5156E-05	1,330519329	0,964032354	0,956039544
22	a+b/x1+c/x2	0,384728137	-1,06581E-14	-8,88178E-16	1,332141657	0,963988498	0,955985942
23	a+b/x1+c*x2+d*x2^2	0,416610403	-3,16192E-13	-2,63493E-14	1,388513824	0,962464602	0,948388827
24	a+b*x1+c*x1^2+d*x2	0,416971872	-3,10862E-14	-2,59052E-15	1,390924333	0,962399439	0,948299228
25	a+b*log(x1)+c*log(x1)^2+d*x2	0,416971872	-1,33227E-14	-1,11022E-15	1,390924333	0,962399439	0,948299228

Damit stellt sich aber sofort die Frage, an welcher Stelle die Verformung betrachtet werden muss, um allgemein gültige Aussagen ableiten zu können.

Als ausgezeichneter Punkt am Dübel kann eigentlich nur der Dübelkopf in Frage kommen, wenn man die Einspannstelle in der Grundplatte als Dübelfuß bezeichnet. Diese Bezeichnung ist dann analog zum Kopfbolzendübel gewählt.

Für die Verformung im Dübelkopf müssen dann drei Anteile berücksichtigt werden:

- Durchbiegung aus Biegung
- Verformung aus Schub
- Verformung aus Verdrehung in der Einspannstelle

Da diese Verformung in die Berechnung der aufnehmbaren Dübellast eingehen soll, kann diese sinnvoll nur für eine Einheitslast ermittelt werden. Sinnvollerweise sollte dies die Einzellast auf dem Dübelkopf sein. Wie Tabelle 8 zeigt liegen die Werte aus Schubverformung nur für extrem kleine Biegelängen über dem 10%-Bereich der Biegeverformungen.

$$
\begin{aligned}
f_{Kopf} &= f_{Biegung} + f_{Schub} + f_{Verdrehung} \\
f_{Biegung} &= \frac{V_{E,Kopf} \cdot h_{Dübel}^3}{3 \cdot EI_{Dübel}} \\
f_{Schub} &= \frac{V_{E,Kopf} \cdot h_{Dübel}}{G \cdot A_{Dübel}} \cdot \chi_Q \text{ mit } \chi_{Q,\mathrm{Rechteck}} = 1{,}2 \\
f_{Verdrehung} &= \gamma_{Fuss} \cdot h_{Dübel}
\end{aligned}
\tag{3.5}
$$

$h_{Dübel}$ [mm]

$$EI_{Dübel} = \frac{E_{Dübel} \cdot b_{Dübel} \cdot t_{Dübel}^3}{12}$$

$E_{Dübel,Stahl}$ [N/mm²] i.a. 210000

$G_{Dübel,Stahl}$ [N/mm²] i.a. 81000 (3.6)

$b_{Dübel}$ [mm] hier 80

$t_{Dübel}$ [mm]

<u>Anmerkung zur Schubverteilungszahl χ</u>: Diese ist lediglich von der Form der Querschnittsfläche abhängig. Für den Rechteckquerschnitt, der dieser Betrachtung zugrunde liegt ergibt sich diese zu 1,2. Andere Querschnittsflächen können entsprechend betrachtet und in das Modell eingebaut werden, solange eine ebene Fläche zur Lastabtragung vorhanden ist. Wird diese Bedingung aufgegeben, sind entsprechende weiter Betrachtungen notwendig. So kann dann das Bemessungsmodell auf Kopfbolzendübel erweitert werden.

$$\chi_Q = \frac{A}{I_x^2} \int \frac{\left[S_{x(y)}\right]^2}{\left[b_{(y)}\right]^2} dA \tag{3.7}$$

Rechteckquerschnitt $\chi = 6/5$

$V_{E,Kopf}$= 1000000 [N]

t [mm]	b [mm]	h [mm]	$f_{Biegung}$ [mm]	f_{Schub} [mm]	f_{phi} [mm]	f_{Kopf} [mm]
20	80	10	0,0298	0,0926	0,0000	0,1224
20	80	20	0,2381	0,1852	0,0000	0,4233
20	80	30	0,8036	0,2778	0,0000	1,0813
20	80	40	1,9048	0,3704	0,0000	2,2751
20	80	60	6,4286	0,5556	0,0000	6,9841
20	80	80	15,2381	0,7407	0,0000	15,9788
20	80	100	29,7619	0,9259	0,0000	30,6878
20	80	120	51,4286	1,1111	0,0000	52,5397
20	80	150	100,4464	1,3889	0,0000	101,8353
40	80	10	0,0037	0,0463	0,0000	0,0500
40	80	20	0,0298	0,0926	0,0000	0,1224
40	80	30	0,1004	0,1389	0,0000	0,2393
40	80	40	0,2381	0,1852	0,0000	0,4233
40	80	60	0,8036	0,2778	0,0000	1,0813
40	80	80	1,9048	0,3704	0,0000	2,2751
40	80	100	3,7202	0,4630	0,0000	4,1832
40	80	120	6,4286	0,5556	0,0000	6,9841
40	80	150	12,5558	0,6944	0,0000	13,2502
60	80	10	0,0011	0,0309	0,0000	0,0320
60	80	20	0,0088	0,0617	0,0000	0,0705
60	80	30	0,0298	0,0926	0,0000	0,1224
60	80	40	0,0705	0,1235	0,0000	0,1940
60	80	60	0,2381	0,1852	0,0000	0,4233
60	80	80	0,5644	0,2469	0,0000	0,8113
60	80	100	1,1023	0,3086	0,0000	1,4109
60	80	120	1,9048	0,3704	0,0000	2,2751
60	80	150	3,7202	0,4630	0,0000	4,1832
80	80	10	0,0005	0,0231	0,0000	0,0236
80	80	20	0,0037	0,0463	0,0000	0,0500
80	80	30	0,0126	0,0694	0,0000	0,0820
80	80	40	0,0298	0,0926	0,0000	0,1224
80	80	60	0,1004	0,1389	0,0000	0,2393
80	80	80	0,2381	0,1852	0,0000	0,4233
80	80	100	0,4650	0,2315	1,0000	1,6965
80	80	120	0,8036	0,2778	2,0000	3,0813
80	80	150	1,5695	0,3472	3,0000	4,9167

Tabelle 8 Werte f_{Kopf}

Mit diesen Überlegungen kann man die Darstellung der Bruchlasten genauer betrachten. Prinzipiell zeigen alle Kurven einen bilinearen Verlauf. Betrachtet man den ersten Teil dieser Kurven, wie es in Abbildung 10 mit den durchgezogenen Linien dargestellt wird, so stellt sich die Geradengleichung in dieser Form dar:

$$V_1 = a \cdot \left(h_{Dübel} - b\right)$$
$$mit$$
$$a = f_{(f_c)} \qquad (3.8)$$
$$b = 4{,}2 \quad [\text{mm}]$$

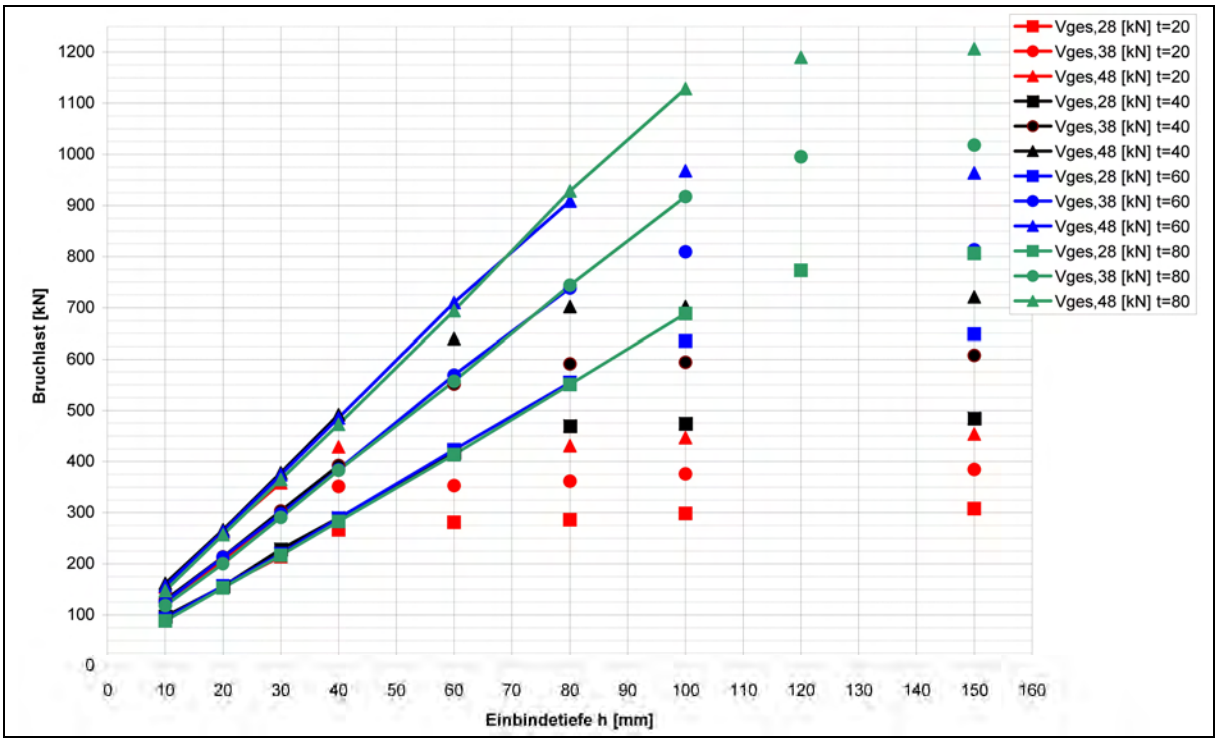


Abbildung 10 1ter Teil der Linearisierung

Der Wert b = 4,2 mm kann dem Diagramm direkt entnommen werden. Tendenziell ist zwar eine geringfügige Abhängigkeit des Wertes b von der Betonfestigkeit f_c zu erahnen, diese kann aber innerhalb der erreichbaren Genauigkeit und der betrachteten Betone ($18 \leq f_c$ [N/mm²] ≤ 68) vernachlässigt werden.

Der Parameter $h_{Dübel}$ geht linear in die zu findende Gleichung ein, während für die Steifigkeit des Dübels f_{Kopf} keine funktionelle Abhängigkeit bzw. Beziehung zu erkennen ist. Zum Vergleich sind die Biegesteifigkeiten der Dübel in Tabelle 9 dargestellt und ins Verhältnis gesetzt. Ebenfalls werden die Verhältnisse der erreichten Maximallast für f_c = 38 N/mm² angegeben.

	I [mm^4]	Ii / $I_{t=20}$		V_{max} [kN]			
$I_{t=20}$	b · 666,7	1	1^3	375	1,0	1,0/1=1,000	
$I_{t=40}$	b · 5333,3	8	2^3	610	1,6	1,6/2=0,800	
$I_{t=60}$	b · 18000,0	27	3^3	820	2,2	2,2/3=0,733	
$I_{t=80}$	b · 42666,6	64	4^3	1020	2,7	2,7/4=0,675	

Tabelle 9 Dübelsteifigkeiten und V_{max}

Betrachtung ohne Korrektur des Achsenabschnitts; für

- x1 = $h_{Dübel}$
- x2 = f_c
- Y = V_{Bruch}

erhält man mögliche Lösungen nach Tabelle 10. Hiervon sind sicherlich nur die Gleichungen auf Rang 10 und 11 interessant da sie entsprechend einfach sind und in der Genauigkeit den anderen nur numerisch unterlegen sind. Praktisch ist die Abweichung für alle aufgeführten Gleichungen vernachlässigbar. Das Fehlerquadrat liegt für die Gleichungen auf Rang 10 und 11 immerhin noch bei 0,9985 bzw. 0,9975, und liegt somit sehr nahe am Ideal von 1,0.

Rank	Model	RSS	R^2	Ra^2
1	a+b*x1+c*x2+d*x1^2+e*x2^2+f*x1*x2+g*x1^3+h*x2^3+i*x1*x2^2+j*x1^2*x2	1681442573	0,999514309	0,999428599
2	a+b*x1+c*log(x2)+d*x1^2+e*log(x2)^2+f*x1*log(x2)+g*x1^3+h*log(x2)^3+i*x1*log(x2)^2+j*x1^2*log(x2)	1684387149	0,999513458	0,999427598
3	a+b*x1+c/x2+d*x1^2+e/x2^2+f*x1/x2+g*x1^3+h/x2^3+i*x1/x2^2+j*x1^2/x2	1687975823	0,999512422	0,999426378
4	a+b*x1+c*x2+d*x1^2+e*x2^2+f*x1*x2	1891892988	0,999453519	0,999403839
5	a+b*log(x1)+c*log(x2)+d*log(x1)^2+e*log(x2)^2+f*log(x1)*log(x2)+g*log(x1)^3+h*log(x2)^3+i*log(x1)*log(x2)^	1934663523	0,999441165	0,999342547
6	a+b*log(x1)+c*x2+d*log(x1)^2+e*x2^2+f*log(x1)*x2+g*log(x1)^3+h*x2^3+i*log(x1)*x2^2+j*log(x1)^2*x2	1951795846	0,999436216	0,999336725
7	a+b*log(x1)+c/x2+d*log(x1)^2+e/x2^2+f*log(x1)/x2+g*log(x1)^3+h/x2^3+i*log(x1)/x2^2+j*log(x1)^2/x2	2075287311	0,999400545	0,999294759
8	a+b*x1+c*log(x2)+d*x1^2+e*log(x2)^2+f*x1*log(x2)	2165444162	0,999374503	0,99931764
9	a+b*x1+c/x2+d*x1^2+e/x2^2+f*x1/x2	3760922588	0,998913643	0,998814883
10	a*x1^b*x2^c	5161523105	0,998509074	0,998457663
11	a*x1^b*c^x2	8517806891	0,997539599	0,997454757
12	a+b*log(x1)+c*x2+d*log(x1)^2+e*x2^2+f*log(x1)*x2	23713443866	0,99315028	0,992527579
13	a+b*log(x1)+c*log(x2)+d*log(x1)^2+e*log(x2)^2+f*log(x1)*log(x2)	23932026735	0,993087142	0,9924587
14	a+b*log(x1)+c/x2+d*log(x1)^2+e/x2^2+f*log(x1)/x2	25359116061	0,992674922	0,992009005
15	a+b/x1+c*log(x2)+d/x1^2+e*log(x2)^2+f*log(x2)/x1+g/x1^3+h*log(x2)^3+i*log(x2)^2/x1+j*log(x2)/x1^2	39819426381	0,988498005	0,986468241
16	a+b/x1+c*x2+d/x1^2+e*x2^2+f*x2/x1+g/x1^3+h*x2^3+i*x2^2/x1+j*x2/x1^2	40946729041	0,988172379	0,986085152
17	a+b/x1+c/x2+d/x1^2+e/x2^2+f/(x1*x2)+g/x1^3+h/x2^3+i/(x1*x2^2)+j/(x1^2*x2)	41220161250	0,988093397	0,985992232
18	a+b*log(x1)+c*log(x1)^2+d*log(x1)^3+e*log(x1)^4+f*log(x1)^5+g*x2+h*x2^2+i*x2^3+j*x2^4	1,11733E+11	0,967725446	0,962029936
19	a+b*log(x1)+c*log(x1)^2+d*log(x1)^3+e*log(x1)^4+f*log(x1)^5+g/x2+h/x2^2+i/x2^3+j/x2^4+k/x2^5	1,17317E+11	0,96611245	0,959334941
20	a+b/x1+c/x1^2+d/x1^3+e/x1^4+f/x1^5+g*x2+h*x2^2+i*x2^3+j*x2^4+k*x2^5	1,17881E+11	0,96594952	0,959139423

Tabelle 10 Rangfolge für Gleichungen Teil 1

Im Weiteren sollen die Gleichungen nach Rang 10 und Rang 11 betrachtet werden.

$$V_{Bruch} = 432,92 \cdot h_{Dübel}^{0,912} \cdot f_c^{0,946} \tag{3.9}$$

$$V_{Bruch} = 5122,54 \cdot h_{Dübel}^{0,912} \cdot 1,025^{f_c} \tag{3.10}$$

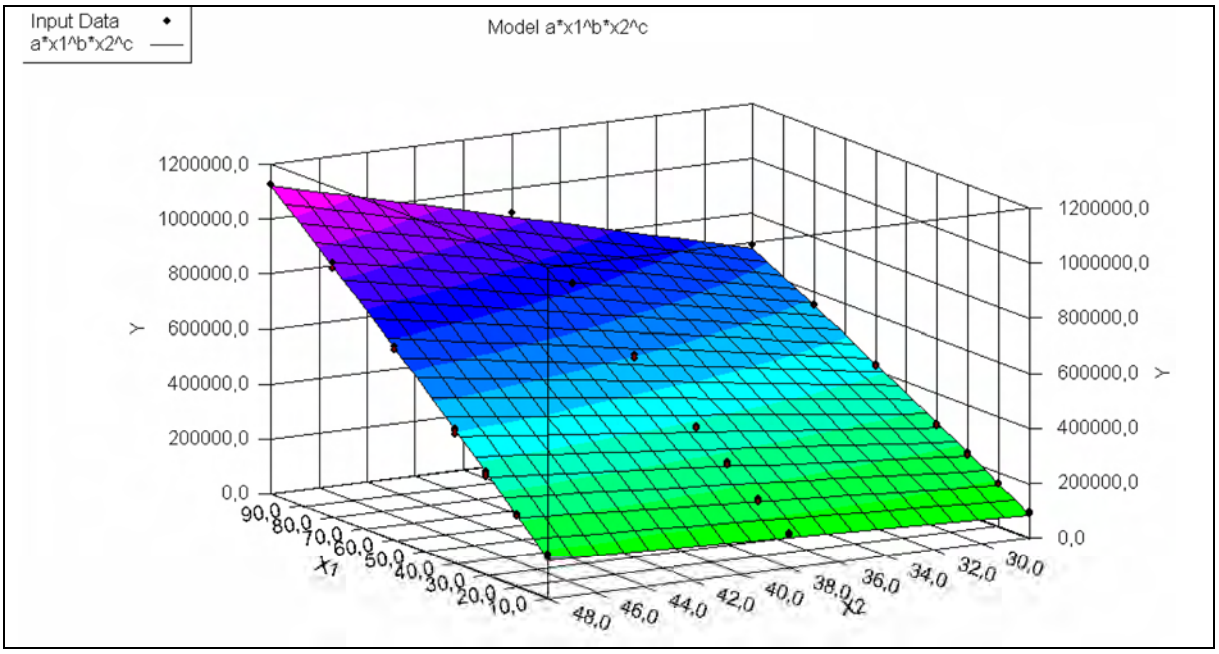


Abbildung 11 Darstellung Gleichung Rang 10/1

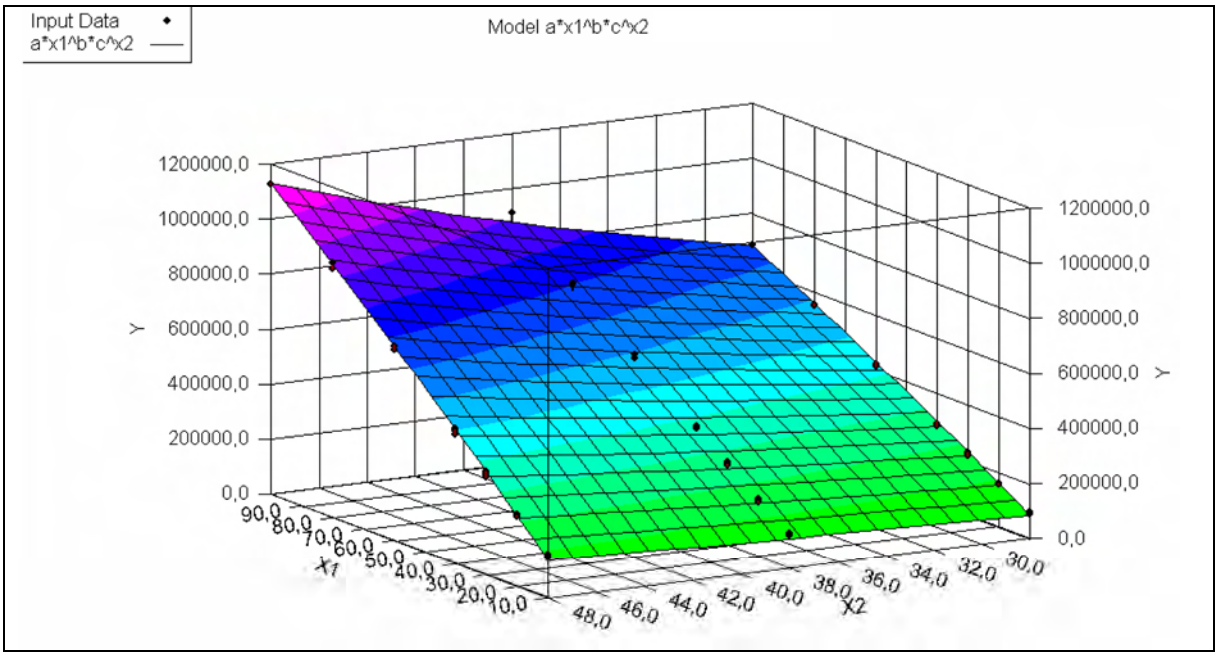
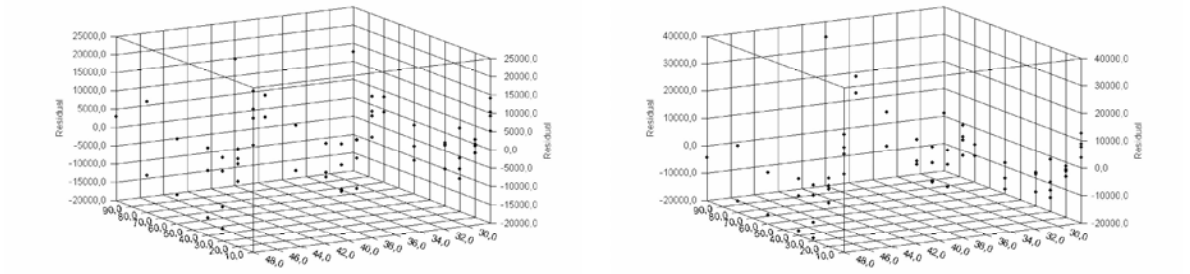


Abbildung 12 Darstellung Gleichung Rang 11/1



Model Definition:				
Y = a*x1^b*x2^c				
Number of observations = 61				
Number of missing observations = 0				
Solver type: Nonlinear				
Nonlinear iteration limit = 250				
Diverging nonlinear iteration limit =10				
Number of nonlinear iterations performed = 5				
Residual tolerance = 0,0000000001				
Sum of Residuals = 69229,4039239769				
Average Residual = 1134,9082610488				
Residual Sum of Squares (Absolute) = 5161523104,72843				
Residual Sum of Squares (Relative) = 5161523104,72843				
Standard Error of the Estimate = 9433,54533925245				
Coefficient of Multiple Determination (R^2) = 0,9985090741				
Proportion of Variance Explained = 99,85090741%				
Adjusted coefficient of multiple determination (Ra^2) = 0,9984576629				
Durbin-Watson statistic = 1,67541090000503				
Regression Variable Results				
Variable	**Value**	**Standard Error**	**t-ratio**	**Prob(t)**
a	432,920779	24,0822345	17,97676951	0,0
b	0,912244655	0,005578539	163,5275296	0,0
c	0,946103365	0,013710962	69,00342561	0,0

Model Definition:				
Y = a*x1^b*c^x2				
Number of observations = 61				
Number of missing observations = 0				
Solver type: Nonlinear				
Nonlinear iteration limit = 250				
Diverging nonlinear iteration limit =10				
Number of nonlinear iterations performed = 6				
Residual tolerance = 0,0000000001				
Sum of Residuals = 65209,0736890338				
Average Residual = 1069,00120801695				
Residual Sum of Squares (Absolute) = 8517806890,83153				
Residual Sum of Squares (Relative) = 8517806890,83153				
Standard Error of the Estimate = 12118,5287678454				
Coefficient of Multiple Determination (R^2) = 0,9975395986				
Proportion of Variance Explained = 99,75395986%				
Adjusted coefficient of multiple determination (Ra^2) = 0,9974547572				
Durbin-Watson statistic = 1,20151002144642				
Regression Variable Results				
Variable	**Value**	**Standard Error**	**t-ratio**	**Prob(t)**
a	5122,542375	179,8557141	28,48139911	0,0
b	0,912223567	0,007169321	127,2398912	0,0
c	1,025281145	0,000472619	2169,359536	0,0

Abbildung 13 Vergleich der Gleichungen Gl. (3.9)und Gl. (3.10)

						Last	Beton vor Dübel			
Versuch	f_c [N/mm²]	b [mm]	h [mm]	t [mm]	Step [-]	u_x [mm]	u_x [mm]	V_{ges} [kN]	σ_u [N/mm²]	σ_u / f_c [-]
Modell Grund										
DübelH 304	18	80	40	60	9	0,1800	0,1565	191,5	59,84	3,3247
DübelH 314	28	80	40	60	12	0,2400	0,2045	289,6	90,50	3,2321
DübelH 324	38	80	40	60	14	0,2800	0,2329	384,4	120,13	3,1612
DübelH 334	48	80	40	60	17	0,3400	0,2791	485,7	151,78	3,1621
DübelH 344	58	80	40	60	19	0,3800	0,3054	576,5	180,16	3,1061
Modell Versrärkt										
DübelH 304a	18	80	40	60	13	0,2600	0,2263	278,1	86,91	4,8281
DübelH 334a	48	80	40	60	23	0,4600		709,8	221,81	4,6211
DübelH 364	63	80	40	60	29	0,5800	0,4651	923,7	288,66	4,5818
DübelH 354	68	80	40	60	30	0,6000	0,4812	985,7	308,03	4,5299
DübelH 374	73	80	40	60	32	0,6400	0,5060	1056,0	330,00	4,5205

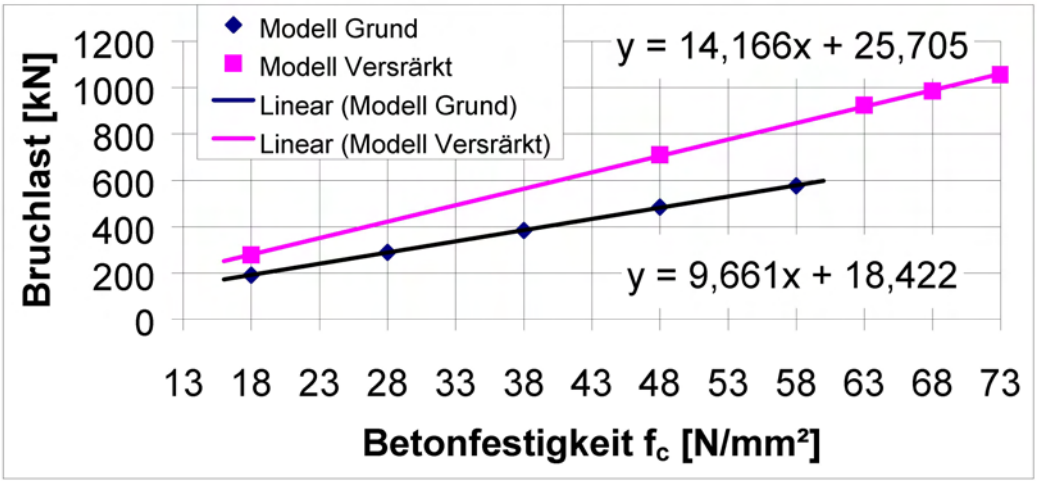


Abbildung 14 Einfluss f_c weiterer Betonfestigkeiten 3x4_2

Da sich eine quasi lineare Beziehung für f_c zeigt, wird zusätzlich für das Modell 3x4, also Dübel mit 4 cm Einbindetiefe und 60 mm Stärke die Bruchlast für fc = 18, 58, 63, 68 und 73 N/mm² untersucht.

Der entsprechende Befund ist in Abbildung 14 dargestellt. Bis f_c = 58 N/mm² kann ein nahezu ideal lineares Verhalten festgestellt werden. Der Sprung oberhalb dieses Wertes wird auf eine Modelländerung zurückgeführt. Dies bestätigt sich wenn auch niedere Betonfestigkeiten mit dem Modell mit verstärkter Lasteinleitung gerechnet werden, siehe Abbildung 14.

Eine gleichartige Untersuchung am System 1x4 zeigt ebenfalls eine gute Beschreibung der Werte mit einer Geraden. Exakter gesagt liegen die Werte auf einer quadratischen Parabel. Wobei der Fehler vernachlässigbar ist. Für niedere Betonfestigkeiten überschätz die Gerade den „exakten" Wert, für hohe unterschätzt sie diesen, siehe Abbildung 15.

Die Werte der verstärkten Systeme lassen sich mit folgender Gleichung aus den Werten des Grundsystems errechnen.

$$\begin{aligned} V_{Dübel,Grund} &= 9{,}661 \cdot f_c + 18{,}422 \\ V_{Dübel,Verstärkt} &= 14{,}166 \cdot f_c + 25{,}705 \\ V_{Dübel,Verstärkt} &= 1{,}466 \cdot V_{Dübel,Grund} - 1{,}307 \approx 1{,}46 \cdot V_{Dübel,Grund} \end{aligned} \qquad (3.11)$$

Auswertung3a Duebel H						Last	Beton vor Dübel			
Versuch	f_c [N/mm²]	b [mm]	h [mm]	t [mm]	Step [-]	u_x [mm]	u_x [mm]	V_{ges} [kN]	σ_u [N/mm²]	σ_u / f_c [-]
Modell Grund										
DübelH 104	18	80	40	20	11	0,2200	0,1949	181,8	56,81	3,1563
DübelH 114	28	80	40	20	14	0,2800	0,2433	266,4	83,25	2,9732
DübelH 124	38	80	40	20	18	0,3600	0,3116	351,3	109,78	2,8890
DübelH 134	48	80	40	20	21	0,4200 f		428,9	134,03	2,7923
DübelH 144	58	80	40	20	23	0,4600	0,3908	490,0	153,13	2,6401
DübelH 154	68	80	40	20	24	0,4800	0,4027	542,0	169,38	2,4908

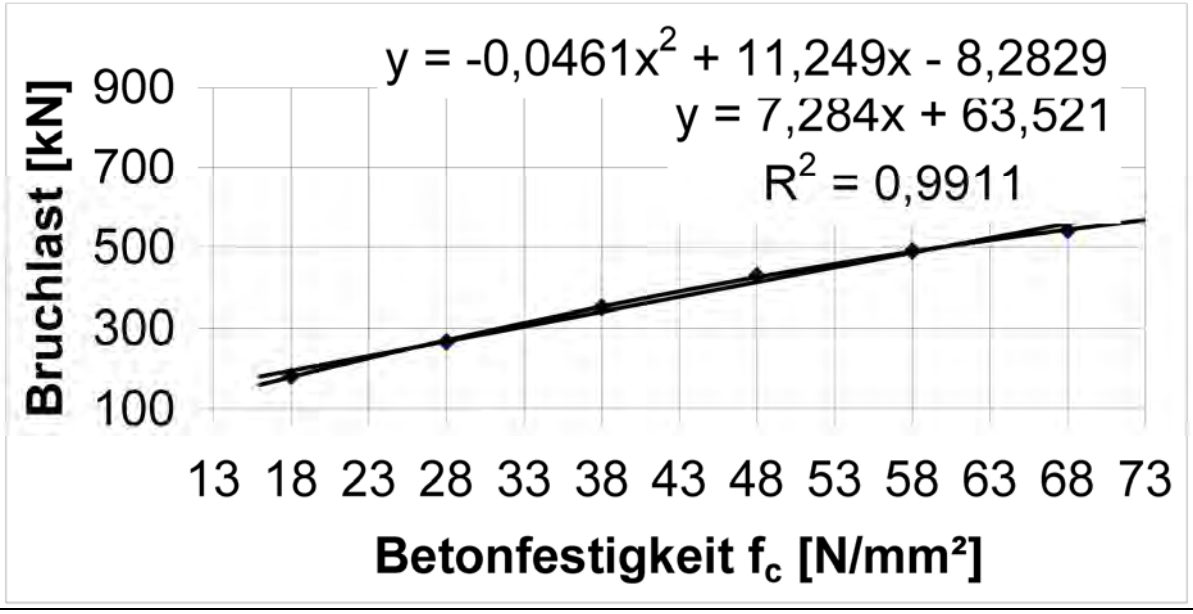


Abbildung 15 Einfluss f_c weiterer Betonfestigkeiten 1x4

Betrachtung mit Korrektur des Achsenabschnitts:

Mit:

- x1 = $h_{Dübel}$ + 4,2
- x2 = f_c
- Y = V_{Bruch}

erhält man mögliche Lösungen nach Tabelle 11. Hiervon sind sicherlich wiederum nur die Gleichungen auf Rang 8 (3.12)und 11 interessant da sie entsprechend einfach sind und in der Genauigkeit den anderen nur numerisch unterlegen sind. Der Gleichungstyp von Rang 10 (siehe oben kann sich auf Rang 8 verbessern, der Gleichungstyp auf Rang 11 behält seinen Platz. Im Weiteren sollen die Gleichungen nach Rang 10 und Rang 11 betrachtet werden. Praktisch ist die Abweichung für alle aufgeführten Gleichungen vernachlässigbar. Das Fehlerquadrat liegt für die Gleichungen auf Rang 8 jetzt bei 0,9995 statt 0,9985 und für Rang 11 immerhin noch bei 0,9976 statt 0,9975. Das Ideal von 1,0 wird von der Gleichung Rang 8 also nahezu erreicht. (Jeweils bezogen auf die Werte aus 0)

Rank	Model	RSS	R^2	Ra^2
1	a+b*x1+c*log(x2)+d*x1^2+e*log(x2)^2+f*x1*log(x2)+g*x1^3+h*log(x2)^3+i*x1*log(x2)^2+j*x1^2*log(x2)	1699222150	0,999519614	0,99943804
2	a+b*x1+c*x2+d*x1^2+e*x2^2+f*x1*x2+g*x1^3+h*x2^3+i*x1*x2^2+j*x1^2*x2	1712800612	0,999515776	0,999433549
3	a+b*log(x1)+c*log(x2)+d*log(x1)^2+e*log(x2)^2+f*log(x1)*log(x2)+g*log(x1)^3+h*log(x2)^3+i*log(x1)*log(x2)^2	1783477678	0,999495795	0,999410175
4	a+b*x1+c/x2+d*x1^2+e/x2^2+f*x1/x2+g*x1^3+h/x2^3+i*x1/x2^2+j*x1^2/x2	1811444177	0,999487888	0,999400926
5	a+b*log(x1)+c*x2+d*log(x1)^2+e*x2^2+f*log(x1)*x2+g*log(x1)^3+h*x2^3+i*log(x1)*x2^2+j*log(x1)^2*x2	1840844751	0,999479576	0,999391203
6	a+b*log(x1)+c/x2+d*log(x1)^2+e/x2^2+f*log(x1)/x2+g*log(x1)^3+h/x2^3+i*log(x1)/x2^2+j*log(x1)^2/x2	1890510493	0,999465536	0,999374777
7	a+b*x1+c*x2+d*x1^2+e*x2^2+f*x1*x2	1913186567	0,999459125	0,99941168
8	a*x1^b*x2^c	1960619662	0,999445715	0,999427239
9	a+b*x1+c*log(x2)+d*x1^2+e*log(x2)^2+f*x1*log(x2)	2226167656	0,999370642	0,999315435
10	a+b*x1+c/x2+d*x1^2+e/x2^2+f*x1/x2	6154774667	0,998259989	0,998107357
11	a*x1^b*c^x2	8320148073	0,997647819	0,997569413
12	a+b*log(x1)+c*log(x2)+d*log(x1)^2+e*log(x2)^2+f*log(x1)*log(x2)	17896189883	0,994940585	0,994496776
13	a+b*log(x1)+c*x2+d*log(x1)^2+e*x2^2+f*log(x1)*x2	18195961775	0,994855836	0,994404594
14	a+b*log(x1)+c/x2+d*log(x1)^2+e/x2^2+f*log(x1)/x2	18628350010	0,994733596	0,994271631
15	a+b/x1+c*x2+d/x1^2+e*x2^2+f*x2/x1+g/x1^3+h*x2^3+i*x2^2/x1+j*x2/x1^2	26601861618	0,992479412	0,991202331
16	a+b/x1+c*log(x2)+d/x1^2+e*log(x2)^2+f*log(x2)/x1+g/x1^3+h*log(x2)^3+i*log(x2)^2/x1+j*log(x2)/x1^2	26718037228	0,992446568	0,99116391
17	a+b/x1+c/x2+d/x1^2+e/x2^2+f/(x1*x2)+g/x1^3+h/x2^3+i/(x1*x2^2)+j/(x1^2*x2)	27063331076	0,992348951	0,991049716
18	a+b*log(x1)+c*log(x1)^2+d*log(x1)^3+e*log(x1)^4+f*log(x2)+g*log(x2)^2+h*log(x2)^3+i*log(x2)^4+j*log(x2)^5	1,22787E+11	0,965287073	0,959392425
19	a+b*x1+c*x1^2+d/x2+e/x2^2+f/x2^3+g/x2^4+h/x2^5	1,23002E+11	0,965226342	0,960800603
20	a+b/x1+c/x1^2+d/x1^3+e/x1^4+f/x1^5+g/x2+h/x2^2+i/x2^3+j/x2^4+k/x2^5	1,23061E+11	0,965209525	0,95851905

Tabelle 11 Rangfolge für Gleichungen Bruchwerte Teil 2

$$V_{Bruch} = 272,46 \cdot \left(h_{Dübel} + 4,2\right)^{1,0073} \cdot f_c^{0,9451} \qquad (3.12)$$

$$V_{Bruch} = 3172,69 \cdot \left(h_{Dübel} + 4,2\right)^{1,0127} \cdot 1,0250^{f_c} \qquad (3.13)$$

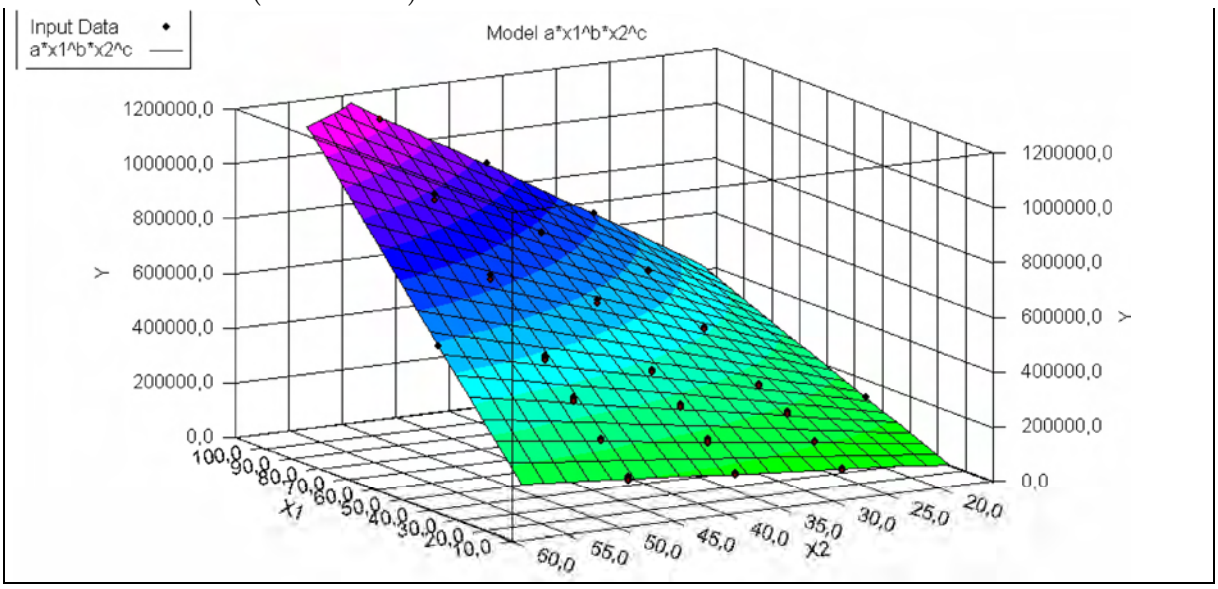


Abbildung 16 Darstellung Gleichung Rang 8/2

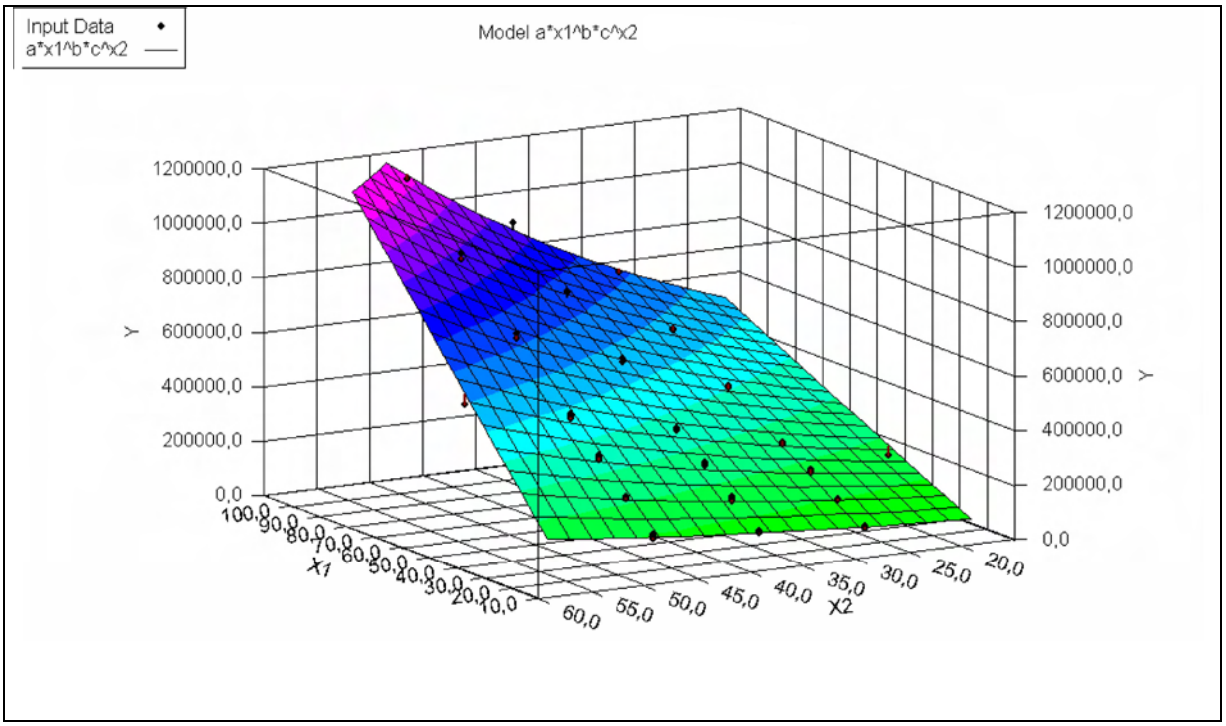
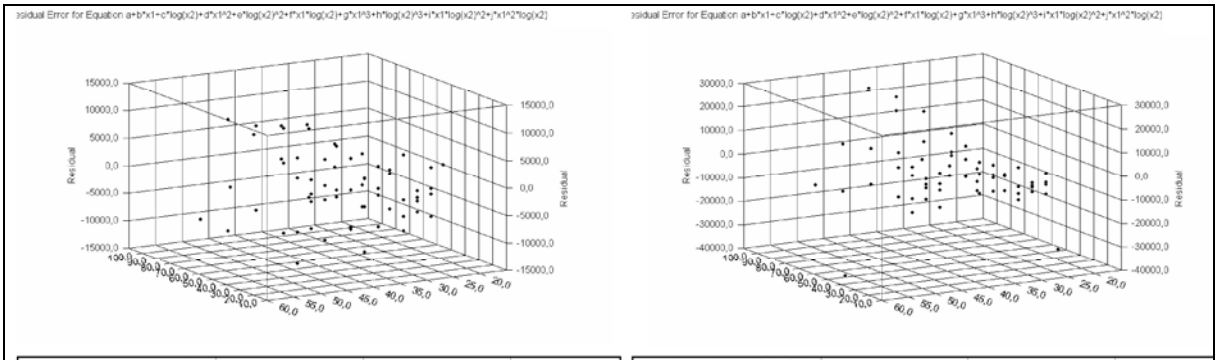


Abbildung 17 Darstellung Gleichung Rang 11/2



Equation ID: a*x1^b*x2^c				
Model Definition:				
Y = a*x1^b*x2^c				
Number of observations = 63				
Number of missing observations = 0				
Solver type: Nonlinear				
Nonlinear iteration limit = 250				
Diverging nonlinear iteration limit =10				
Number of nonlinear iterations performed = 4				
Residual tolerance = 0,0000000001				
Sum of Residuals = -5818,30550437528				
Average Residual = -92,3540556250045				
Residual Sum of Squares (Absolute) = 1960619661,76367				
Residual Sum of Squares (Relative) = 1960619661,76367				
Standard Error of the Estimate = 5716,37948029413				
Coefficient of Multiple Determination (R^2) = 0,999445715				
Proportion of Variance Explained = 99,9445715%				
Adjusted coefficient of multiple determination (Ra^2) = 0,9994272389				
Durbin-Watson statistic = 1,51646917797172				
Regression Variable Results				
Variable	**Value**	**Standard Error**	**t-ratio**	**Prob(t)**
a	272,4550607	8,971213422	30,36992299	0,0
b	1,007293119	0,003622177	278,0905549	0,0
c	0,945075933	0,007778569	121,4973979	0,0

Equation ID: a*x1^b*c^x2				
Model Definition:				
Y = a*x1^b*c^x2				
Number of observations = 63				
Number of missing observations = 0				
Solver type: Nonlinear				
Nonlinear iteration limit = 250				
Diverging nonlinear iteration limit =10				
Number of nonlinear iterations performed = 6				
Residual tolerance = 0,0000000001				
Sum of Residuals = -2170,38603963374				
Average Residual = -34,4505720576784				
Residual Sum of Squares (Absolute) = 8320148072,53409				
Residual Sum of Squares (Relative) = 8320148072,53409				
Standard Error of the Estimate = 11775,7859415937				
Coefficient of Multiple Determination (R^2) = 0,9976478186				
Proportion of Variance Explained = 99,76478186%				
Adjusted coefficient of multiple determination (Ra^2) = 0,9975694126				
Durbin-Watson statistic = 0,754480710977551				
Regression Variable Results				
Variable	**Value**	**Standard Error**	**t-ratio**	**Prob(t)**
a	3172,68802	115,2489627	27,52899416	0,0
b	1,012652659	0,007495857	135,0949761	0,0
c	1,024950393	0,000420812	2435,651405	0,0

Abbildung 18 Vergleich der Gleichungen x/2

Die Gleichung (3.14) bietet noch Potential zur Vereinfachung. In einem Ersten Schritt wird die Potenz der Dübeleinbindetiefe ($h_{Dübel}$ +4,2) zu 1,0 gesetzt. Damit ergibt sich Gleichung (3.14) wobei die verbleibenden Parameter neu berechnet werden. Weiterhin liegt es nahe die Potenz von f_c ebenfalls zu 1,0 zu setzen. Es ergibt sich dann die Gleichung(3.15).

$$V_{Bruch} = 281{,}27 \cdot \left(h_{Dübel} + 4{,}2\right)^{1{,}0} \cdot f_c^{0{,}9447} \qquad (3.14)$$

$$V_{Bruch} = 229{,}14 \cdot \left(h_{Dübel} + 4{,}2\right)^{1{,}0} \cdot f_c^{1{,}0} \qquad (3.15)$$

Vergleicht man die Gleichungen (3.14) und(3.15), wobei Gleichung (3.14) die Werte am besten annähert, Gleichung (3.15) jedoch bedeutend einfacher ausgedrückt ist, so ergibt sich kein signifikanter Unterschied. Die Abweichungen der Wertetafel für Gleichung (3.15) sind in Tabelle 13 aufgelistet, diejenigen für Gleichungen (3.14) in der entsprechenden Tabelle 14. Betrachtet man die absoluten Fehler, wie sie in Tabelle 12 gelistet werden, so können beide Gleichungen als gleichwertig angesehen werden, und Gleichung (3.15) kann als einfachere Vorzugslösung ausgewählt werden.

	maximaler Fehler	minimaler Fehler
Gleichung (3.14)	5,4 %	-5,1 %
Gleichung (3.15)	5,9 %	-6,1 %

Tabelle 12 Fehlerbericht für Gl (3.14) und Gl (3.15)

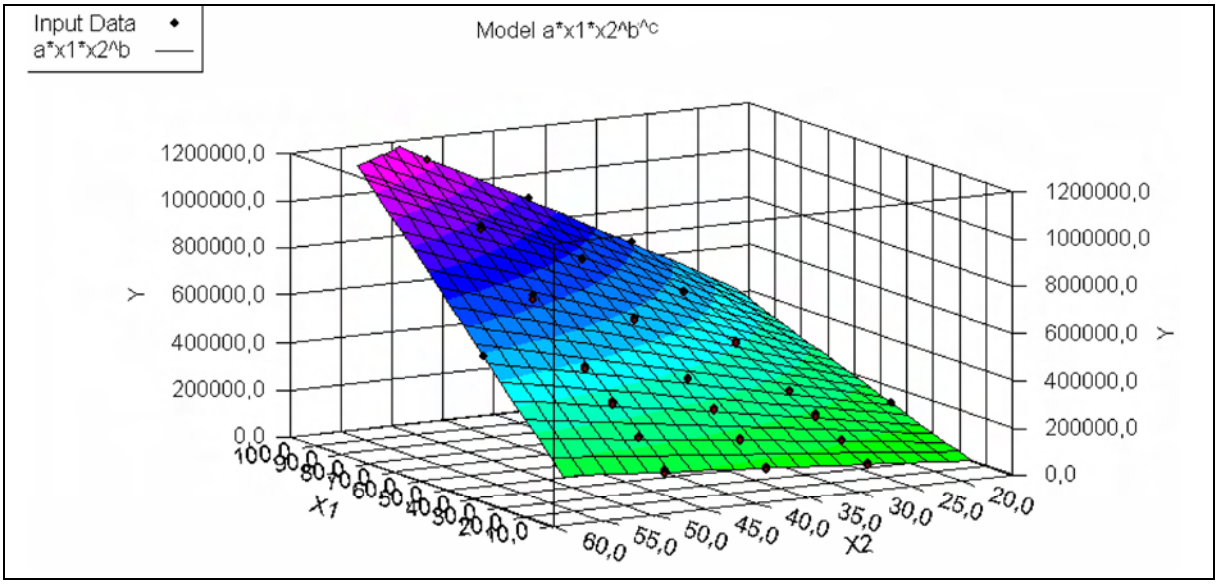


Abbildung 19 Darstellung Gleichung (3.14)

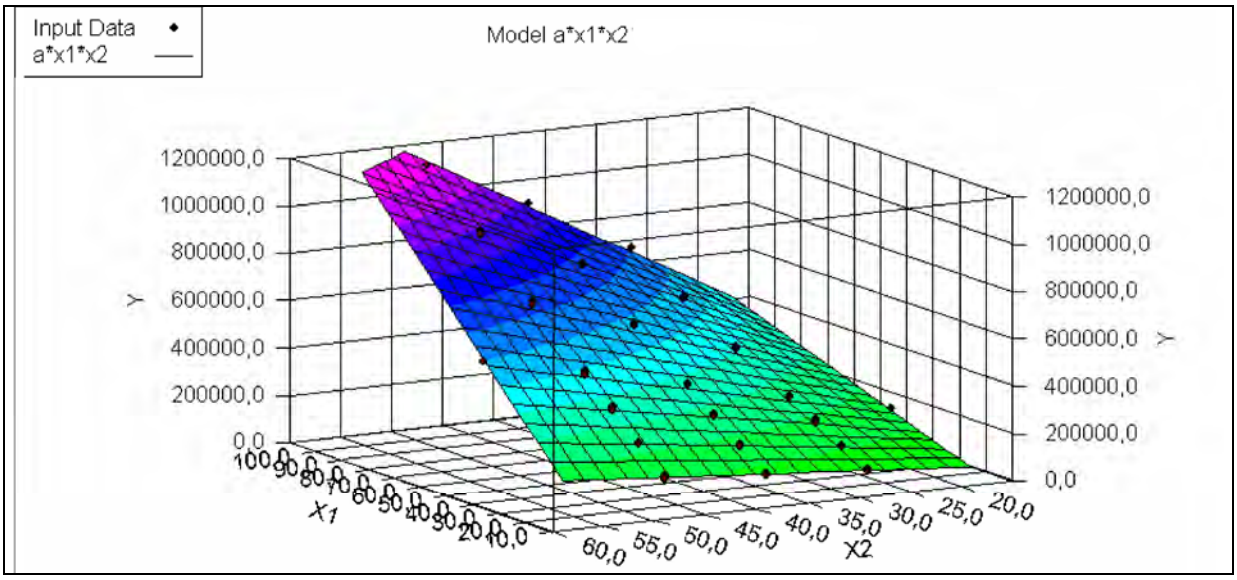
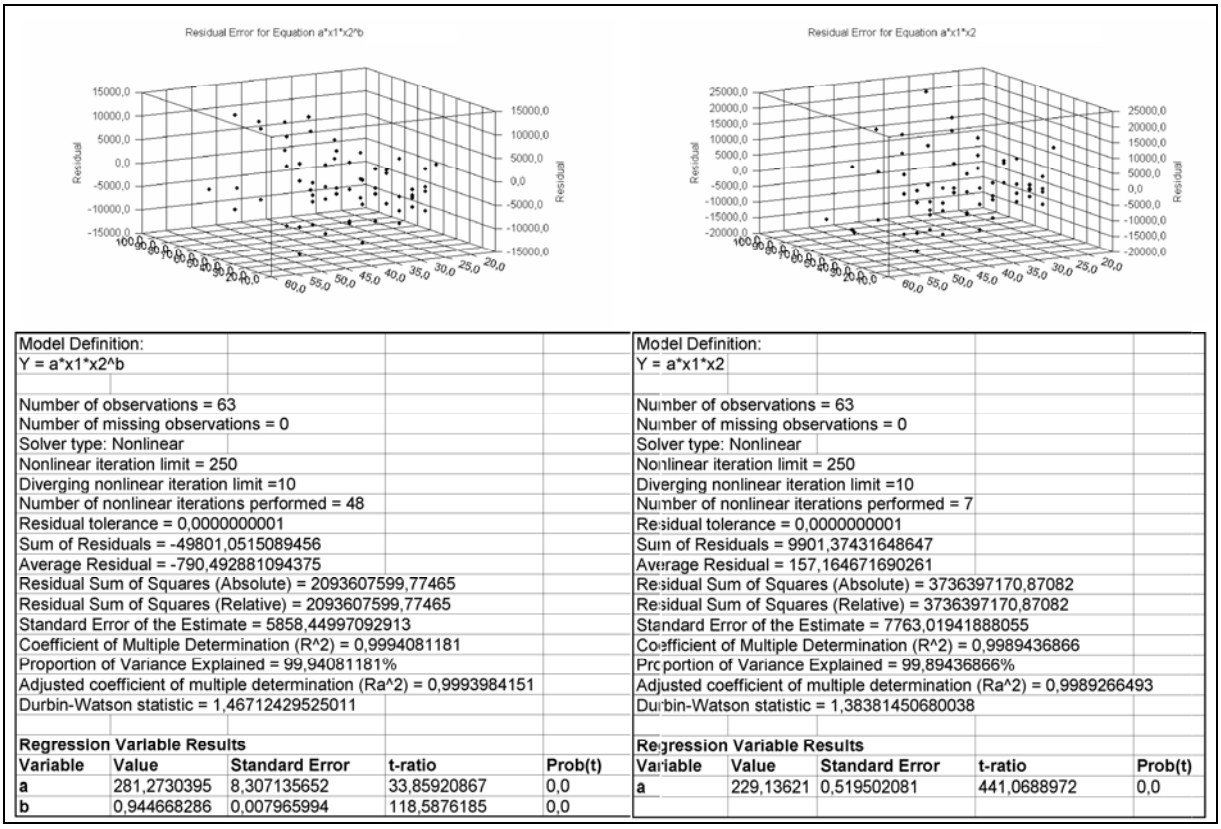


Abbildung 20 Darstellung Gleichung (3.15)



Model Definition:				
Y = a*x1*x2^b				
Number of observations = 63				
Number of missing observations = 0				
Solver type: Nonlinear				
Nonlinear iteration limit = 250				
Diverging nonlinear iteration limit =10				
Number of nonlinear iterations performed = 48				
Residual tolerance = 0,0000000001				
Sum of Residuals = -49801,0515089456				
Average Residual = -790,492881094375				
Residual Sum of Squares (Absolute) = 2093607599,77465				
Residual Sum of Squares (Relative) = 2093607599,77465				
Standard Error of the Estimate = 5858,44997092913				
Coefficient of Multiple Determination (R^2) = 0,9994081181				
Proportion of Variance Explained = 99,94081181%				
Adjusted coefficient of multiple determination (Ra^2) = 0,9993984151				
Durbin-Watson statistic = 1,46712429525011				
Regression Variable Results				
Variable	**Value**	**Standard Error**	**t-ratio**	**Prob(t)**
a	281,2730395	8,307135652	33,85920867	0,0
b	0,944668286	0,007965994	118,5876185	0,0

Model Definition:				
Y = a*x1*x2				
Number of observations = 63				
Number of missing observations = 0				
Solver type: Nonlinear				
Nonlinear iteration limit = 250				
Diverging nonlinear iteration limit =10				
Number of nonlinear iterations performed = 7				
Residual tolerance = 0,0000000001				
Sum of Residuals = 9901,37431648647				
Average Residual = 157,164671690261				
Residual Sum of Squares (Absolute) = 3736397170,87082				
Residual Sum of Squares (Relative) = 3736397170,87082				
Standard Error of the Estimate = 7763,01941888055				
Coefficient of Multiple Determination (R^2) = 0,9989436866				
Proportion of Variance Explained = 99,89436866%				
Adjusted coefficient of multiple determination (Ra^2) = 0,9989266493				
Durbin-Watson statistic = 1,38381450680038				
Regression Variable Results				
Variable	**Value**	**Standard Error**	**t-ratio**	**Prob(t)**
a	229,13621	0,519502081	441,0688972	0,0

Abbildung 21 Vergleich der Gleichungen (3.14) und (3.15)

	A	B	C	D	E	F	G
1					min Error	-6,10%	
2					max Error	5,93%	
3	X1 Value	X2 Value	Y Value	Calc Y	Residual	% Error	Abs Residual
4	14,2	48	147200	156179,2	-8979,24	-6,10003	8979,240704
5	24,2	38	199800	210713,7	-10913,7	-5,46229	10913,65867
6	34,2	48	358900	376150	-17250	-4,80635	17250,00226
7	14,2	38	118000	123641,9	-5641,9	-4,78127	5641,898891
8	14,2	28	87900	91104,56	-3204,56	-3,64568	3204,557078
9	24,2	48	257100	266164,6	-9064,62	-3,52572	9064,621482
10	34,2	48	364700	376150	-11450	-3,13957	11450,00226
11	44,2	48	472900	486135,4	-13235,4	-2,79877	13235,38304
12	34,2	38	290500	297785,4	-7285,42	-2,50789	7285,418456
13	34,2	38	290900	297785,4	-6885,42	-2,36694	6885,418456
14	34,2	28	214400	219420,8	-5020,83	-2,34181	5020,834652
15	84,2	48	908600	926076,9	-17476,9	-1,9235	17476,90615
16	44,2	58	576500	587413,6	-10913,6	-1,89308	10913,58784
17	64,2	48	694500	706106,1	-11606,1	-1,67115	11606,14459
18	24,2	48	262000	266164,6	-4164,62	-1,58955	4164,621482
19	104,2	48	1129000	1146048	-17047,7	-1,50998	17047,6677
20	24,2	28	153200	155262,7	-2062,7	-1,34641	2062,695865
21	24,2	38	208000	210713,7	-2713,66	-1,30464	2713,658673
22	34,2	28	217000	219420,8	-2420,83	-1,11559	2420,834652
23	14,2	48	154500	156179,2	-1679,24	-1,08689	1679,240704
24	24,2	48	263400	266164,6	-2764,62	-1,04959	2764,621482
25	44,2	38	383100	384857,2	-1757,18	-0,45867	1757,178238
26	34,2	48	374500	376150	-1650	-0,44059	1650,00226
27	64,2	38	556900	559000,7	-2100,7	-0,37721	2100,697803
28	44,2	28	283100	283579	-478,973	-0,16919	478,9734385
29	44,2	38	384400	384857,2	-457,178	-0,11893	457,178238
30	44,2	48	485700	486135,4	-435,383	-0,08964	435,3830374
31	34,2	38	297600	297785,4	-185,418	-0,0623	185,4184556
32	24,2	48	266000	266164,6	-164,621	-0,06189	164,621482
33	24,2	28	155200	155262,7	-62,6959	-0,0404	62,69586451
34	14,2	38	123800	123641,9	158,1011	0,127707	158,1011091
35	34,2	28	220000	219420,8	579,1653	0,263257	579,1653485
36	84,2	48	928800	926076,9	2723,094	0,293184	2723,093852
37	24,2	28	155800	155262,7	537,3041	0,344868	537,3041355
38	64,2	28	413400	411895,3	1504,749	0,363993	1504,748988
39	64,2	48	709800	706106,1	3693,855	0,520408	3693,855407
40	34,2	48	378200	376150	2049,998	0,542041	2049,99774
41	14,2	48	157100	156179,2	920,7593	0,586098	920,7592957
42	84,2	38	738400	733144,2	5255,783	0,71178	5255,782633
43	14,2	28	92000	91104,56	895,4429	0,973308	895,4429225
44	14,2	38	125000	123641,9	1358,101	1,086481	1358,101109
45	104,2	38	917400	907287,7	10112,26	1,102274	10112,26307
46	24,2	28	157000	155262,7	1737,304	1,106563	1737,304135
47	24,2	38	213100	210713,7	2386,341	1,119822	2386,341327
48	24,2	38	213200	210713,7	2486,341	1,166201	2486,341327
49	44,2	48	492000	486135,4	5864,617	1,191995	5864,616963
50	64,2	28	417400	411895,3	5504,749	1,318819	5504,748988
51	84,2	38	744300	733144,2	11155,78	1,498829	11155,78263
52	64,2	38	569400	559000,7	10399,3	1,826361	10399,3022
53	34,2	38	303400	297785,4	5614,582	1,850554	5614,581544
54	44,2	38	392400	384857,2	7542,822	1,922228	7542,821762
55	84,2	28	550900	540211,5	10688,47	1,940184	10688,47141
56	14,2	28	93000	91104,56	1895,443	2,038111	1895,442922
57	44,2	28	289600	283579	6021,027	2,079084	6021,026562
58	44,2	28	290300	283579	6721,027	2,3152	6721,026562
59	64,2	28	423100	411895,3	11204,75	2,648251	11204,74899
60	84,2	28	555000	540211,5	14788,47	2,664589	14788,47141
61	104,2	28	688900	668527,8	20372,19	2,957206	20372,19384
62	14,2	48	161800	156179,2	5620,759	3,473893	5620,759296
63	34,2	28	228200	219420,8	8779,165	3,847136	8779,165348
64	14,2	38	129100	123641,9	5458,101	4,227809	5458,101109
65	44,2	18	191500	182300,8	9199,231	4,803776	9199,231361
66	14,2	28	96850	91104,56	5745,443	5,932311	5745,442922

Tabelle 13 Werte Gleichung (3.15)

	A	B	C	D	E	F	G
1					min Error	-5,10%	
2					max Error	5,40%	
3	X1 Value	X2 Value	Y Value	Calc Y	Residual	% Error	Abs Residual
4	24,2	38	199800	209999,4	-10199,4	-5,1048	10199,39
5	14,2	28	87900	91973,2	-4073,2	-4,6339	4073,19
6	14,2	38	118000	122744,6	-4744,6	-4,0209	4744,62
7	14,2	48	147200	153069,1	-5869,1	-3,9872	5869,14
8	34,2	28	214400	222937,5	-8537,5	-3,9820	8537,46
9	34,2	48	358900	371030,4	-12130,4	-3,3799	12130,36
10	34,2	28	217000	222937,5	-5937,5	-2,7362	5937,46
11	24,2	28	153200	157353,6	-4153,6	-2,7113	4153,64
12	34,2	38	290500	297525,6	-7025,6	-2,4184	7025,56
13	34,2	38	290900	297525,6	-6625,6	-2,2776	6625,56
14	44,2	28	283100	288663,3	-5563,3	-1,9652	5563,34
15	24,2	48	257100	261880,5	-4780,5	-1,8594	4780,53
16	34,2	48	364700	371030,4	-6330,4	-1,7358	6330,36
17	64,2	28	413400	420423,2	-7023,2	-1,6989	7023,23
18	44,2	48	472900	480416,6	-7516,6	-1,5895	7516,64
19	24,2	28	155200	157353,6	-2153,6	-1,3877	2153,64
20	34,2	28	220000	222937,5	-2937,5	-1,3352	2937,46
21	84,2	48	908600	919494,5	-10894,5	-1,1990	10894,49
22	24,2	28	155800	157353,6	-1553,6	-0,9972	1553,64
23	24,2	38	208000	209999,4	-1999,4	-0,9612	1999,39
24	104,2	48	1129000	1139672	-10671,7	-0,9452	10671,74
25	64,2	38	556900	561084,1	-4184,1	-0,7513	4184,06
26	64,2	48	694500	699702,0	-5202,0	-0,7490	5201,99
27	64,2	28	417400	420423,2	-3023,2	-0,7243	3023,23
28	44,2	38	383100	385241,3	-2141,3	-0,5589	2141,32
29	84,2	28	550900	552487,8	-1587,8	-0,2882	1587,85
30	24,2	28	157000	157353,6	-353,6	-0,2253	353,64
31	44,2	38	384400	385241,3	-841,3	-0,2189	841,32
32	34,2	38	297600	297525,6	74,4	0,0250	74,44
33	14,2	28	92000	91973,2	26,8	0,0291	26,81
34	24,2	48	262000	261880,5	119,5	0,0456	119,47
35	84,2	38	738400	737333,5	1066,5	0,1444	1066,51
36	44,2	28	289600	288663,3	936,7	0,3234	936,66
37	44,2	58	576500	574501,0	1999,0	0,3468	1999,03
38	104,2	38	917400	913891,4	3508,6	0,3824	3508,57
39	84,2	28	555000	552487,8	2512,2	0,4526	2512,15
40	44,2	28	290300	288663,3	1636,7	0,5638	1636,66
41	24,2	48	263400	261880,5	1519,5	0,5769	1519,47
42	104,2	28	688900	684783,6	4116,4	0,5975	4116,36
43	64,2	28	423100	420423,2	2676,8	0,6327	2676,77
44	44,2	18	191500	190127,6	1372,4	0,7166	1372,37
45	14,2	38	123800	122744,6	1055,4	0,8525	1055,38
46	14,2	48	154500	153069,1	1430,9	0,9261	1430,86
47	34,2	48	374500	371030,4	3469,6	0,9265	3469,64
48	84,2	38	744300	737333,5	6966,5	0,9360	6966,51
49	84,2	48	928800	919494,5	9305,5	1,0019	9305,51
50	44,2	48	485700	480416,6	5283,4	1,0878	5283,36
51	14,2	28	93000	91973,2	1026,8	1,1041	1026,81
52	64,2	48	709800	699702,0	10098,0	1,4227	10098,01
53	24,2	38	213100	209999,4	3100,6	1,4550	3100,61
54	64,2	38	569400	561084,1	8315,9	1,4605	8315,94
55	24,2	38	213200	209999,4	3200,6	1,5012	3200,61
56	24,2	48	266000	261880,5	4119,5	1,5487	4119,47
57	14,2	38	125000	122744,6	2255,4	1,8043	2255,38
58	44,2	38	392400	385241,3	7158,7	1,8243	7158,68
59	34,2	48	378200	371030,4	7169,6	1,8957	7169,64
60	34,2	38	303400	297525,6	5874,4	1,9362	5874,44
61	34,2	28	228200	222937,5	5262,5	2,3061	5262,54
62	44,2	48	492000	480416,6	11583,4	2,3543	11583,36
63	14,2	48	157100	153069,1	4030,9	2,5658	4030,86
64	14,2	38	129100	122744,6	6355,4	4,9228	6355,38
65	14,2	28	96850	91973,2	4876,8	5,0354	4876,81
66	14,2	48	161800	153069,1	8730,9	5,3961	8730,86

Tabelle 14 Werte Gleichung (3.12)

Zusammenstellung der Auswahl

Ohne Korrektur

$$V_{Bruch} = 432,92 \cdot h_{Dübel}^{0,912} \cdot f_c^{0,946} \tag{3.16}$$

$$V_{Bruch} = 5122,54 \cdot h_{Dübel}^{0,912} \cdot 1,025^{f_c} \tag{3.17}$$

Mit Korrektur

$$V_{Bruch} = 272,46 \cdot \left(h_{Dübel} + 4,2\right)^{1,0073} \cdot f_c^{0,9451} \tag{3.18}$$

$$V_{Bruch} = 3172,69 \cdot \left(h_{Dübel} + 4,2\right)^{1,0127} \cdot 1,0250^{f_c} \tag{3.19}$$

$$V_{Bruch} = 281,27 \cdot \left(h_{Dübel} + 4,2\right)^{1,0} \cdot f_c^{0,9447} \tag{3.20}$$

$$V_{Bruch} = 229,14 \cdot \left(h_{Dübel} + 4,2\right)^{1,0} \cdot f_c^{1,0}$$

oder mit $b_{Dübel} = 200$ mm

$$V_{Bruch} = 1,146 \cdot b_{Dübel} \cdot \left(h_{Dübel} + 4,2\right) \cdot f_c \tag{3.21}$$

	maximaler Fehler	minimaler Fehler
Gleichung (3.18)	5,40 %	-5,10 %
Gleichung (3.20)	5,40 %	-5,10 %
Gleichung (3.21)	5,90 %	-6,10 %

Tabelle 15 Zusammenstellung der Fehler für den 1ten Teil.

Wägt man den auftretenden Fehler gegen die „Benutzerfreundlichkeit“ der Gleichungen so fällt die Wahl auf die Gleichung (3.21).

A3.3.3 AUSWERTUNG KURVENTEIL 2

Der 2te Teil der jeweiligen Kurven der aufnehmbaren Bruchlast aufgetragen über die Dübeleinbindetiefe $h_{Dübel}$ ist deutlich abgeflacht. Aus theoretischen Überlegungen erscheint es angebracht hier eine Geradensteigung von Null generell zu unterstellen. Damit lässt sich dann eine Grenzbruchlast näherungsweise unabhängig von der Einbindetiefe angeben. Abbildung 22 veranschaulicht diesen Ansatz. Es ist offensichtlich, dass auf den geringen Anstieg der Bruchlast mit wachsender Einbindetiefe verzichtet werden kann, ohne die Genauigkeit des Verfahrens nennenswert zu reduzieren. Anmerkung: Werte finden sich in „Auswertung3b Duebel H.xls“

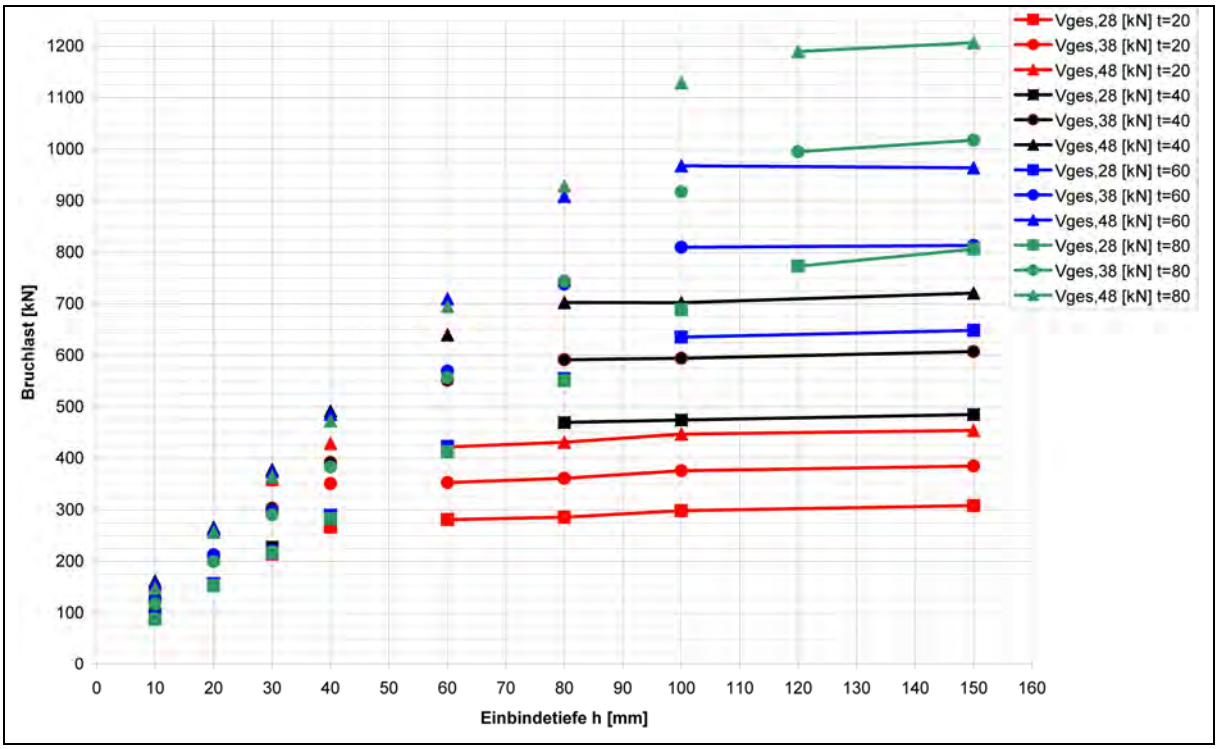


Abbildung 22 Geraden im Kurventeil 2

Somit entfällt die Betrachtung der Dübeleinbindtiefe $h_{Dübel}$ als Kurvenparameter und es kann wieder ein System mit 2 Parametern untersucht werden. Es zeigt sich, dass lediglich bei einem linearen Ansatz der Dübelstärke $t_{Dübel}$, gute Annäherungen für alle untersuchten Werte erreicht werden kann. Betrachtet man den Einfluss der Dübelstärke $t_{Dübel}$ im Ansatz t^3, also als Biegesteifigkeit $I_{Biegung}$, so lässt sich keine befriedigende Kurvenannäherung finden. Bezogen auf Dübelstärke t, setzt man als Parameter:

- x1 = f_c
- x2 = $t_{Dübel}$
- Y = V_{Bruch}

Es ergeben sich Möglichkeiten nach Tabelle 16. Die Gleichungen (3.22) und (3.23) liegen mit $R^2 > 0{,}995$ gleichauf, wobei Gleichungen (3.22) eine plausiblere Form hat und sich ohne nennenswerte Abstriche in der Genauigkeit auf Gleichung (3.24) umschreiben lässt.

Rank	Model	Residual Avg.	RSS	R^2	Ra^2
1	a*x1^b*x2^c	324,8109469	4199339373	0,998124705	0,997999685
2	a*b^x1*x2^c	249,2884628	7164928844	0,996800364	0,996587055
3	a*x1^b*c^x2	-1793,273684	59201745899	0,973562328	0,971799817
4	a+b/x1+c*x2	-7,12603E-10	64003010642	0,971418232	0,96951278
5	a+b*x1+c*log(x2)	-1,48165E-10	1,03878E+11	0,953611169	0,950518581
6	a+b/x1+c/x2	2,9633E-10	2,56014E+11	0,885672005	0,878050138
Rank	**Model**	**Residual Avg.**	**RSS**	**R^2**	**Ra^2**
1	a*x1^b*x2^c	324,8109469	4199339373	0,998124705	0,997999685
2	a*x1^0,75*x2^0,75	2417,559647	5536818512	0,997527428	0,99745016
3	a*b^x1*x2^c	249,2884628	7164928844	0,996800364	0,996587055

Tabelle 16 mögliche Gleichungen Teil 2

$$V_{Bruch,\max} = 2615{,}78 \cdot f_c^{0{,}7569} \cdot t_{Dübel}^{0{,}7285}$$

oder mit $b_{Dübel} = 200$ mm

$$V_{Bruch,\max} = 13{,}08 \cdot f_c^{0{,}7569} \cdot t_{Dübel}^{0{,}7285} \cdot b_{Dübel} \qquad (3.22)$$

$$V_{Bruch,\max} = 18859{,}18 \cdot 1{,}0202^{f_c} \cdot t_{Dübel}^{0{,}7285} \qquad (3.23)$$

$$V_{Bruch,\max} = 2462{,}14 \cdot f_c^{0{,}7500} \cdot t_{Dübel}^{0{,}7500}$$

oder

$$V_{Bruch,\max} = 2462{,}14 \cdot \sqrt[4]{\left(f_c \cdot t_{Dübel}\right)^3} \qquad (3.24)$$

entsprechend mit $b_{Dübel} = 200$ mm

$$V_{Bruch,\max} = 12{,}31 \cdot b_{Dübel} \cdot \sqrt[4]{\left(f_c \cdot t_{Dübel}\right)^3}$$

	maximaler Fehler	minimaler Fehler
Gleichung (3.22)	6,33 %	-3,12 %
Gleichung (3.24)	8,12 %	-3,68 %

Tabelle 17 Fehlerbericht für Gl. (3.22) und Gl. (3.24).

Da in den Gleichungen der Term $t_{Dübel}^3$ auftauchen soll, sollen die Gleichung (3.24) auch für eine Schreibweise mit I und f_{Fuss} untersucht werden.

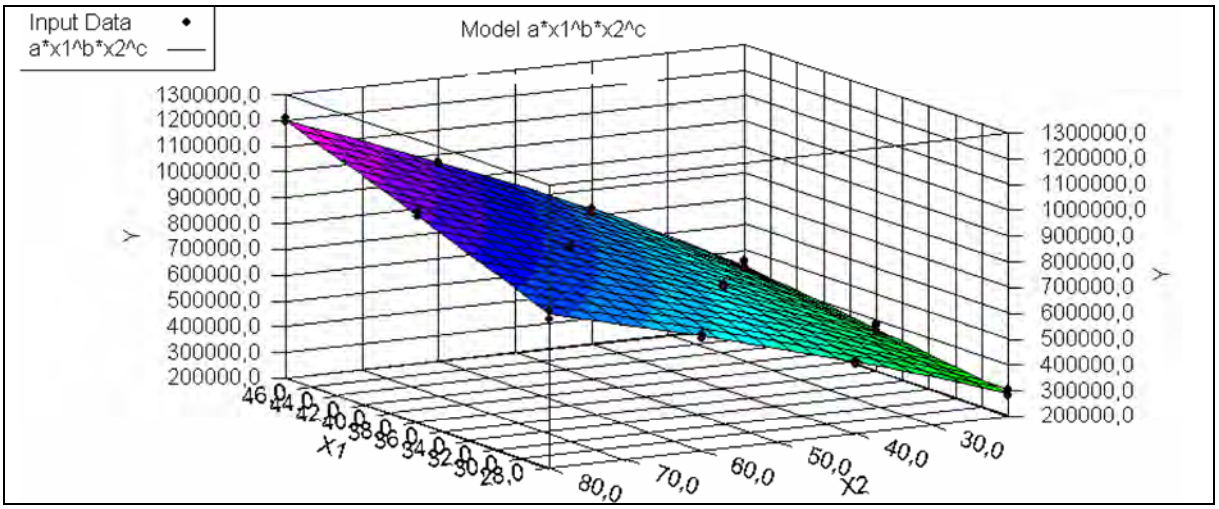


Abbildung 23 Darstellung Gleichung (3.22).

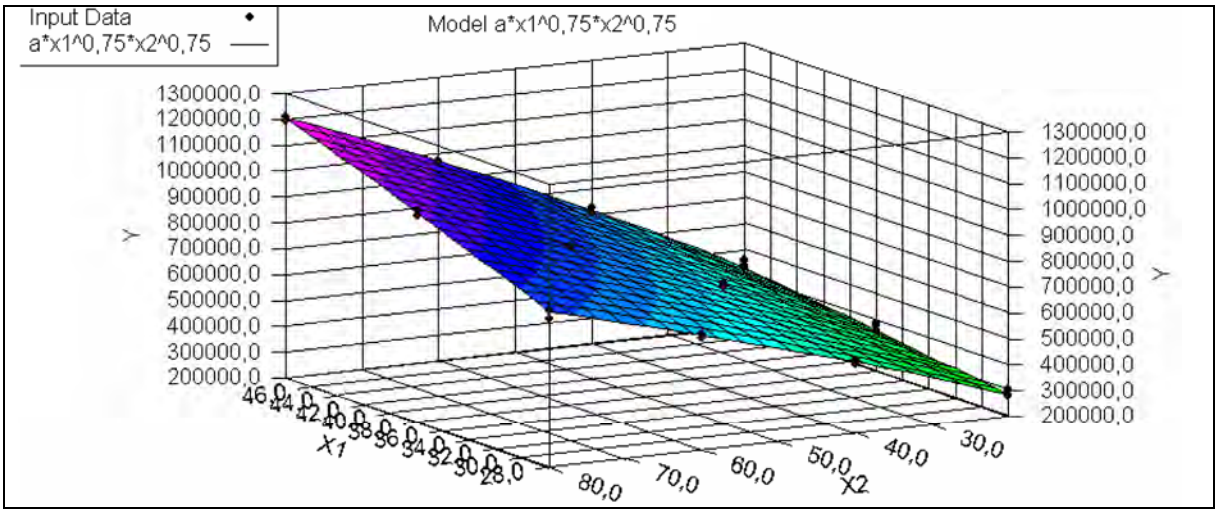
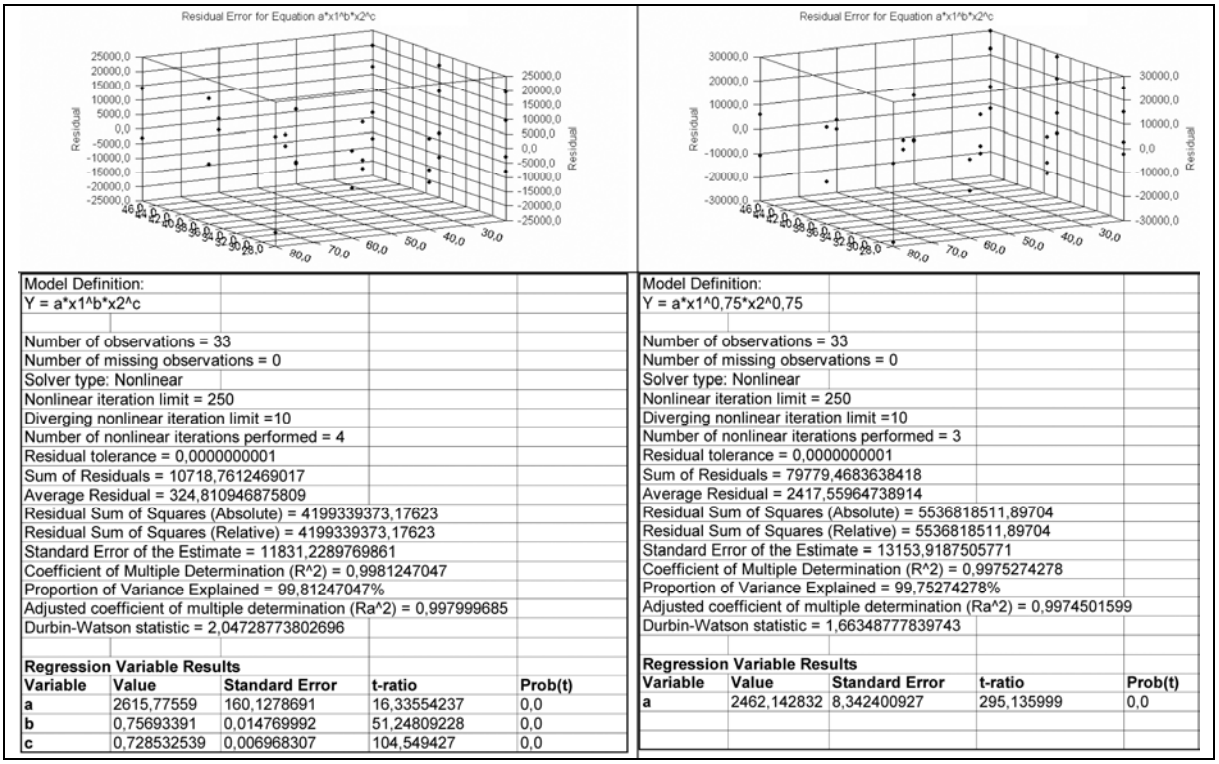


Abbildung 24 Darstellung Gleichung (3.24)



Model Definition:				
Y = a*x1^b*x2^c				
Number of observations = 33				
Number of missing observations = 0				
Solver type: Nonlinear				
Nonlinear iteration limit = 250				
Diverging nonlinear iteration limit =10				
Number of nonlinear iterations performed = 4				
Residual tolerance = 0,0000000001				
Sum of Residuals = 10718,7612469017				
Average Residual = 324,810946875809				
Residual Sum of Squares (Absolute) = 4199339373,17623				
Residual Sum of Squares (Relative) = 4199339373,17623				
Standard Error of the Estimate = 11831,2289769861				
Coefficient of Multiple Determination (R^2) = 0,9981247047				
Proportion of Variance Explained = 99,81247047%				
Adjusted coefficient of multiple determination (Ra^2) = 0,997999685				
Durbin-Watson statistic = 2,04728773802696				
Regression Variable Results				
Variable	**Value**	**Standard Error**	**t-ratio**	**Prob(t)**
a	2615,77559	160,1278691	16,33554237	0,0
b	0,75693391	0,014769992	51,24809228	0,0
c	0,728532539	0,006968307	104,549427	0,0

Model Definition:				
Y = a*x1^0,75*x2^0,75				
Number of observations = 33				
Number of missing observations = 0				
Solver type: Nonlinear				
Nonlinear iteration limit = 250				
Diverging nonlinear iteration limit =10				
Number of nonlinear iterations performed = 3				
Residual tolerance = 0,0000000001				
Sum of Residuals = 79779,4683638418				
Average Residual = 2417,55964738914				
Residual Sum of Squares (Absolute) = 5536818511,89704				
Residual Sum of Squares (Relative) = 5536818511,89704				
Standard Error of the Estimate = 13153,9187505771				
Coefficient of Multiple Determination (R^2) = 0,9975274278				
Proportion of Variance Explained = 99,75274278%				
Adjusted coefficient of multiple determination (Ra^2) = 0,9974501599				
Durbin-Watson statistic = 1,66348777839743				
Regression Variable Results				
Variable	**Value**	**Standard Error**	**t-ratio**	**Prob(t)**
a	2462,142832	8,342400927	295,135999	0,0

Abbildung 25 Vergleich der Gleichungen (3.22) und (3.24)

	A	B	C	D	E	F	G
1					min Error	-3,12%	
2					max Error	6,33%	
3	X1 Value	X2 Value	Y Value	Calc Y	Residual	% Error	Abs Residual
4	38	20	353100	364112	-11012	-3,11865	11011,95862
5	48	20	422300	434541,9	-12241,9	-2,89887	12241,91255
6	28	20	281100	288965,6	-7865,61	-2,79815	7865,606699
7	28	80	773200	793353	-20153	-2,60644	20152,96519
8	48	40	702200	720015,5	-17815,5	-2,53709	17815,45492
9	48	40	702600	720015,5	-17415,5	-2,47872	17415,45492
10	38	40	591500	603316,3	-11816,3	-1,99769	11816,34293
11	28	40	469900	478802,4	-8902,38	-1,89453	8902,381899
12	38	40	594400	603316,3	-8916,34	-1,50006	8916,342931
13	28	60	635500	643345,9	-7845,87	-1,2346	7845,865485
14	28	20	286100	288965,6	-2865,61	-1,00161	2865,606699
15	28	40	474400	478802,4	-4402,38	-0,92799	4402,381899
16	48	20	431300	434541,9	-3241,91	-0,75166	3241,91255
17	38	20	361500	364112	-2611,96	-0,72253	2611,958622
18	38	80	995300	999666,7	-4366,73	-0,43873	4366,726204
19	48	60	964100	967453,3	-3353,35	-0,34782	3353,345099
20	48	80	1190000	1193032	-3031,65	-0,25476	3031,650927
21	38	60	809700	810649,8	-949,841	-0,11731	949,8410996
22	48	60	968000	967453,3	546,6549	0,056473	546,6549008
23	48	40	720800	720015,5	784,5451	0,108844	784,5450779
24	38	60	813500	810649,8	2850,159	0,350358	2850,1589
25	38	40	607600	603316,3	4283,657	0,705013	4283,657069
26	28	60	648600	643345,9	5254,135	0,810073	5254,134515
27	48	80	1207000	1193032	13968,35	1,157278	13968,34907
28	28	40	485100	478802,4	6297,618	1,29821	6297,618101
29	28	80	806300	793353	12947,03	1,605734	12947,03481
30	38	80	1018000	999666,7	18333,27	1,800911	18333,2738
31	48	20	447200	434541,9	12658,09	2,83052	12658,08745
32	38	20	376000	364112	11888,04	3,161713	11888,04138
33	28	20	298500	288965,6	9534,393	3,194102	9534,393301
34	48	20	454300	434541,9	19758,09	4,349128	19758,08745
35	38	20	385000	364112	20888,04	5,425465	20888,04138
36	28	20	308500	288965,6	19534,39	6,332056	19534,3933

Tabelle 18 Werte Gleichung (3.22).

Bezogen auf die Dübelsteifigkeit gilt: Die Dübelsteifigkeit kann als Biegesteifigkeit (3.4) oder als Fußpunktverschiebung nach Gleichung (3.5) ausgedrückt werden. Im Fall der Definition über die Fußpunktverschiebung wird hierbei automatisch die Dübeleinbindetiefe $h_{Dübel}$ mit berücksichtigt. Da die Grenzwerte unabhängig von dieser Dübeleinbindetiefe definiert werden sollen, wird eine entsprechende Gleichung für die Biegesteifigkeit aufgestellt. Die Schubsteifigkeit der Dübel wird vernachlässigt, was aufgrund der geringeren Werte der Fußpunktverschiebung infolge Schub gegen diejenigen Werte infolge Biegung gerechtfertigt erscheint. Man beachte hierbei, dass man sich im Bereich großer Einbindelängen befindet und somit die Schubverformung unterhalb des %-Bereichs der Biegeverformung liegt. Lediglich für extrem biegesteife Dübel kommt die Schubverformung leicht über diese Grenze. Hier ist dann aber der Einfluss der Grundplattenbiegung näher zu betrachten. Außerdem sind die Absolutwerte der Verformungen dann aber auch verschwindend, siehe hierzu Tabelle 8.

	A	B	C	D	E	F	G
1					min Error	-3,68%	
2					max Error	8,12%	
3	X1 Value	X2 Value	Y Value	Calc Y	Residual	% Error	Abs Residual
4	28	80	773200	801676,7	-28476,7	-3,68297	28476,6919
5	48	40	702200	714149,5	-11949,5	-1,70173	11949,54659
6	28	60	635500	646093,3	-10593,3	-1,66692	10593,25112
7	48	40	702600	714149,5	-11549,5	-1,64383	11549,54659
8	28	40	469900	476679,8	-6779,81	-1,44282	6779,812968
9	38	40	591500	599371,3	-7871,29	-1,33073	7871,287113
10	38	80	995300	1008018	-12718,3	-1,27784	12718,33348
11	38	20	353100	356388,3	-3288,3	-0,93127	3288,299582
12	48	80	1190000	1201052	-11051,6	-0,9287	11051,58736
13	38	40	594400	599371,3	-4971,29	-0,83635	4971,287113
14	28	20	281100	283435,5	-2335,51	-0,83085	2335,51258
15	48	20	422300	424635,9	-2335,86	-0,55313	2335,860988
16	28	40	474400	476679,8	-2279,81	-0,48057	2279,812968
17	48	60	964100	967960,4	-3860,44	-0,40042	3860,441758
18	38	60	809700	812389,6	-2689,64	-0,33218	2689,643913
19	48	60	968000	967960,4	39,55824	0,004087	39,55824249
20	38	60	813500	812389,6	1110,356	0,136491	1110,356087
21	28	60	648600	646093,3	2506,749	0,386486	2506,748883
22	48	80	1207000	1201052	5948,413	0,492826	5948,412642
23	28	80	806300	801676,7	4623,308	0,573398	4623,308103
24	48	40	720800	714149,5	6650,453	0,922649	6650,453415
25	28	20	286100	283435,5	2664,487	0,931313	2664,48742
26	38	80	1018000	1008018	9981,667	0,980517	9981,666521
27	38	40	607600	599371,3	8228,713	1,354298	8228,712887
28	38	20	361500	356388,3	5111,7	1,414025	5111,700418
29	48	20	431300	424635,9	6664,139	1,545128	6664,139012
30	28	40	485100	476679,8	8420,187	1,735763	8420,187032
31	48	20	447200	424635,9	22564,14	5,045648	22564,13901
32	28	20	298500	283435,5	15064,49	5,046729	15064,48742
33	38	20	376000	356388,3	19611,7	5,215878	19611,70042
34	48	20	454300	424635,9	29664,14	6,529637	29664,13901
35	38	20	385000	356388,3	28611,7	7,43161	28611,70042
36	28	20	308500	283435,5	25064,49	8,124631	25064,48742

Tabelle 19 Werte Gleichung (3.24).

Setz man als Parameter:

- x1 = f_c
- x2 = $l'_{Dübel} = l'_{Dübel} / b$
- Y = V_{Bruch}

So ergeben sich Möglichkeiten nach Tabelle 20. Die Gleichungen auf Rang 1, 2, 8 und 16 liegen in der Qualität mit $R^2 > 0{,}995$ gleichauf, wobei Gleichungen (3.22) eine plausiblere Form hat und sich ohne nennenswerte Abstriche in der Genauigkeit auf Gleichung (3.24)umschreiben lässt.

Rank	Model	Residual Avg	RSS	R^2	Ra^2
1	a*x1^0,75*x2^b	178,1993737	4224272901	0,99811357	0,998052718
2	a*x1^b*x2^c	323,7553147	4193348234	0,99812738	0,998002539
8	a*x1^0,75*x2^0,25	2409,709443	5523152242	0,997533531	0,997456454
16	a*b^x1*x2^c	248,2326729	7158943524	0,996803037	0,996589906

Rang 1 : $V_{Bruch,\max} = 4905{,}513096 \cdot f_c^{0,75} \cdot I'^{\,0,242862467}_{Dübel}$

Rang 2 : $V_{Bruch,\max} = 4781{,}698403 \cdot f_c^{0,7569341528} \cdot I'^{\,0,2428650538}_{Dübel}$

Rang 8 : $V_{Bruch,\max} = 4582{,}519261 \cdot f_c^{0,75} \cdot I'^{\,0,25}_{Dübel}$

Rang 16: $V_{Bruch,\max} = 34474{,}17021 \cdot 1{,}020216766^{f_c} \cdot I'^{\,0,2428549751}_{Dübel}$

Tabelle 20 mögliche Gleichungen Teil 2 mit I′

$$V_{Bruch,\max} = 4582 \cdot f_c^{0,75} \cdot I'^{0,25}_{Dübel}$$

oder mit $b_{Dübel} = 200$ mm

$$V_{Bruch,\max} = 22{,}9 \cdot b_{Dübel} \cdot \cdot f_c^{0,75} \cdot I'^{0,25}_{Dübel}$$

$$V_{Bruch,\max} = \frac{22{,}9}{\left(E_{Dübel}\right)^{0,25}} \cdot b_{Dübel} \cdot \cdot f_c^{0,75} \cdot \left(E_{Dübel} I'_{Dübel}\right)^{0,25} \qquad (3.25)$$

oder mit $E_{Dübel} = 210000$ N/mm²

$$V_{Bruch,\max} = 1{,}070 \cdot b_{Dübel} \cdot f_c^{3/4} \cdot \left(E I'_{Dübel}\right)^{1/4}$$

	maximaler Fehler	minimaler Fehler
Gleichung *(3.25)*	8,11 %	-3,68 %

Tabelle 21 Fehlerbericht für Gl. *(3.25)*

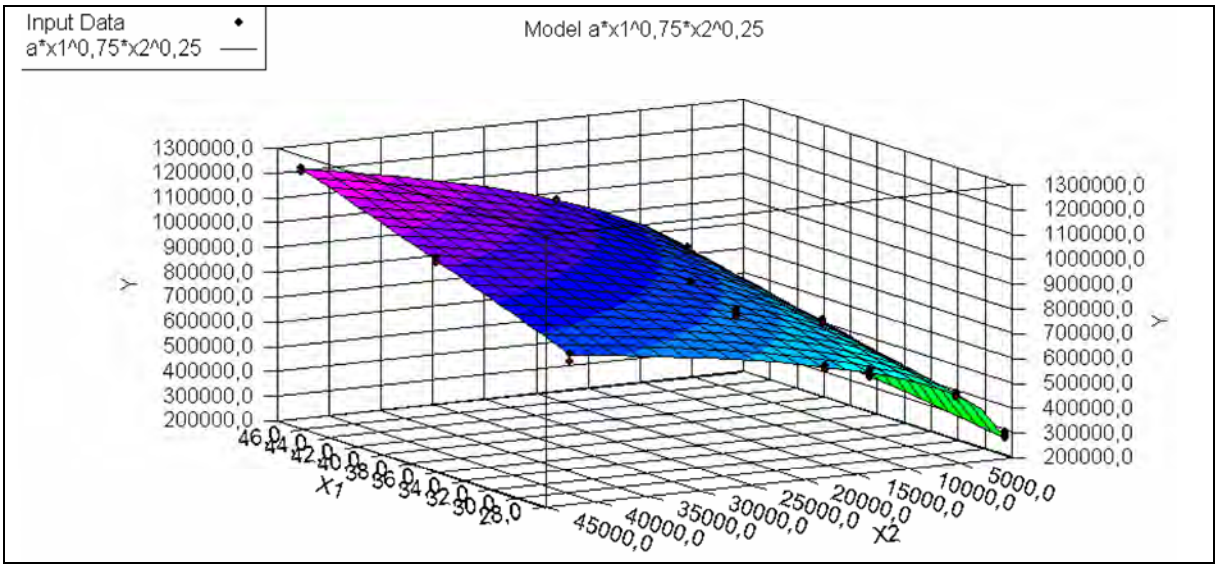


Abbildung 26 Darstellung Gleichung *(3.25)*

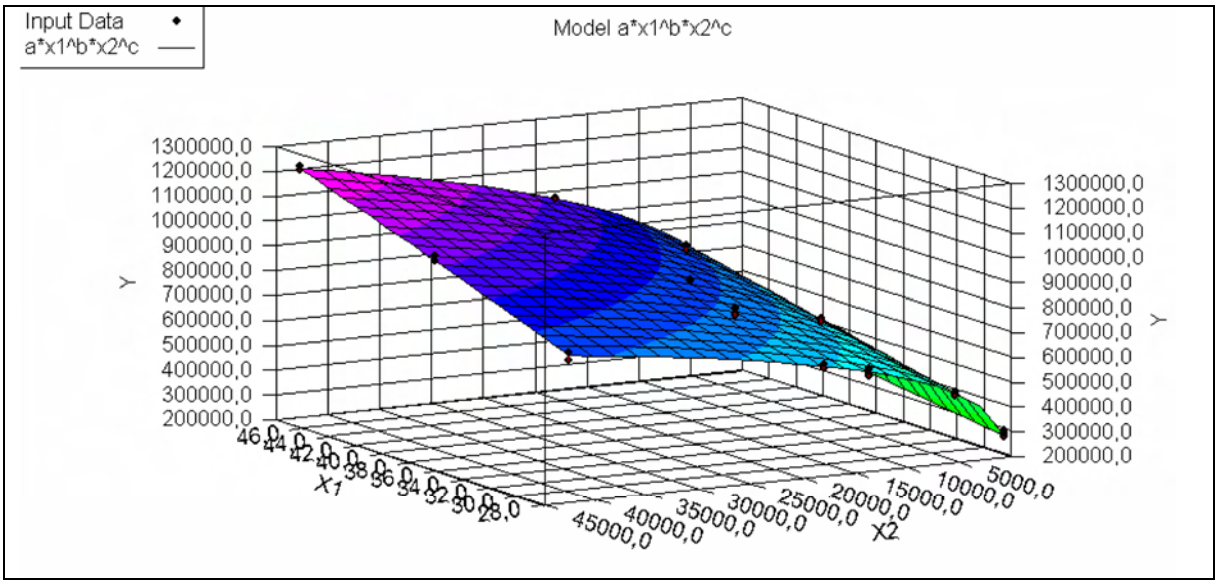


Abbildung 27 Darstellung Gleichung Rang 1

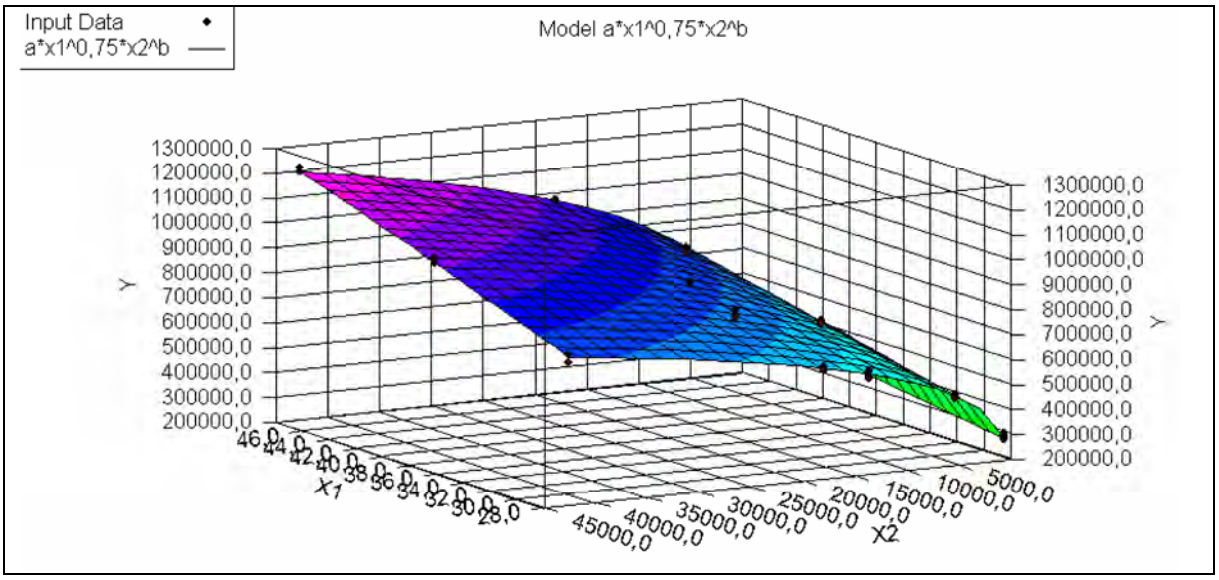


Abbildung 28 Darstellung Gleichung Rang 2

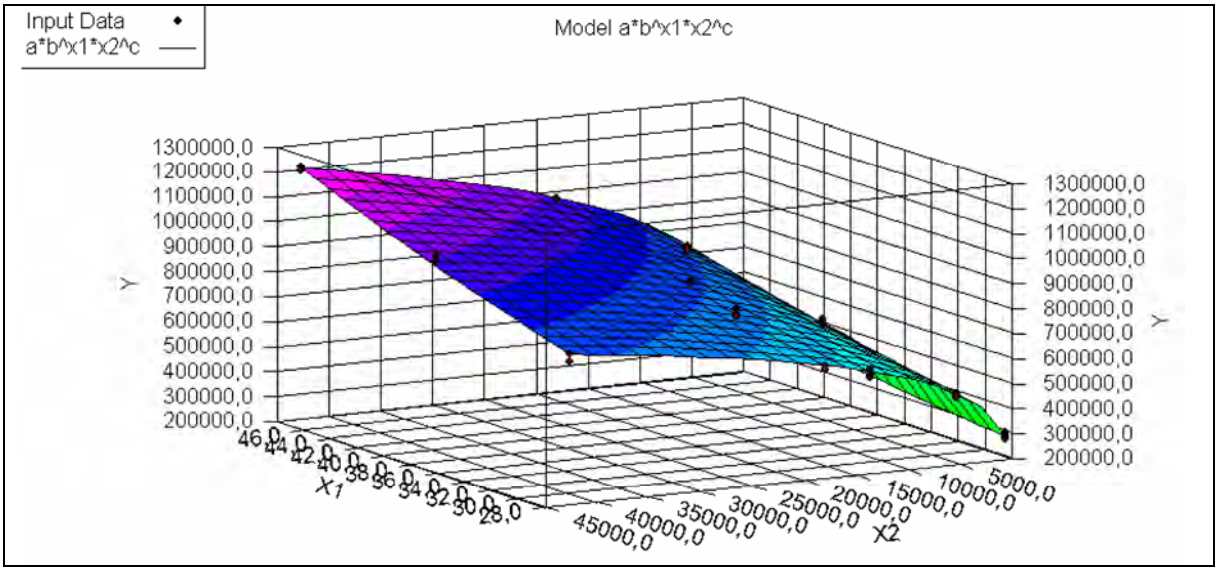
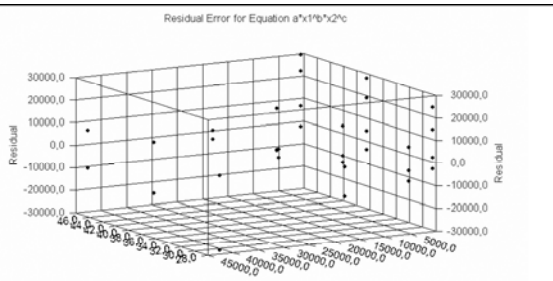


Abbildung 29 Darstellung Gleichung Rang 16



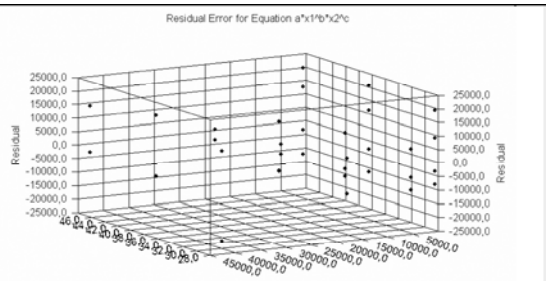
Model Definition:
Y = a*x1^0,75*x2^0,25

Number of observations = 33
Number of missing observations = 0
Solver type: Nonlinear
Nonlinear iteration limit = 250
Diverging nonlinear iteration limit =10
Number of nonlinear iterations performed = 5
Residual tolerance = 0,0000000001
Sum of Residuals = 79520,4116119113
Average Residual = 2409,70944278519
Residual Sum of Squares (Absolute) = 5523152241,99574
Residual Sum of Squares (Relative) = 5523152241,99574
Standard Error of the Estimate = 13137,6751201408
Coefficient of Multiple Determination (R^2) = 0,9975335307
Proportion of Variance Explained = 99,75335307%
Adjusted coefficient of multiple determination (Ra^2) = 0,9974564536
Durbin-Watson statistic = 1,66701122992105

Regression Variable Results

Variable	Value	Standard Error	t-ratio	Prob(t)
a	4582,519261	15,50762461	295,5010439	0,0

Gleichung



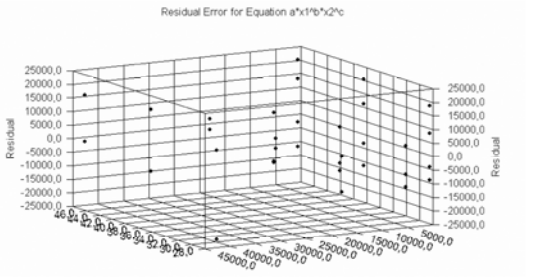
Model Definition:
Y = a*x1^b*x2^c

Number of observations = 33
Number of missing observations = 0
Solver type: Nonlinear
Nonlinear iteration limit = 250
Diverging nonlinear iteration limit =10
Number of nonlinear iterations performed = 4
Residual tolerance = 0,0000000001
Sum of Residuals = 10683,9253843734
Average Residual = 323,755314677982
Residual Sum of Squares (Absolute) = 4193348234,22358
Residual Sum of Squares (Relative) = 4193348234,22358
Standard Error of the Estimate = 11822,7862398894
Coefficient of Multiple Determination (R^2) = 0,9981273801
Proportion of Variance Explained = 99,81273801%
Adjusted coefficient of multiple determination (Ra^2) = 0,9980025388
Durbin-Watson statistic = 2,04994447703259

Regression Variable Results

Variable	Value	Standard Error	t-ratio	Prob(t)
a	4781,698403	281,0180634	17,01562649	0,0
b	0,756934153	0,01475945	51,28471386	0,0
c	0,242865054	0,002321246	104,6270346	0,0

Rang 1



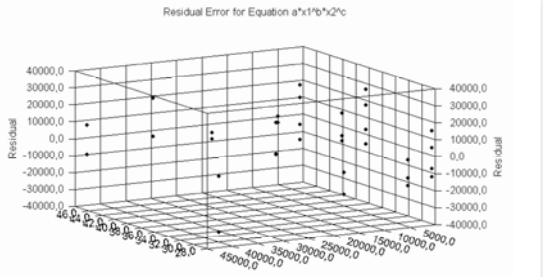
Model Definition:
Y = a*x1^0,75*x2^b

Number of observations = 33
Number of missing observations = 0
Solver type: Nonlinear
Nonlinear iteration limit = 250
Diverging nonlinear iteration limit =10
Number of nonlinear iterations performed = 126
Residual tolerance = 0,0000000001
Sum of Residuals = 5880,57933339564
Average Residual = 178,199373739262
Residual Sum of Squares (Absolute) = 4224272900,54368
Residual Sum of Squares (Relative) = 4224272900,54368
Standard Error of the Estimate = 11673,3400429986
Coefficient of Multiple Determination (R^2) = 0,9981135701
Proportion of Variance Explained = 99,81135701%
Adjusted coefficient of multiple determination (Ra^2) = 0,9980527176
Durbin-Watson statistic = 2,02494011826605

Regression Variable Results

Variable	Value	Standard Error	t-ratio	Prob(t)
a	4905,513096	108,0931198	45,38228802	0,0
b	0,242862467	0,002291898	105,9656753	0,0

Rang 2



Model Definition:
Y = a*b^x1*x2^c

Number of observations = 33
Number of missing observations = 0
Solver type: Nonlinear
Nonlinear iteration limit = 250
Diverging nonlinear iteration limit =10
Number of nonlinear iterations performed = 4
Residual tolerance = 0,0000000001
Sum of Residuals = 8191,67820452119
Average Residual = 248,232672864278
Residual Sum of Squares (Absolute) = 7158943523,62511
Residual Sum of Squares (Relative) = 7158943523,62511
Standard Error of the Estimate = 15447,700501612
Coefficient of Multiple Determination (R^2) = 0,9968030369
Proportion of Variance Explained = 99,68030369%
Adjusted coefficient of multiple determination (Ra^2) = 0,996589906
Durbin-Watson statistic = 1,671796523997

Regression Variable Results

Variable	Value	Standard Error	t-ratio	Prob(t)
a	34474,17021	1230,501798	28,01635094	0,0
b	1,020216766	0,000517182	1972,645087	0,0
c	0,242854975	0,003033202	80,06554163	0,0

Rang 16

Abbildung 30 Vergleich der Gleichungen *(3.25)* und Ränge

	A	B	C	D	E	F	G
1					min Error	-3,68%	
2					max Error	8,11%	
3	X1 Value	X2 Value	Y Value	Calc Y	Residual	% Error	Abs Residual
4	28	667	281100	283468,2	-2368,16	-0,84246	2368,15758
5	28	667	286100	283468,2	2631,842	0,919903	2631,84242
6	28	667	298500	283468,2	15031,84	5,035793	15031,84242
7	28	667	308500	283468,2	25031,84	8,114049	25031,84242
8	38	667	353100	356429,3	-3329,35	-0,94289	3329,347001
9	38	667	361500	356429,3	5070,653	1,40267	5070,652999
10	38	667	376000	356429,3	19570,65	5,204961	19570,653
11	38	667	385000	356429,3	28570,65	7,420949	28570,653
12	48	667	422300	424684,8	-2384,77	-0,56471	2384,768896
13	48	667	431300	424684,8	6615,231	1,533789	6615,231104
14	48	667	447200	424684,8	22515,23	5,034712	22515,2311
15	48	667	454300	424684,8	29615,23	6,518871	29615,2311
16	28	5333	469900	476667,7	-6767,69	-1,44024	6767,693648
17	28	5333	474400	476667,7	-2267,69	-0,47801	2267,693648
18	28	5333	485100	476667,7	8432,306	1,738261	8432,306352
19	38	5333	591500	599356	-7856,05	-1,32816	7856,048431
20	38	5333	594400	599356	-4956,05	-0,83379	4956,048431
21	38	5333	607600	599356	8243,952	1,356806	8243,951569
22	48	5333	702600	714131,4	-11531,4	-1,64125	11531,38973
23	48	5333	702200	714131,4	-11931,4	-1,69914	11931,38973
24	48	5333	720800	714131,4	6668,61	0,925168	6668,61027
25	28	18000	635500	646086,9	-10586,9	-1,66592	10586,9199
26	28	18000	648600	646086,9	2513,08	0,387462	2513,0801
27	38	18000	809700	812381,7	-2681,68	-0,33119	2681,683118
28	38	18000	813500	812381,7	1118,317	0,13747	1118,316882
29	48	18000	968000	967951	49,04351	0,005066	49,04351098
30	48	18000	964100	967951	-3850,96	-0,39944	3850,956489
31	28	42667	773200	801670,4	-28470,4	-3,68215	28470,40184
32	28	42667	806300	801670,4	4629,598	0,574178	4629,598164
33	38	42667	995300	1008010	-12710,4	-1,27704	12710,42443
34	38	42667	1018000	1008010	9989,576	0,981294	9989,575565
35	48	42667	1190000	1201042	-11042,2	-0,92791	11042,16375
36	48	42667	1207000	1201042	5957,836	0,493607	5957,836251

Tabelle 22 Werte Gleichung *(3.25)*

Auswahl der Gleichungen für den Kurventeil 2: Prinzipiell kann gezeigt werden, dass Gl. (3.26) sich in Gl. (3.27) überführen lässt. Dies ist zu erwarten, da beide Gleichungen auf dem gleichen Datensatz beruhen. Um die Biegesteifigkeit zu Berücksichtigen wird somit die Schreibweise von Gl. (3.27) fortgeführt.

$$V_{Bruch,\max} = 12{,}31 \cdot b_{Dübel} \cdot \sqrt[4]{\left(f_c \cdot t_{Dübel}\right)^3}$$

oder mit $E_{Dübel} = 210000$ N/mm² und $EI'_{Dübel} = \frac{t_{Dübel}^3}{12} \cdot 210000$

$$V_{Bruch,\max} = 12{,}31 \cdot b_{Dübel} \cdot \sqrt[4]{f_c^3 \cdot {}^{12}\!/_{210000} \cdot EI'_{Dübel}} \qquad (3.26)$$

$$V_{Bruch,\max} = 12{,}31 \cdot \sqrt[4]{{}^{12}\!/_{210000}} \cdot b_{Dübel} \cdot \sqrt[4]{f_c^3} \cdot \sqrt[4]{EI'_{Dübel}}$$

$$V_{Bruch,\max} = 1{,}070 \cdot b_{Dübel} \cdot f_c^{3/4} \cdot EI'^{\,1/4}_{Dübel}$$

$$V_{Bruch,\max} = 1{,}070 \cdot b_{Dübel} \cdot f_c^{0,75} \cdot \left(EI'_{Dübel}\right)^{0,25} \qquad (3.27)$$

A3.3.4 ZUSAMMENFASSUNG UND VERGLEICH – R*LUG GRUNDWERT DER LASTÜBERTRAGUNG VOR DEM DÜBEL

Zusammenfassend ergibt sich somit zur Beschreibung der Berechnung mit steifer Grundplatte und horizontaler Führung folgendes Gleichungssystem.

Einbindetiefe:	h_{Lug}	[mm]	E-Modul:	E	[N/mm²]
Dübelbreite:	b_{Lug}	[mm]	Einheitsträgheitsmoment:	$I'_{Lug} = t_{Lug}^3/12$	
Dübelstärke:	t_{Lug}	[mm]		$= I_{Lug} / b_{Lug}$	

$$R^*_{Lug} = 1{,}146 \cdot b_{Lug} \cdot \left(h_{Lug} + 4{,}2\right) \cdot f_c \le R_{L,\max} \quad \text{oder} \quad R^*_{Lug} = R_{L,1} \le R_{L,2}$$

mit: $R_{L,\max} = R_{L,2} = 1{,}070 \cdot b_{Lug} \cdot f_c^{0,75} \cdot \left(EI'_{Lug}\right)^{0,25}$

Die maximal tragende Einbindetiefe ermittelt sich zu: $h^*_{L,\max} = h^*_L = 0{,}934 \cdot \sqrt[4]{\frac{EI'_{Lug}}{f_c}} - 4{,}2 \le h_{Lug}$

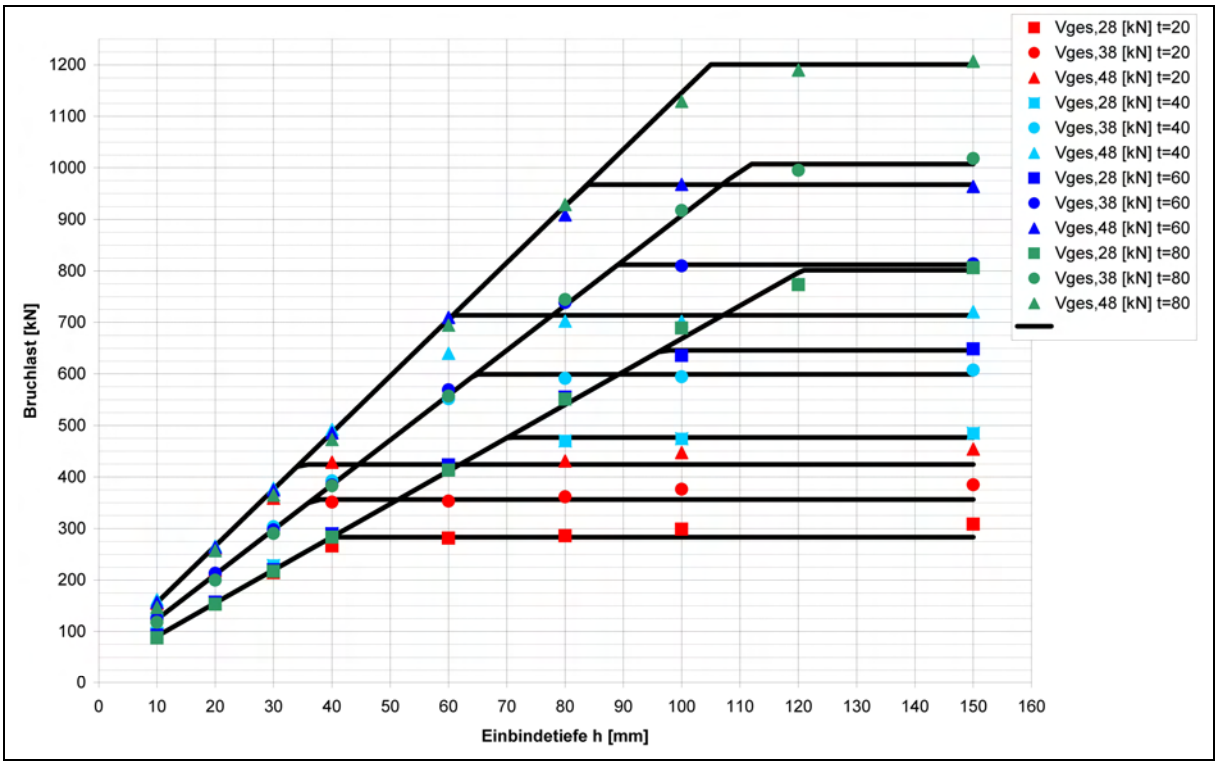


Abbildung 31 Vergleich Rechenwerte – Formeln

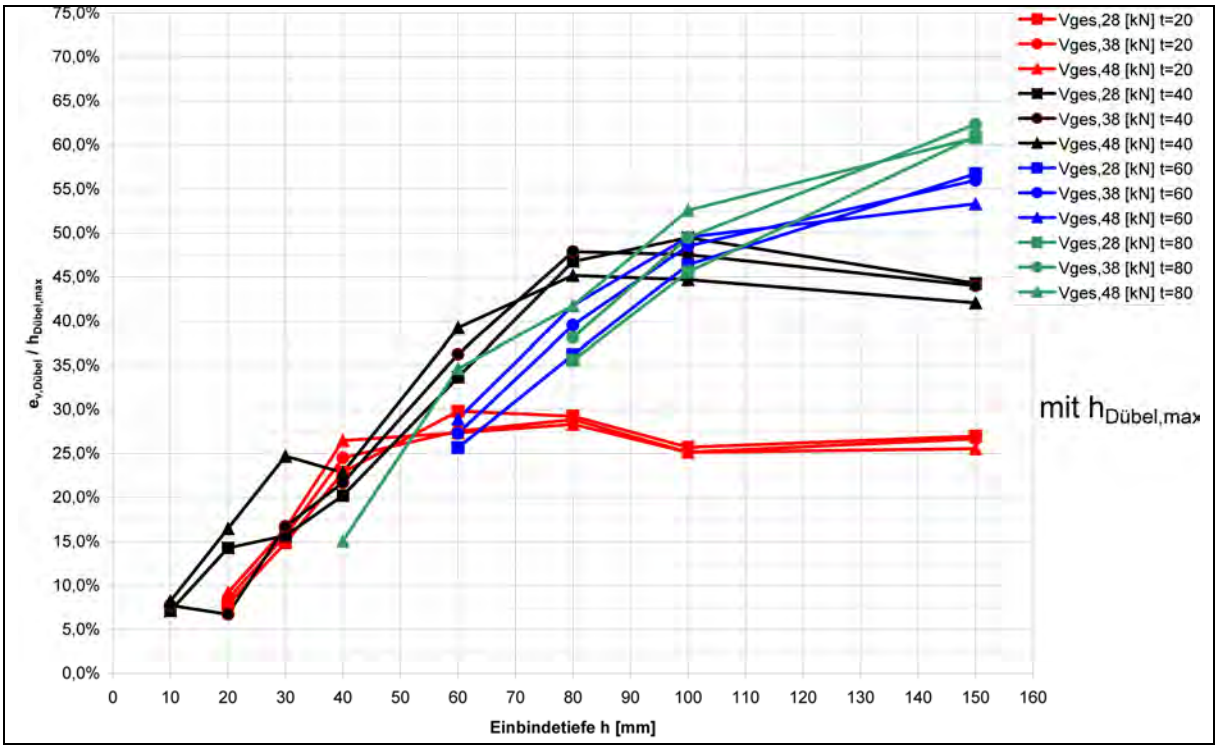


Abbildung 32 Werte für e^*_{Lug}

A3.3.5 GRUNDWERT DES LASTANGRIFFES VOR DEM DÜBEL

Nachdem der Grundwert der Lastübertragung vor dem Dübel definiert ist, soll nun dessen Lastangriffpunkt, also der Schwerpunkt, von R^*_{Lug} untersucht werden Berechnet man aus den Auflagerkräften der horizontalen Führung den Lastangriffpunkt e^*_{Lug} für R^*_{Lug}, so kann dieser bezogen auf die Dübeleinbindetiefe über die Dübeleinbindetiefe dargestellt werden. Aus Abbildung 32 ist ersichtlich, dass mit wachsender Dübeleinbindetiefe der bezogene Wert des Lastangriffes zuerst stark zunimmt um dann mehr oder weniger konstant zu bleiben. Für große Dübelsteifigkeiten, also Dübeldicken, ist dieser konstante Bereich erst für sehr große Einbindetiefen zu erwarten, die hier nicht systematisch untersucht wurden.

Der Wert für e^*_{Lug} kann in drei Varianten bestimmt werden. Eine eindeutig zu bevorzugende Variante kann noch nicht festgelegt werden. Die Varianten 2 und 3 beruhen hierbei auf physikalischen Betrachtungen, da die empirische Lösung mittels Regression nicht vollständig überzeugen kann. Eine weiterführende Betrachtung über die Korrekturen am verformten System ist hier mehr zielweisend.

- Empirische Lösung mittels Regression
- Ansatz einer Parabel-/Rechteckfunktion mit konstantem Wert für Einbindetiefen $h_{Lug} > 2\ h_L^*$.
- Ansatz einer überhöhten Parabel, um das Maximum in e_{Lug} bei zirka 2 h_L^* in den Berechnungen mit 20 mm und 40 mm starken Dübeln abbilden zu können.

Empirische Lösung mittels Regression

gewählt:

$$\boxed{e_{1,Lug} / h^*_{L,\max} = -0{,}59 + 0{,}26 \cdot t_L^{\,0{,}11} \cdot \ln\left(h_L\right) - 0{,}037 \cdot \ln^2\left(h_L\right)}$$

$h^*_{L,max}$ siehe A3.3.4

für: $h^*_{Lug,\max} \geq 0{,}8 \cdot t_{Lug}$

$$e^*_{Lug,1} = \alpha \cdot e_{1,Lug} + \beta \cdot \frac{h_{Lug}}{2}$$

$$\alpha = \frac{2 \cdot h_{Lug}}{h^*_{Lug,\max}} - 1 \qquad \text{mit: } 0 \leq \alpha \leq 1$$

$$\beta = \left(2 - \frac{2 \cdot h_{Lug}}{h^*_{Lug,\max}}\right) \cdot \frac{t_{Lug}}{h^*_{Lug,\max}} \qquad \text{mit: } 0 \leq \beta \leq 1$$

für: $h^*_{Lug,\max} < 0{,}8 \cdot t_{Lug}$

$$e^*_{Lug,1} = \frac{h_{Lug}}{2}$$

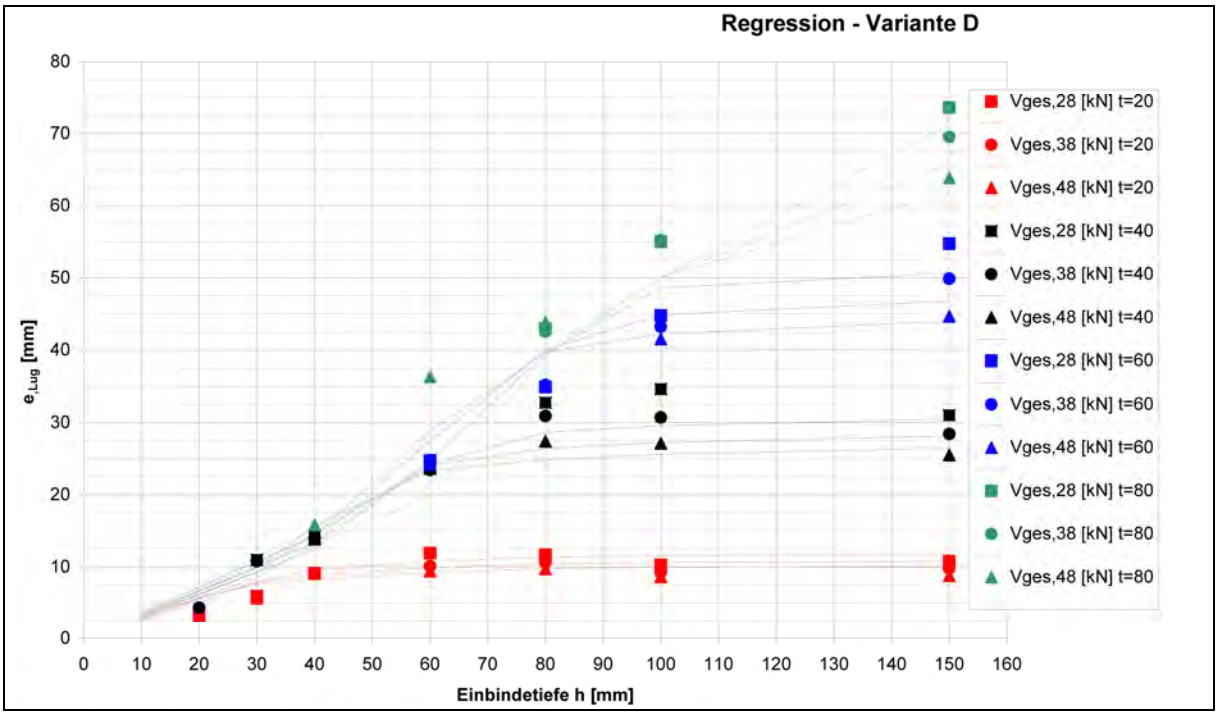


Abbildung 33 Auswertung mit Ansatz nach D

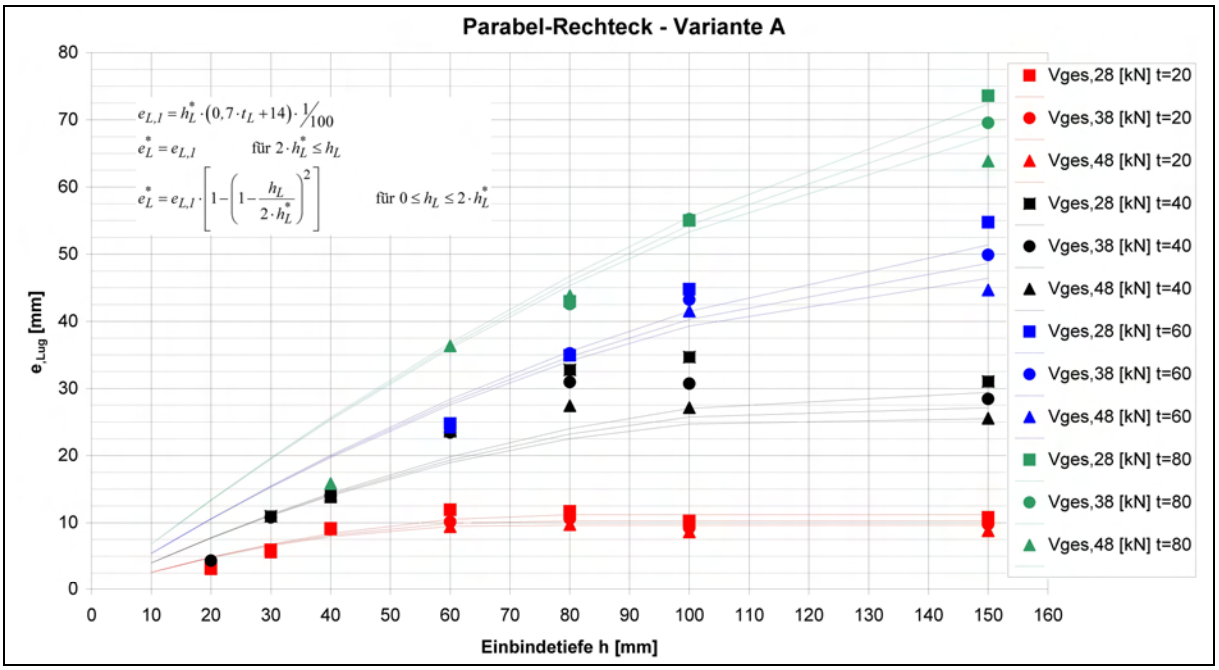


Abbildung 34 Auswertung mit Ansatz nach A

Ansatz einer Parabel-/Rechteckfunktion mit konstantem Wert für Einbindetiefen $h_{Lug} > 2\,h^*_L$.

$$e_{L,2} = h_L^* \cdot (0{,}7 \cdot t_L + 14) \cdot {}^{1}\!/_{100}$$

$$e_{L,2}^* = e_{L,2} \qquad \text{für } 2 \cdot h_L^* \le h_L$$

$$e_{L,2}^* = e_{L,2} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{h_L}{2 \cdot h_L^*}\right)^2\right] \qquad \text{für } 0 \le h_L \le 2 \cdot h_L^*$$

Ansatz einer überhöhten Parabel, um das Maximum in e_{Lug} bei zirka 2 h^*_L in den Berechnungen mit 20 mm und 40 mm starken Dübeln abbilden zu können.

$$e_{L,3} = h_L^* \cdot 6 \cdot \frac{t_L^{0,6}}{f_c^{0,06}} \cdot {}^{1}\!/_{100}$$

$$\eta = {}^{h_L}\!/_{1{,}5 \cdot h_L^*} \qquad \text{mit } h \le 2{,}5 \cdot h_L^*$$

$$k = 2.2$$

$$e_{L,3}^* = \left(\frac{k \cdot \eta - \eta^2}{1 + (k-2) \cdot \eta}\right) \cdot e_{L,3}$$

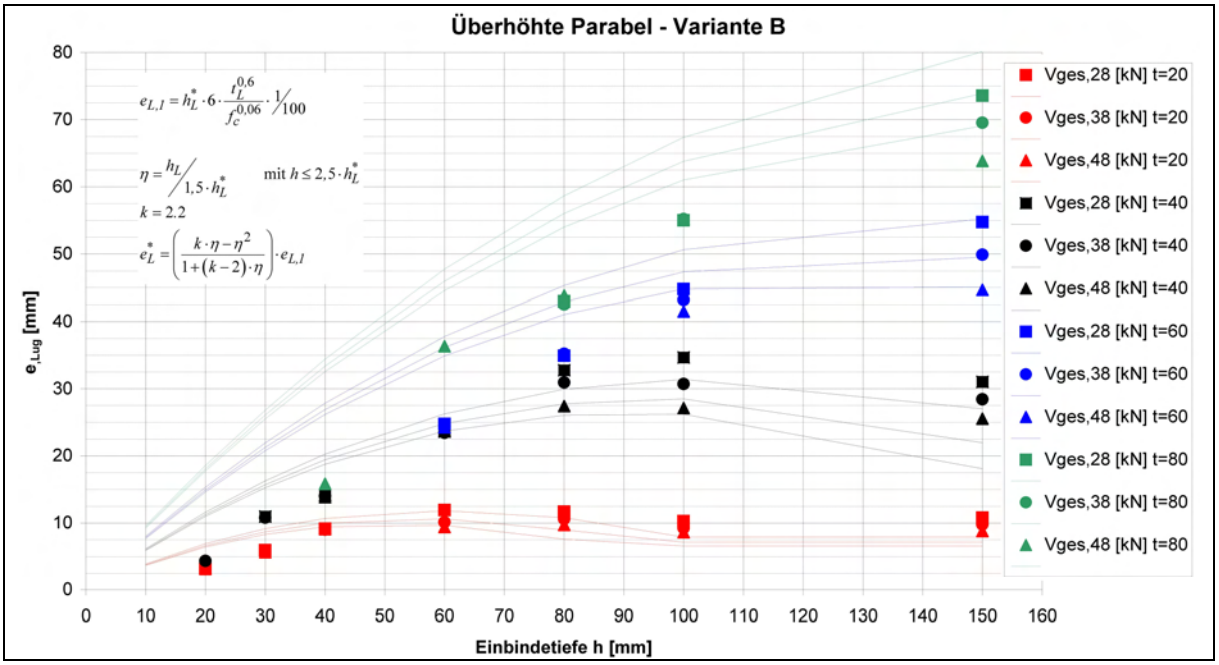
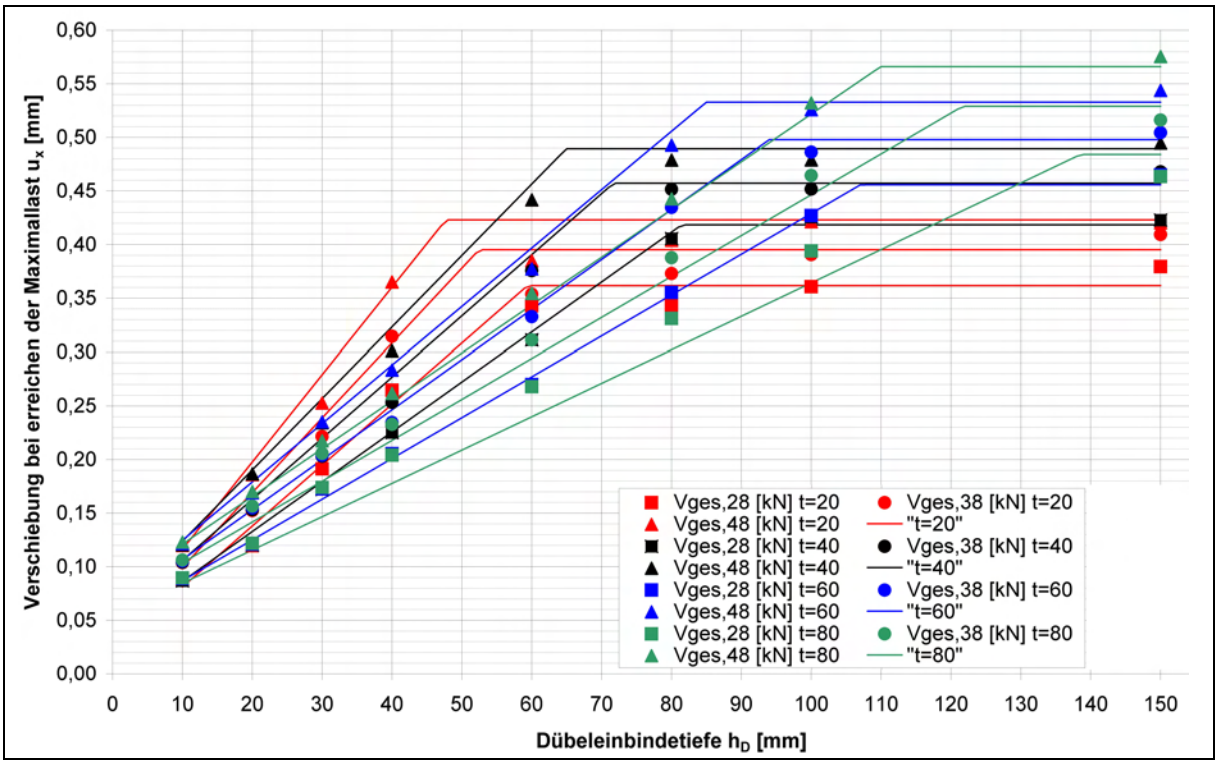


Abbildung 35 Auswertung mit Ansatz nach B

A3.3.6 GRUNDWERT DER VERSCHIEBUNG VOR DEM DÜBEL

Der Grundwert der Verschiebung v^*_{Lug} wird ebenfalls aus der EDV entnommen. Ähnlich wie für den Grundwert der Lastabtragung vor dem Dübel, wird ein bilinearer Verlauf für die Werte der Verschiebung über die Dübeleinbindetiefe unterstellt. Die Übereinstimmungder Werte ist nicht so gut, wie bei den Kräften, aber hinreichend

genau genug. Zu Bedenken ist, dass die Verschiebung von den Abmessungen des gewählten Modells abhängig ist und hier nur als Hilfswert für die Berechnung benötigt werden. Zusammenstellung v^*_{Lug}:



$$v_L^* = a_i \cdot \left(h_{Lug} + c\right) \leq v_{L,\max}$$

mit $a_1 = 0{,}7532 \cdot 10^{-3} \cdot f_c^{2/3} \cdot 0{,}99^{t_{Lug}}$

oder $a_2 = 7{,}3637 \cdot 10^{-12} \cdot E_c^2 \cdot 0{,}99^{t_{Lug}}$

sowie $v_{L,\max} = 0{,}07338 \cdot f_c^{0,29} \cdot t_{Lug}^{0,21}$

und $c = 0{,}215 \cdot t_{Lug}$

A3.3.7 ZUSAMMENSTELLUNG DER GRUNDWERTE

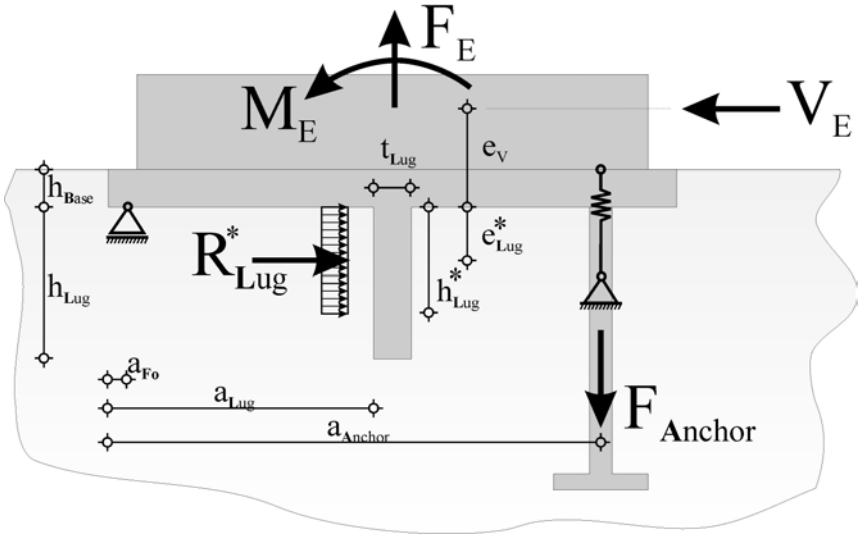


Abbildung 36 Zusammenstellung der Grundwerte am Modell mit unendlich steifem Anker.

Für das unverformte Modell, siehe Abbildung 36, können die Grundwerte der Lastübertragung vor dem Dübel wie folgt zusammengefasst werden. Diese sind Grundlage für die weitere Untersuchung am verformten Modell, also am Modell mit endlich steifem Zuganker, in Abbildung 36 als Feder dargestellt. Die Grundwerte berechnen sich lediglich aus den Abmessungen des Einbauteils und den Materialkennwerten.

Grundwert R^*_{Lug}:

$$\boxed{R_L^* = 1{,}146 \cdot b_L \cdot \left(h_L + 4{,}2\right) \cdot f_c \le R_{L,\max}}$$

mit:

$$R_{L,\max} = 1{,}070 \cdot b_L \cdot f_c^{0{,}75} \cdot \left(EI_L^{'}\right)^{0{,}25}$$

$$I_L^{'} = {I_L}/{b_L} \quad \text{für Rechteck gilt: } I_L^{'} = {t_L^3}/{12}$$

Grundwert h^*_L:

$$\boxed{h_L^* = 0{,}934 \cdot \sqrt[4]{\frac{EI_L^{'}}{f_c}} - 4{,}2}$$

Grundwert e^*_v:

$$e_{L,1} = h_L^* \cdot \left(0{,}7 \cdot t_L + 14\right) \cdot {1}/{100}$$

$$e_L^* = e_{L,1} \qquad \text{für } 2 \cdot h_L^* \le h_L$$

$$e_L^* = e_{L,1} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{h_L}{2 \cdot h_L^*}\right)^2\right] \qquad \text{für } 0 \le h_L \le 2 \cdot h_L^*$$

Grundwert u^*_L:

$$\boxed{u_L^* = a_i \cdot \left(h_L + c\right) \le u_{L,\max}}$$

mit:

$$a_1 = 0{,}7532 \cdot 10^{-3} \cdot f_c^{2/3} \cdot 0{,}99^{t_L}$$

oder

$$a_2 = 7{,}3637 \cdot 10^{-12} \cdot E_c^2 \cdot 0{,}99^{t_L}$$

$$c = 0{,}215 \cdot t_L$$

$$u_{L,\max} = 0{,}07338 \cdot f_c^{0{,}29} \cdot t_L^{0{,}21}$$

A3.4 EINFLUSS DER ZUGANKERSTEIFIGKEIT

A3.4.1 MODELL UND PARAMETER

Zur Berücksichtigung der Zugankersteifigkeit muss das Modell entsprechend geändert werden. Untersucht wird weiterhin die Lastübertragung vor dem Dübel (LUG). Im Modell „Duebel A“ wird hierzu die horizontal geführte Lagerung der Grundplatte aufgegeben. Den Ausgleich der exzentrisch wirkenden Beanspruchung *V* stellt jetzt ein Zuganker, wie im Versuch verwendet, dar. Dieser Zuganker wird durch eine Feder simuliert, da lediglich die Längsdehnung untersucht werden soll. Die Federkraft und damit die Ankerkraft werden nicht in den Beton eingeleitet, da dies in dem ver-

wendeten 2D-Modell zu größeren Abweichungen von der tatsächlichen Lastabtragung führt.

A3.4.1.1 Zugankersteifigkeit

(siehe 6.5.1)

A3.4.1.2 System und Belastung

(siehe 6.5.2) Lagerung und Belastung entsprechen im Prinzip der Untersuchung „horizontal". Die Hauptlastübertragung findet wieder lediglich in den Flächen „M2" und „M4", also vor und hinter dem Dübel statt. Die Kontaktfläche „M1", Sie erstreckt sich an der Unterseite der Grundplatte vom Dübel bis zur Stirnseite der Grundplatte, wird jetzt benötigt, um die entstehenden vertikalen Kräfte im Modell kurzzuschließen. Die horizontale Führung des Einbauteils mit der entsprechenden Lagerung für vertikale Kräfte muss aufgegeben werden, um den Einfluss der Verformungen aus Ankerbeanspruchung usw. untersuchen zu können.

Alle Kontaktflächen sind nur mit einer normalen Steifigkeit versehen. Aus rechentechnischen Gründen muss mit einer Reibung in den Kontaktflächen von 10% gearbeitet werden, siehe hierzu die Untersuchung Kohäsion.

Zum Einsatz kommt das Materialgesetz „2D Interface" mit k_{nn} = 2E+08 MN/m³ und k_{tt} = 10 MN/m³ alle anderen Parameter werden zu Null gesetzt. Untersucht wird hier der Einfluss der Verkantung des Stahlblocks bzw. der Grundplatte, die von der Zugankersteifigkeit direkt abhängig ist. Die Verbiegung – Krümmung – im Stahlblock selber kann vernachlässigt werden. Weiterhin hat „Verbiegung/Verformung" im Dübel selber einen Einfluss auf das Ergebnis. Dies wird aber schon bei der Ermittlung der Grundwerte berücksichtigt.

Für das ganze System wird eine Dicke von 10 cm angesetzt. Auch die Kontaktfläche vor dem Dübel wird mit 10 cm modelliert. Somit wird die übertragene Kraft eines 10 cm breiten Dübels ausgegeben. Die Steifigkeit des Dübels errechnet sich ebenfalls mit 10 cm Breite. (Dies ist im Vergleich mit dem System „Horizontal" zu beachten). Für die Belastung wird eine Exzentrizität variiert und untersucht. Die Beanspruchung wird wieder verformungsgesteuert an der rechten Stahlkante in negativer X-Richtung punktweise aufgebracht. Belastet wird ein Punkt, der entsprechende der gewünschten Exzentrizität verschoben wird, siehe hierzu den Abschnitt Exzentrizität. Für die ersten Vergleiche wird vom Punkt (-15 cm/-1 cm) ausgegangen, wie schon bei der Untersuchung „Horizontal". Im Lastpunkt wird dann auch die belastende Kraft als „Compact Reaction" beobachtet. Generell wird im Bereich der Lasteinleitung lokal ein höherfester Stahl eingesetzt, um ein Fließen des Materials, infolge der punktweise aufgebrachten Belastung, zu unterbinden.

A3.4.1.3 Lagerung

Das Betonsystem ist an der linken Betonkante in X-Richtung gelagert. Die Lagerung in Y-Richtung wird zunächst variiert, um den Einfluss auf das System zu erkennen. Im Modell „xx" erfolgt die Lagerung in Y-Richtung an der rechten Betonkante und im vorderen Bereich der unteren Kante (siehe Abbildung 37), im Modell „xxa" jedoch lediglich an der gesamten unteren Betonkante (siehe Abbildung 38).

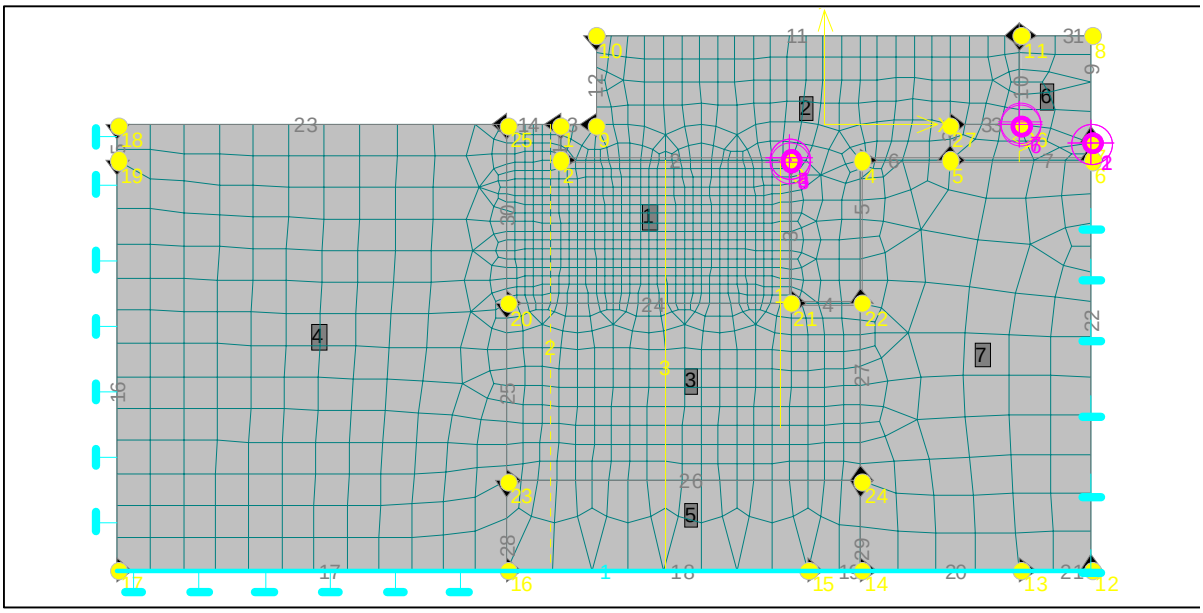


Abbildung 37 System, Geometrie und Lagerung Modell „xx“.

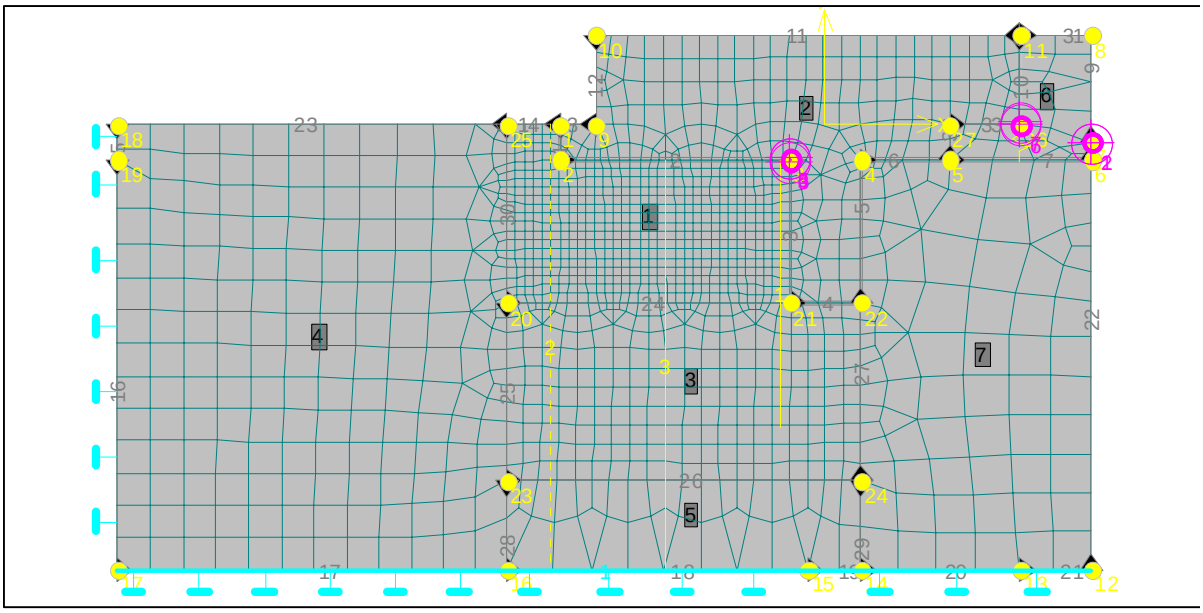


Abbildung 38 System, Geometrie und Lagerung Modell „xxa“.

System	u_x-Last [mm]	V_{ges} [kN]	F_A [kN]	Schritt		
mit Lagerung nur Hinten auf Y-Richtung						
00	0,58	338,4	243,9	29/30		
01	0,62	338,0	152,8	31		
02	0,66	334,7	68,48	33		
03	0,64	262,1	19,42	31		Fließen
mit Lagerung nur Unten auf Y-Richtung						
00a	0,62	342,7	130,4	31		
01a	0,62	340,2	108,1	31/32		
02a	0,68	334,8	86,17	34		
03a	0,70	213,1	19,41	35		Fließen
Für diese Rechnung						

Tabelle 23 Ergebnisliste Tastversuche.

Es zeigt sich für die Modelle 03 und 03a ein Fliesen im Anker, dass unterbunden werden soll. Da hier ist die Steifigkeit lediglich um eine Zehnerpotenz unter den realen Werten der Versuche lagen, sollte dieser Bereich in der Modellrechnung mit abgedeckt werden.

Die erreichten Lasten V_{ges} liegen für beide Lagerungsmodell jeweils auf dem gleichen Niveau. Lediglich in den Zugankerkräften F_A treten erhebliche Unterschiede auf, die ihre Ursache in dem Aufreisen des Betons hinter dem Dübel finden. Dieses Aufreisen ist in Modellzwängen zu suchen, daher werden im Weiteren folgende Parameter für die Parameteruntersuchung geändert.

- Modell der Lagerung:
  - Untern durchgehend in Y-Richtung
  - Rand hinten durchgehend in Y-Richtung
- Federlänge für Zuganker auf numerisch 2 m setzen mit Ausgleich im E-Modul.
- Blockhöhe vergrößern zur Beschränkung der Verbiegung.
- Monitoring Points

Für den Federparameter, gilt wieder: $\frac{\Delta l}{P} = \frac{L}{E \cdot A}$ [m/MN]

Wird L von 0,2 m auf 2 m vergrößert, so ist auch der E-Modul im Stahl um den Faktor 10 zu erhöhen, dies soll der Numerik der Berechnung helfen ohne die Verhältnisse und Kräfte zu beeinflussen.

Modell	Zuganker					fliesen
	E-Modul [N/mm²] [MN/mm²]	Fläche A [mm²]	Länge L [m]	Steifigkeit L/EA [m/MN]	Festigkeit EA/L [MN/m]t	max FA [MN]
real 1	210000 – 0,21	452,4	0,2	0,0021052	475,0200	0,20901
real 2	200000 – 0,2	380,1	0,3	0,0039463	253,4000	0,17561
00	2100000 – 2,1	42000	2,0	0,0000227	44100,0	37,800
01	2100000 – 2,1	4200	2,0	0,0002268	4410,00	3,7800
02	2100000 – 2,1	420	2,0	0,0022676	441,000	0,3780
03	2100000 – 2,1	42	2,0	0,0226757	44,1000	0,0378

Um eine automatisierte Auswertung vornehmen zu können werden für alle Weiteren Rechnungen die Beobachtungspunkte (Monitoring Points) M1 bis M9 identisch festgelegt. M3 kann hierbei nicht im Modell beobachtet werden und wird aus der Verschiebung M7 mit der bekannten Federsteifigkeit zurückgerechnet.

- M1 u_x- Displacement 0,1500/-0,0100 [m] Displacement 1
- M2 F_x Last 0,1499/-0,0100 [MN] Compact Reaction
- M3 F_A Anker 0,1100/ 0,0000 [MN] aus M7
- M4 u_x Dübel 0,0000/-0,0200 [m] Displacement 1
- M5 u_y Dübel 0,0000/-0,0210 [m] Displacement 2
- M6 u_x Anker 0,0000/-0,0100 [m] Displacement 1
- M7 u_y Anker 0,0000/-0,0110 [m] Displacement 2
- M8 u_x Fuß 0,0000/-0,0x00 [m] Displacement 1
- M9 u_y Fuß 0,0000/-0,0x10 [m] Displacement 2

A3.4.1.4 Kohäsion

Im Materialgesetz der Kontaktflächen (Interfaces) wird eine Kohäsion definiert, um auf eine explizite Lagerung des Stahleinbauteiles verzichten zu können. Die Kohäsion wird benötigt, um eine schwimmende Lagerung des Einbauteiles numerisch realisieren zu können. Die Kohäsion wird im Allgemeinen mit 10% definiert. Ein Test des Einflusses ist in Tabelle 24 dargestellt. Im oberen Teil der Tabelle sind die Ergebnisse – Bruchlast und zugehörende Ankerkraft – für 4 untersuchte Ankersteifigkeiten dargestellt. Der Wert für die Kohäsion beträgt jeweils 10 %. Im unteren Teil wird dann für die Ankersteifigkeit „02" der Wert der Kohäsion geändert. Es zeigt sich das dieser Parameter – im Gegensatz zur Reibung – keinen Einfluss auf die Berechnung hat, aus numerischen Gründen – Lagerung – jedoch gebraucht wird. Die anzusetzende Kohäsion beeinflusst also das Rechenergebnis nicht.

System	Schritt	ux-Last [mm]	Vges [kN]	FA [kN]		
00	29	0,5800	345,9	270,3		
01	29	0,5800	345,8	111,5		
02 oder 02_10	31	0,6200	332,3	80,96		
03	32	0,6400	272,0	29,40		
Variation der Kohäsion C						
02_01	31	0,6200	332,3	80,96		
02_02	31	0,6200	332,3	80,96		
02_05	31	0,6200	332,3	80,96		
02_10	31	0,6200	332,3	80,96		
02_20	31	0,6200	332,3	80,96		
02_50	31	0,6200	332,3	80,96		

Tabelle 24 Einfluss der Kohäsion im Materialgesetz der Kontaktflächen.

A3.4.1.5 Beton

Für das Betongesetz können diverse Parameter verändert werden, um das Verhalten dem untersuchten Problem, oder den Werkstoff des Versuchs anzupassen.

Die Auswirkungen verschiedener Hauptparameter werden im System Beton „A200“ untersucht. Ausgangspunkt ist das System A200 mit:

Material SBETA Standard A200

```
Name:                                   SBeta Beton
Type:                                   CCSBETAMaterial
Elastic modulus                         E = 3.149E+04 [MPa]
Poisson''s ratio                        σm = 0.200 [-]
Tensile strength                        F_t = 2.464E+00 [MPa]
Compressive strength                    F_c = -2.797E+01 [MPa]
Type of tension softening :             Exponential
Specific fracture energy                G_f = 6.160E-05 [MN/m]
Crack model:                            Fixed
Compressive strain at compressive
strength in the uniaxial
compressive test                        Eps_C = -1.776E-03 [-]
Reduction of compressive strength
due to cracks                           CompRed = 0.800 [-]
Type of compression softening :         Crush Band
Critical compressive displacement Wd = -5.0000E-04 [m]
Shear Retention Factor                  Variable
Tension-compression interaction :       Linear
Specific material weight        Rho = 2.300E-02 [MN/m3]
Coefficient of thermal expansion        Alpha = 1.200E-05 [1/K]
```

Die Systeme A201 bis A204 werden folgendermaßen variiert:

A200	Vorgabe siehe oben		
A201	Shear	Tension-Compression interaction	hyperbola A
A202	Shear	Tension-Compression interaction	hyperbola B
A203	Compression	Type of compression softening	softening modus
A204	Tensile	Crack model	rotated

Es zeigt sich, dass lediglich im Modell A203, mit einem geänderten SOFTENING im Druckverhalten, die Kurven nennenswerte Differenzen zeigen. Die Zug-Druckinteraktion im Schubverhalten hat keinen erkennbaren Einfluss auf das Verhalten des Systems. Ebenso wirkt sich ein in die Hauptachsen gedrehtes Rissmodell nicht nennenswert auf die Ergebnisse aus.

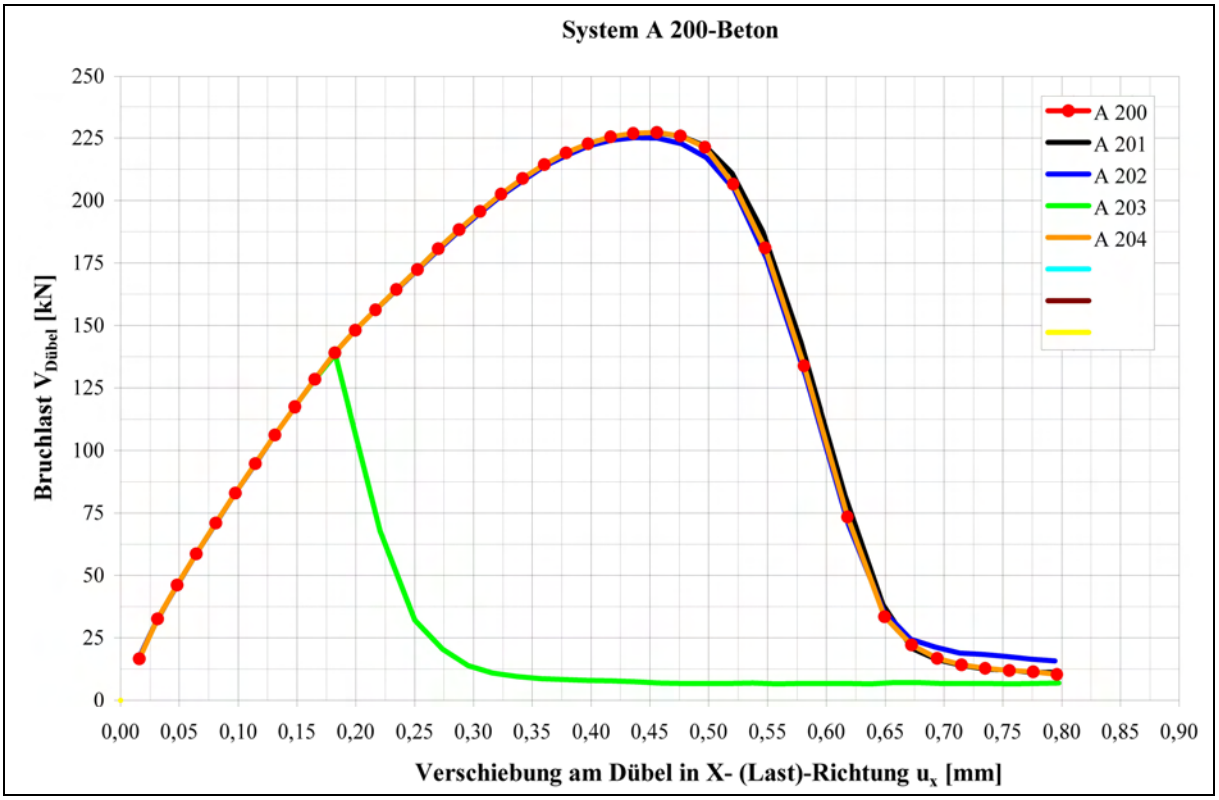


Abbildung 39 System A200-Beton V_{ges} über u_x am Dübel.

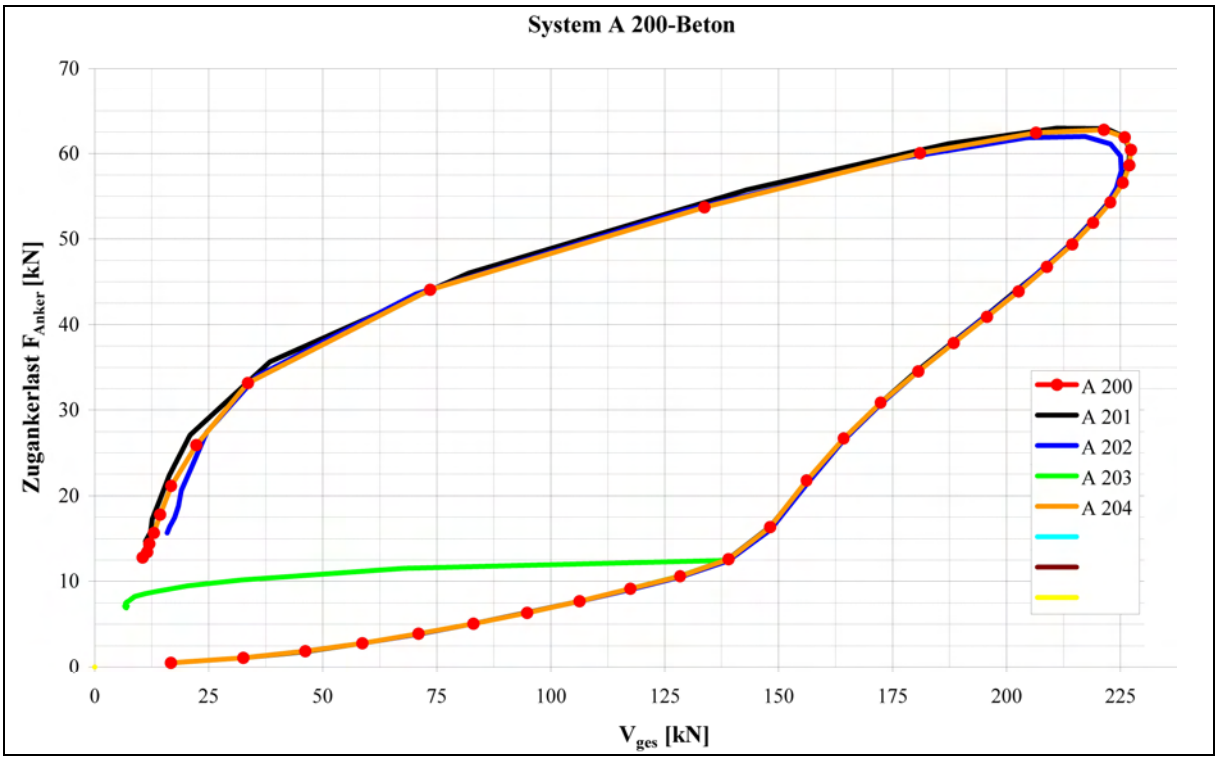


Abbildung 40 System A200-Beton Last im Zuganker F_A über V_{ges}.

A3.4.2 EXZENTRIZITÄT – E

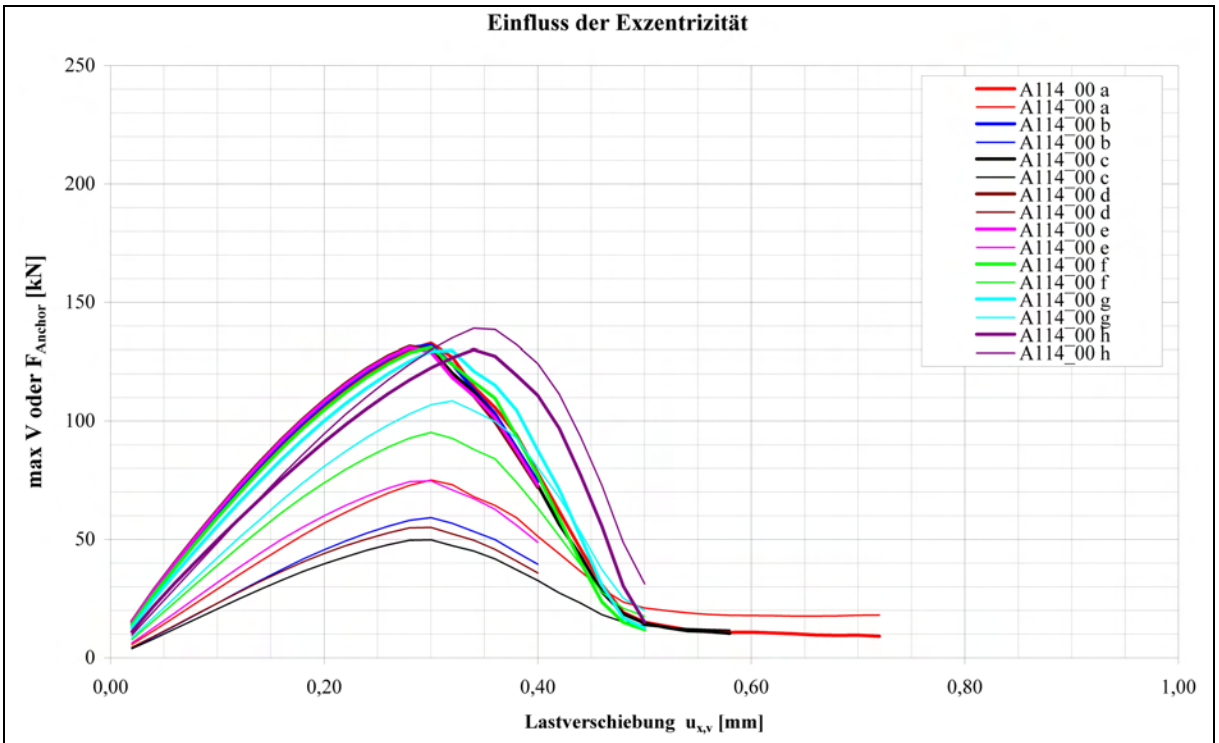
Ausgehend von der Parametertabelle der Berechnung „ Horizontal“ wird der Einfluss der Exzentrizität für einige ausgewählte Systeme untersucht. Dies entspricht einer planmäßigen Beanspruchung mit einem äußeren Moment.

(Bezeichnungen der Versuche siehe 6.5.3 und 6.5.4)

Im Weiteren sind horizontale Belastung und die Entwicklung der zugehörenden Ankerzugkraft jeweils für alle Exzentrizitäten über der aufgebrachten Verschiebung dargestellt. Die Kurven für die Horizontalkraft sind stärker angelegt, als die für die Ankerzugkraft. Eine Farbe repräsentiert immer eine Exzentrizität.

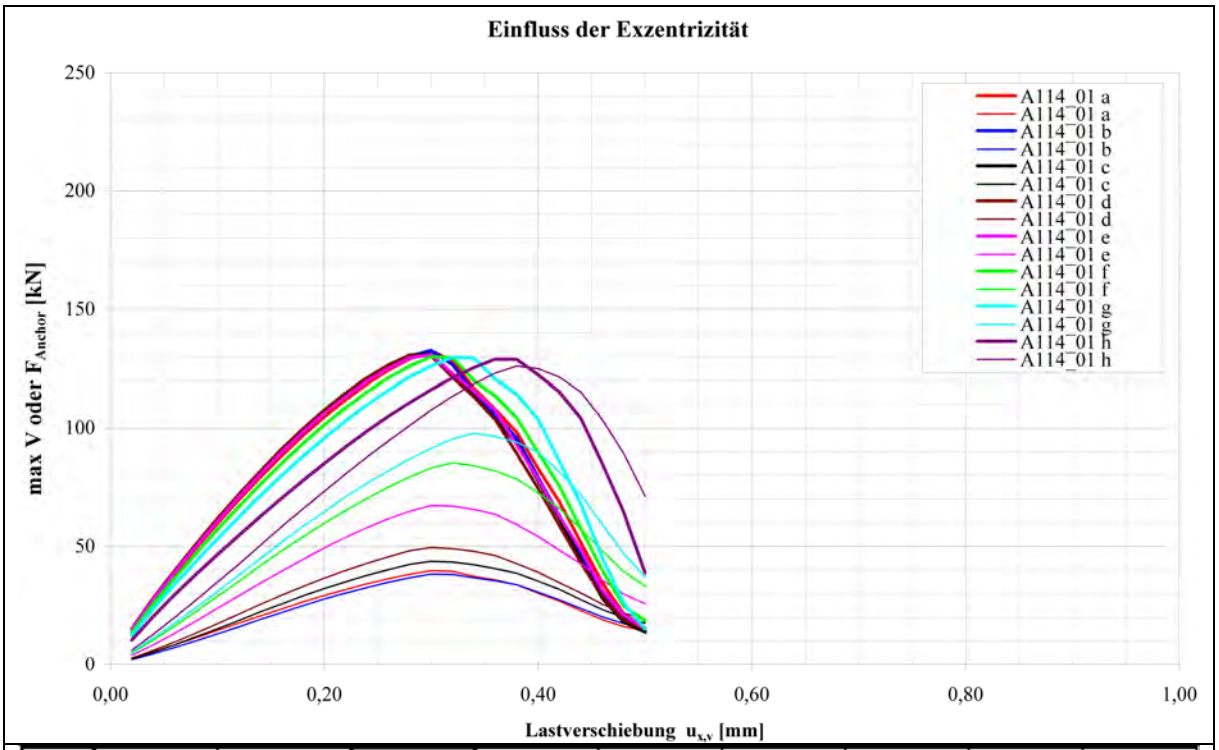
Es fällt auf, dass die Werte für die Bruchlasten bei steigenden Exzentrizitäten verhältnismäßig wenig abnehmen. Die notwendigen Verformungen nehmen aber mit zunehmender Exzentrizität stark zu. Dieser Effekt wird deutlicher, je steifer das System wird. Ist also für die Systeme 416 stark ausgeprägt, für die Systeme 116 hingegen kaum zu erkennen.

Auswertung A114



	ux Last	maxFx Last	FA Anker	ux Dübel	uy Dübel	ux Anker	uy Anker	ux Fuss	uy Fuss
	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
_00 a	0,30000	132,8	75,1	0,26240	0,01443	0,28650	0,00170	0,13060	0,01686
_00 b	0,30000	132,0	59,2	0,26530	0,01216	0,28880	0,00134	0,13300	0,01464
_00 c	0,28000	131,3	49,7	0,24850	0,00990	0,27110	0,00113	0,12140	0,01232
_00 d	0,28000	131,5	54,9	0,24910	0,00688	0,27060	0,00125	0,12020	0,00938
_00 e	0,28000	131,0	74,4	0,24530	-0,00078	0,26320	0,00169	0,11670	0,00189
_00 f	0,30000	131,1	95,2	0,25180	-0,00795	0,26730	0,00216	0,11990	-0,00514
_00 g	0,32000	129,7	108,5	0,25490	-0,01246	0,26850	0,00246	0,12320	-0,00957
_00 h	0,34000	130,1	139,1	0,24230	-0,01887	0,25700	0,00315	0,11060	-0,01567

Abbildung 41 A114 Ankersteifigkeit 00



	ux Last	maxFx Last	FA Anker	ux Dübel	uy Dübel	ux Anker	uy Anker	ux Fuss	uy Fuss
	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
_01 a	0,30000	132,4	39,8	0,26030	0,01976	0,28540	0,00902	0,12960	0,02206
_01 b	0,30000	132,6	38,3	0,26410	0,01652	0,28860	0,00868	0,13090	0,01894
_01 c	0,30000	131,1	43,8	0,26730	0,01359	0,29070	0,00993	0,13390	0,01608
_01 d	0,28000	130,5	48,2	0,24770	0,01112	0,26980	0,01093	0,11950	0,01356
_01 e	0,30000	130,8	67,3	0,26090	0,00484	0,27990	0,01525	0,12640	0,00750
_01 f	0,30000	129,9	83,2	0,24440	-0,00097	0,26090	0,01886	0,11370	0,00174
_01 g	0,32000	129,7	95,5	0,24380	-0,00460	0,25890	0,02165	0,11250	-0,00179
01 h	0,36000	128,9	123,1	0,24280	-0,00866	0,25930	0,02791	0,10900	-0,00575

Abbildung 42 A114 Ankersteifigkeit 01

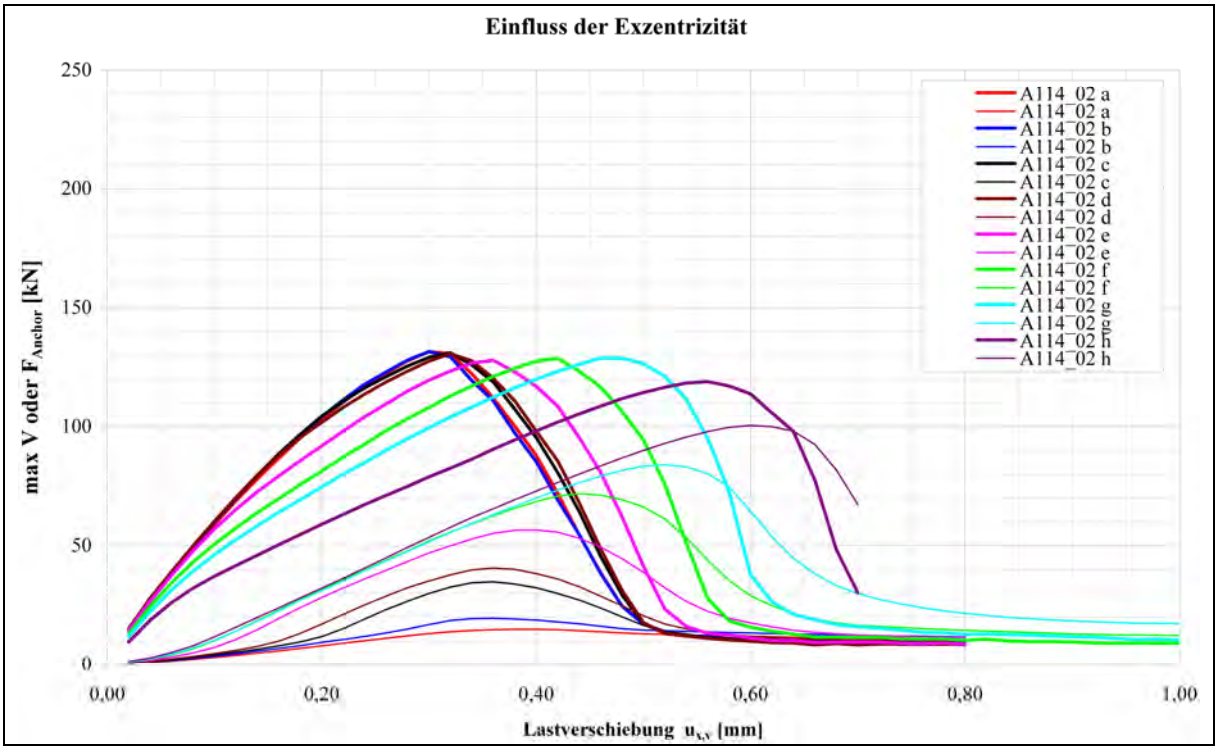
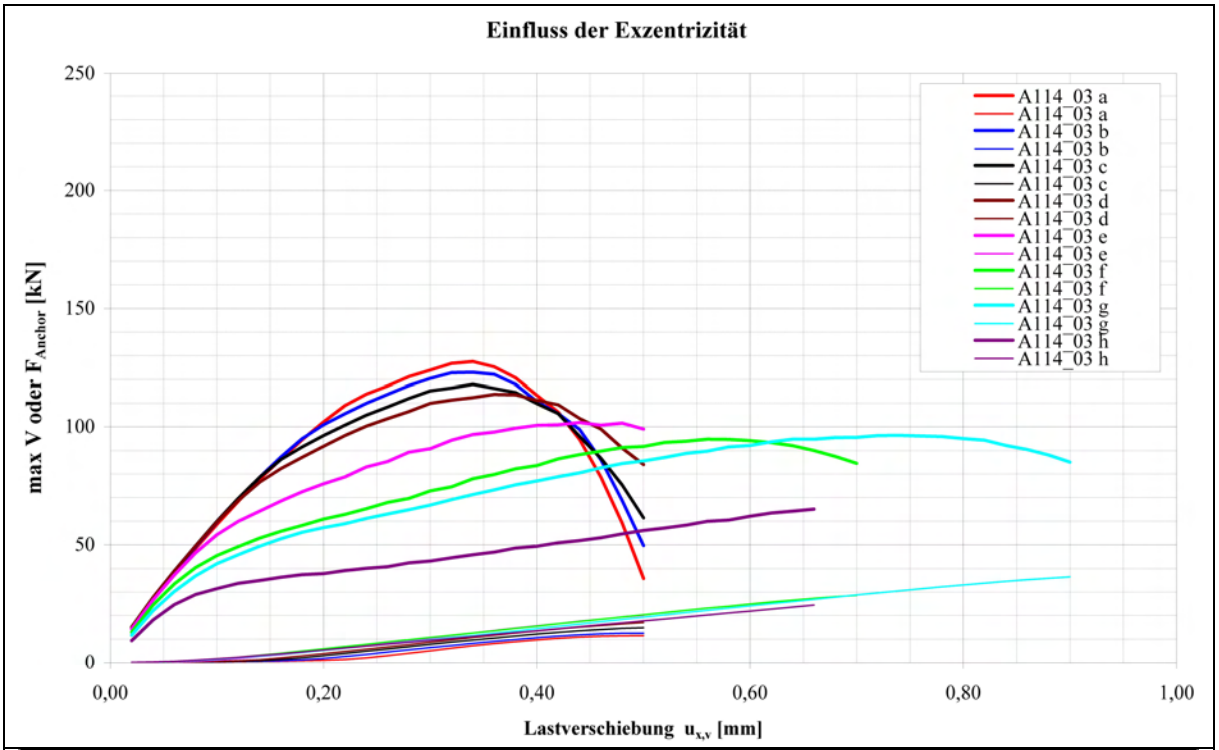


Abbildung 43 A114 Ankersteifigkeit 02

	ux Last	maxFx Last	FA Anker	ux Dübel	uy Dübel	ux Anker	uy Anker	ux Fuss	uy Fuss
	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
_02 a	0,30000	131,5	13,2	0,25910	0,02882	0,28590	0,02987	0,12750	0,03101
_02 b	0,30000	131,6	17,0	0,26200	0,02882	0,28870	0,03848	0,12730	0,03101
_02 c	0,32000	131,1	32,7	0,27920	0,04373	0,30780	0,07414	0,13500	0,04579
_02 d	0,32000	130,6	37,8	0,27480	0,04607	0,30290	0,08580	0,12980	0,04805
_02 e	0,36000	127,9	55,3	0,28720	0,05666	0,31470	0,12530	0,13530	0,05867
_02 f	0,42000	128,7	70,9	0,29940	0,06495	0,32740	0,16080	0,13640	0,06715
_02 g	0,46000	128,8	79,2	0,29640	0,06885	0,32450	0,17970	0,13410	0,07097
_02 h	0,56000	118,9	98,0	0,29740	0,08438	0,32950	0,22220	0,13060	0,08650

Abbildung 43 A114 Ankersteifigkeit 02 –Werte



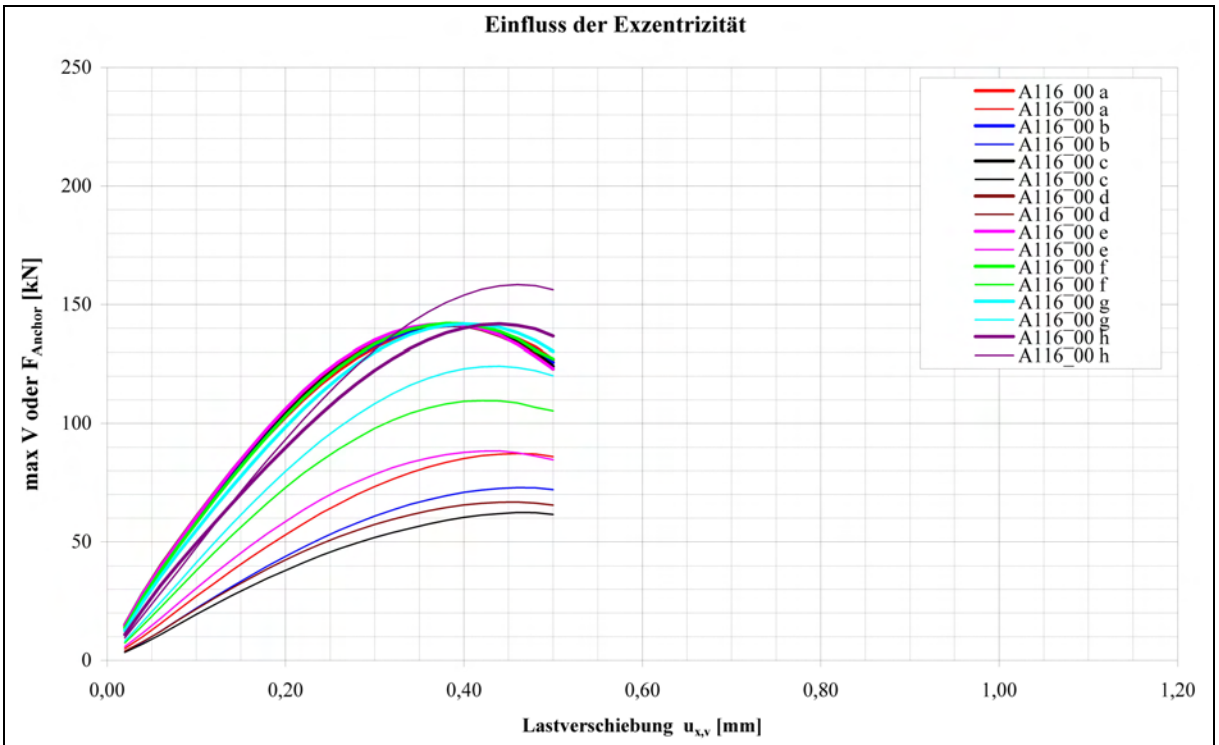
	ux Last	maxFx Last	FA Anker	ux Dübel	uy Dübel	ux Anker	uy Anker	ux Fuss	uy Fuss
	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
_03 a	0,34000	127,5	7,2	0,29450	0,09782	0,33170	0,16330	0,14530	0,09961
_03 b	0,34000	123,0	8,2	0,29200	0,10640	0,32940	0,18680	0,14200	0,10820
_03 c	0,34000	117,9	9,6	0,28490	0,11910	0,32300	0,21860	0,13640	0,12080
_03 d	0,36000	113,7	11,7	0,28990	0,14140	0,32980	0,26480	0,13800	0,14320
_03 e	0,48000	101,6	17,6	0,32430	0,22710	0,37360	0,43960	0,14730	0,22940
_03 f	0,56000	94,8	23,2	0,30250	0,26460	0,35580	0,52520	0,12490	0,26680
_03 g	0,74000	96,5	30,5	0,34150	0,35130	0,40750	0,69110	0,13040	0,35410
_03 h	0,66000	65,1	24,5	0,21300	0,28070	0,26540	0,55550	0,06304	0,28260

Abbildung 44 A114 Ankersteifigkeit 03

Zusammenfassung A114

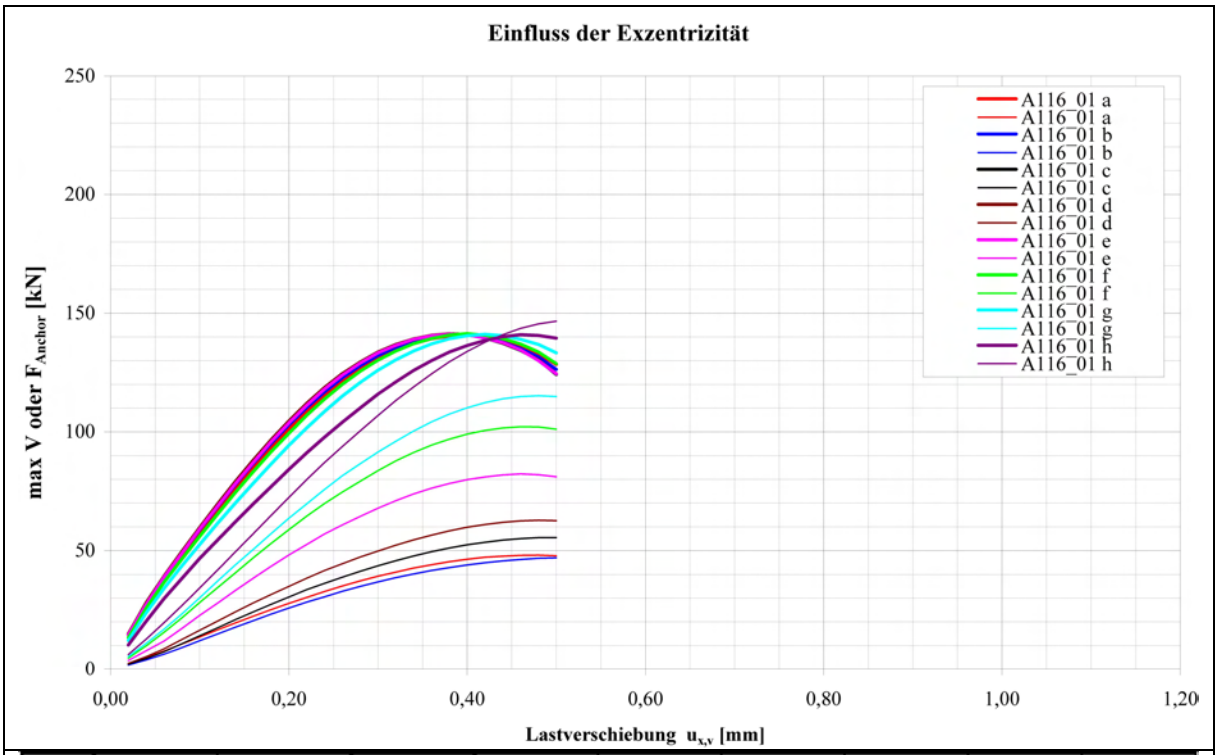
	u_x Last [mm]		V [kN]		F_A Anker [kN]			
114_00	0,30	0,34	133	130	50	140		
114_01	0,30	0,36	132	129	40	123		
114_02	0,30	0,56	132	119	13	98		
114_03	0,34	0,74	128	65	7	25		

A3.4.2.1 Auswertung A116



	ux Last	maxFx Last	FA Anker	ux Dübel	uy Dübel	ux Anker	uy Anker	ux Fuss	uy Fuss
	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
_00 a	0,40000	141,3	85,3	0,36090	0,02018	0,38510	0,00193	0,02082	0,02443
_00 b	0,38000	141,1	69,5	0,34450	0,01716	0,36800	0,00158	0,02282	0,02134
_00 c	0,38000	141,5	59,1	0,34760	0,01097	0,37070	0,00134	0,02313	0,01910
_00 d	0,38000	141,4	64,5	0,34840	0,00731	0,37040	0,00146	0,02362	0,01594
_00 e	0,38000	141,9	86,9	0,34520	-0,00088	0,36340	0,00197	0,02487	0,00859
_00 f	0,38000	142,1	108,3	0,33140	-0,00924	0,34670	0,00246	0,02648	0,00049
_00 g	0,40000	141,9	123,0	0,33300	-0,01072	0,34680	0,00279	0,02625	-0,00428
_00 h	0,44000	141,9	157,9	0,33720	-0,01836	0,35180	0,00358	0,02496	-0,01151

Abbildung 45 A116 Ankersteifigkeit 00



	ux Last	maxFx Last	FA Anker	ux Dübel	uy Dübel	ux Anker	uy Anker	ux Fuss	uy Fuss
	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
_01 a	0,40000	140,7	46,4	0,35880	0,02591	0,38400	0,01052	0,01908	0,02945
_01 b	0,40000	140,9	44,0	0,36330	0,02213	0,38790	0,00998	0,01959	0,02626
_01 c	0,38000	141,1	51,1	0,34630	0,01434	0,37020	0,01159	0,02252	0,02206
_01 d	0,38000	141,3	58,4	0,34640	0,01181	0,36920	0,01324	0,02307	0,01987
_01 e	0,38000	141,1	78,3	0,34030	0,00514	0,35940	0,01775	0,02377	0,01388
_01 f	0,40000	141,4	99,0	0,34210	-0,00138	0,35880	0,02246	0,02389	0,00815
_01 g	0,42000	141,1	112,3	0,34000	-0,00167	0,35540	0,02547	0,02325	0,00422
_01 h	0,46000	140,9	143,6	0,33390	-0,00648	0,35070	0,03256	0,02261	-0,00046

Abbildung 46 A116 Ankersteifigkeit 01

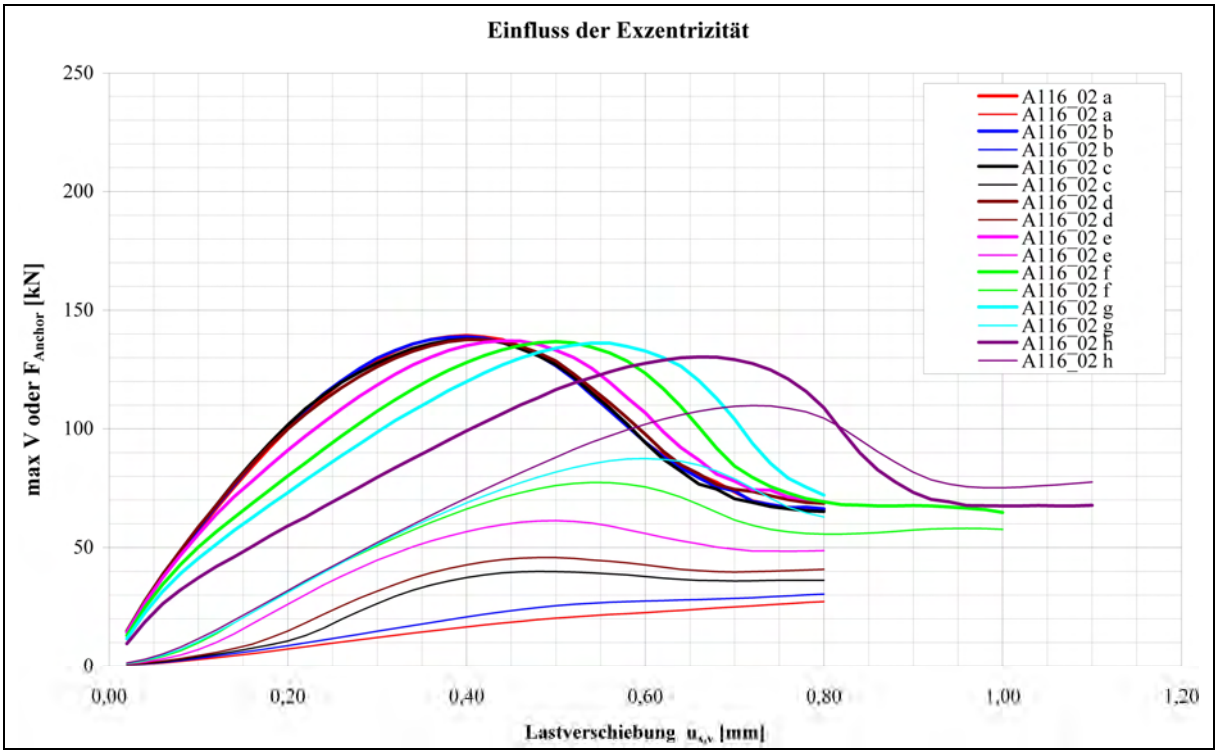
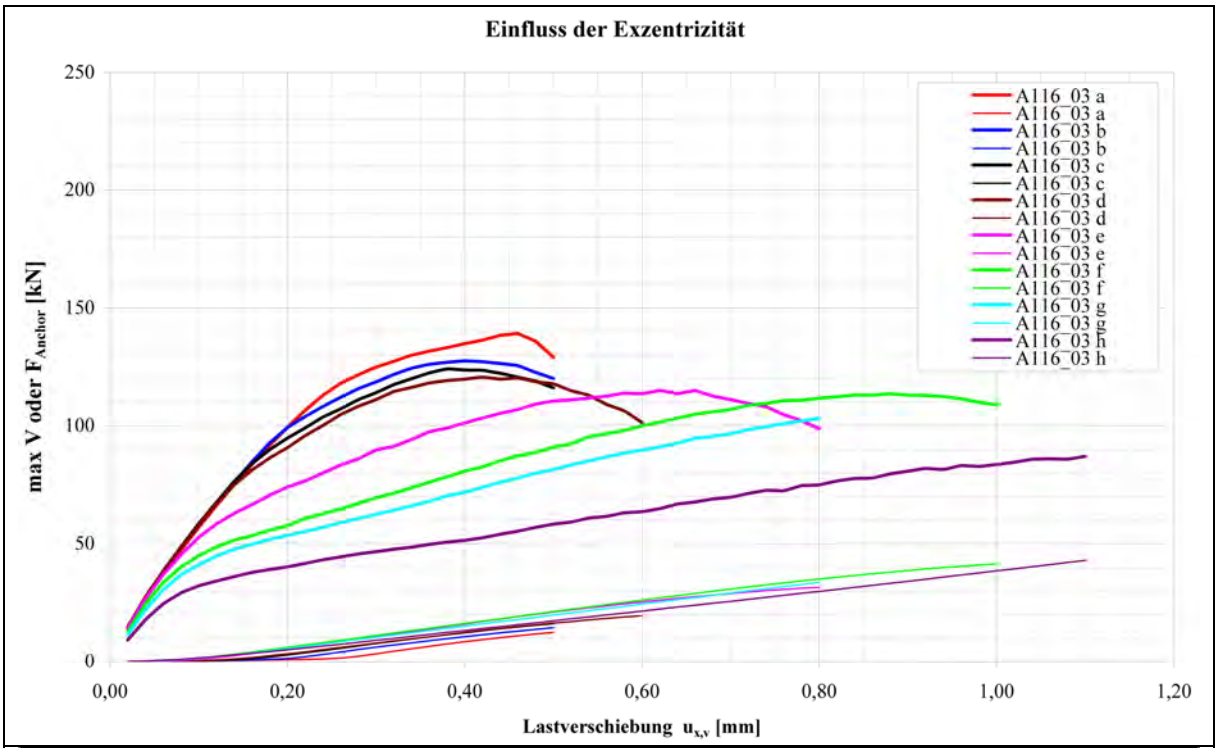


Abbildung 47 A116 Ankersteifigkeit 02

	ux Last	maxFx Last	FA Anker	ux Dübel	uy Dübel	ux Anker	uy Anker	ux Fuss	uy Fuss
	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
_02 a	0,40000	139,3	16,6	0,35750	0,03494	0,38510	0,03765	0,01615	0,03741
_02 b	0,40000	138,8	20,8	0,36060	0,03386	0,38800	0,04717	0,01489	0,03657
_02 c	0,40000	137,8	37,4	0,35800	0,04400	0,38690	0,08479	0,01285	0,05020
_02 d	0,40000	137,6	42,8	0,35300	0,04685	0,38140	0,09695	0,01339	0,05303
_02 e	0,44000	137,1	59,6	0,36380	0,05511	0,39110	0,13520	0,01075	0,06194
_02 f	0,40000	139,3	76,1	0,35750	0,03494	0,38510	0,03765	0,01615	0,03741
_02 g	0,54000	136,1	85,3	0,36700	0,07261	0,39490	0,19340	0,00995	0,07464
_02 h	0,66000	130,3	107,4	0,37360	0,09089	0,40630	0,24360	0,00503	0,09322

Abbildung 47 A116 Ankersteifigkeit 02 – Werte



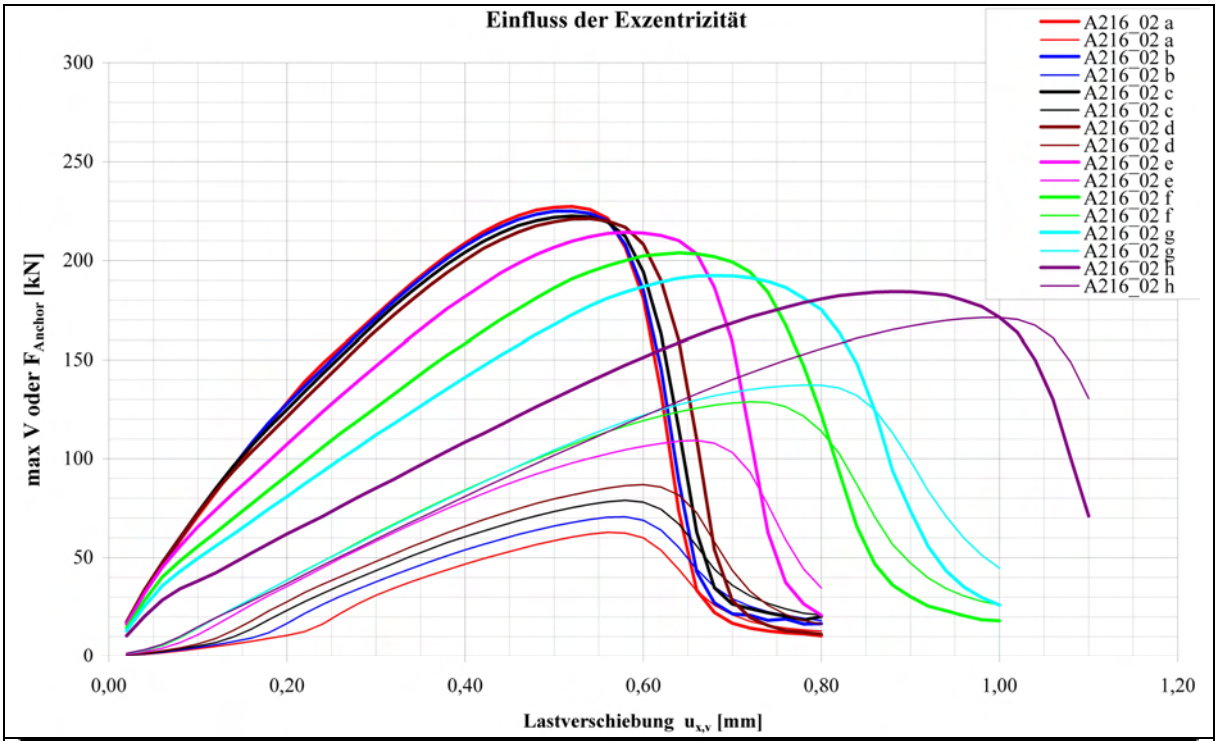
	ux Last	maxFx Last	FA Anker	ux Dübel	uy Dübel	ux Anker	uy Anker	ux Fuss	uy Fuss
	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
_03 a	0,46000	139,1	11,0	0,41010	0,14210	0,45420	0,24860	0,00202	0,14460
_03 b	0,40000	127,5	10,7	0,34870	0,13430	0,38900	0,24150	0,00681	0,13600
_03 c	0,38000	124,2	11,5	0,32120	0,13520	0,36070	0,25990	0,00726	0,14150
_03 d	0,46000	120,3	14,9	0,37900	0,17370	0,42290	0,33870	0,00026	0,18200
_03 e	0,66000	115,0	27,6	0,45220	0,31860	0,51310	0,62640	-0,01306	0,33090
_03 f	0,88000	113,6	38,0	0,48290	0,43410	0,55900	0,86200	-0,02917	0,44880
_03 g	0,80000	103,2	33,7	0,36740	0,38850	0,43540	0,76330	-0,02136	0,39110
_03 h	1,06000	86,1	41,2	0,33290	0,47870	0,41370	0,93370	-0,06497	0,48190

Abbildung 48 A116 Ankersteifigkeit 03

Zusammenfassung A116

	u_x Last [mm]		V [kN]		F_A Anker [kN]			
116_00	0,40	0,44	141	142	85	158		
116_01	0,40	0,46	141	141	46	144		
116_02	0,40	0,66	139	130	17	107		
116_03	0,40	0,80	139	103	11	34		

A3.4.2.2 Auswertung A216



	ux Last	maxFx Last	FA Anker	ux Dübel	uy Dübel	ux Anker	uy Anker	ux Fuss	uy Fuss
	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
_02 a	0,52000	227,3	60,4	0,45570	0,08616	0,50040	0,13700	0,13660	0,06320
_02 b	0,52000	225,0	67,8	0,45690	0,08910	0,50060	0,15370	0,13130	0,06562
_02 c	0,52000	222,5	75,3	0,45400	0,09266	0,49660	0,17070	0,12690	0,06900
_02 d	0,54000	221,2	83,6	0,46420	0,09628	0,50550	0,18950	0,12450	0,07163
_02 e	0,58000	214,3	104,6	0,45660	0,10470	0,49450	0,23710	0,11310	0,07958
_02 f	0,64000	203,9	123,8	0,44320	0,11350	0,47910	0,28070	0,10510	0,08853
_02 g	0,68000	192,3	131,9	0,42450	0,11510	0,45820	0,29900	0,09312	0,09067
_02 h	0,88000	184,3	165,1	0,44920	0,14260	0,49000	0,37430	0,08484	0,11550

Abbildung 49 A216 Ankersteifigkeit 02

Auswertung A236

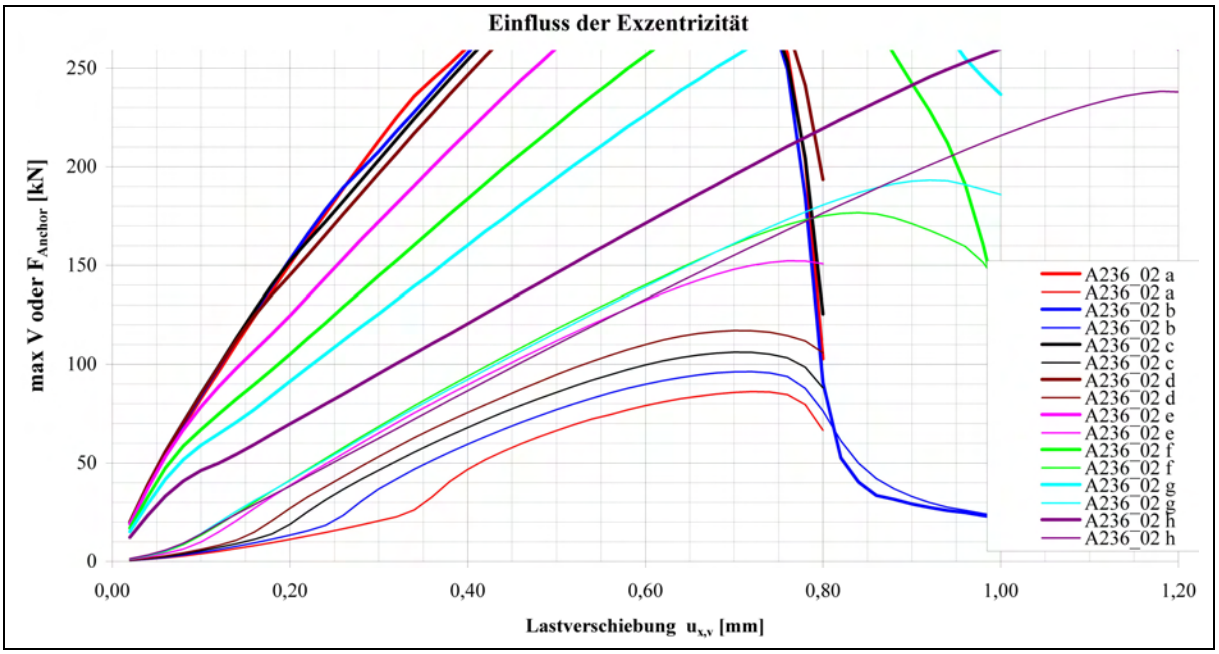
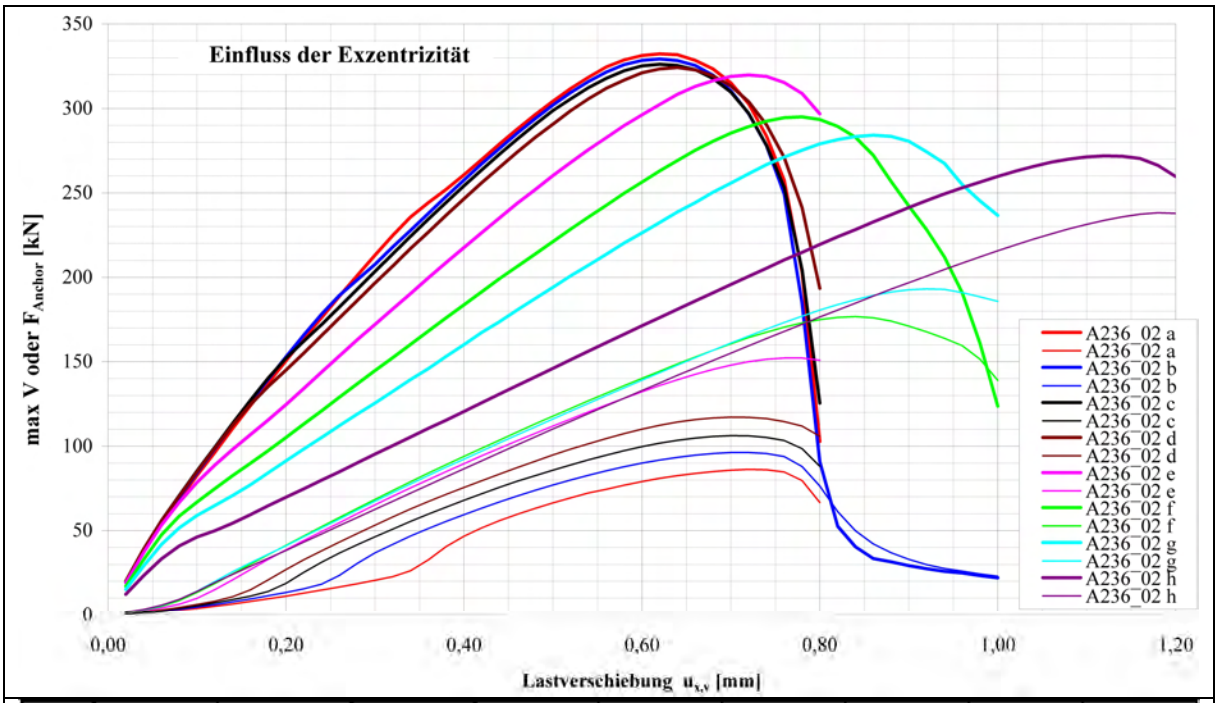


Abbildung 50 A236 Ankersteifigkeit 02



	ux Last	maxFx Last	FA Anker	ux Dübel	uy Dübel	ux Anker	uy Anker	ux Fuss	uy Fuss
	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
_02 a	0,62000	332,3	81,0	0,52660	0,12230	0,59020	0,18360	0,13280	0,09366
_02 b	0,62000	329,3	91,8	0,52980	0,12690	0,59170	0,20820	0,12930	0,09766
_02 c	0,62000	326,2	101,7	0,52720	0,13110	0,58710	0,23070	0,12490	0,10140
_02 d	0,64000	324,2	114,3	0,53480	0,13870	0,59250	0,25910	0,12200	0,10830
_02 e	0,72000	319,8	150,0	0,54570	0,15800	0,59970	0,34010	0,10880	0,12590
_02 f	0,78000	295,0	173,0	0,51030	0,16690	0,55950	0,39240	0,09060	0,13580
_02 g	0,86000	284,2	189,3	0,50160	0,17480	0,54840	0,42920	0,08338	0,14390
_02 h	1,12000	271,9	233,8	0,52490	0,21350	0,58080	0,53020	0,05744	0,17900

Abbildung 51 A236 Ankersteifigkeit 02

Auswertung A316

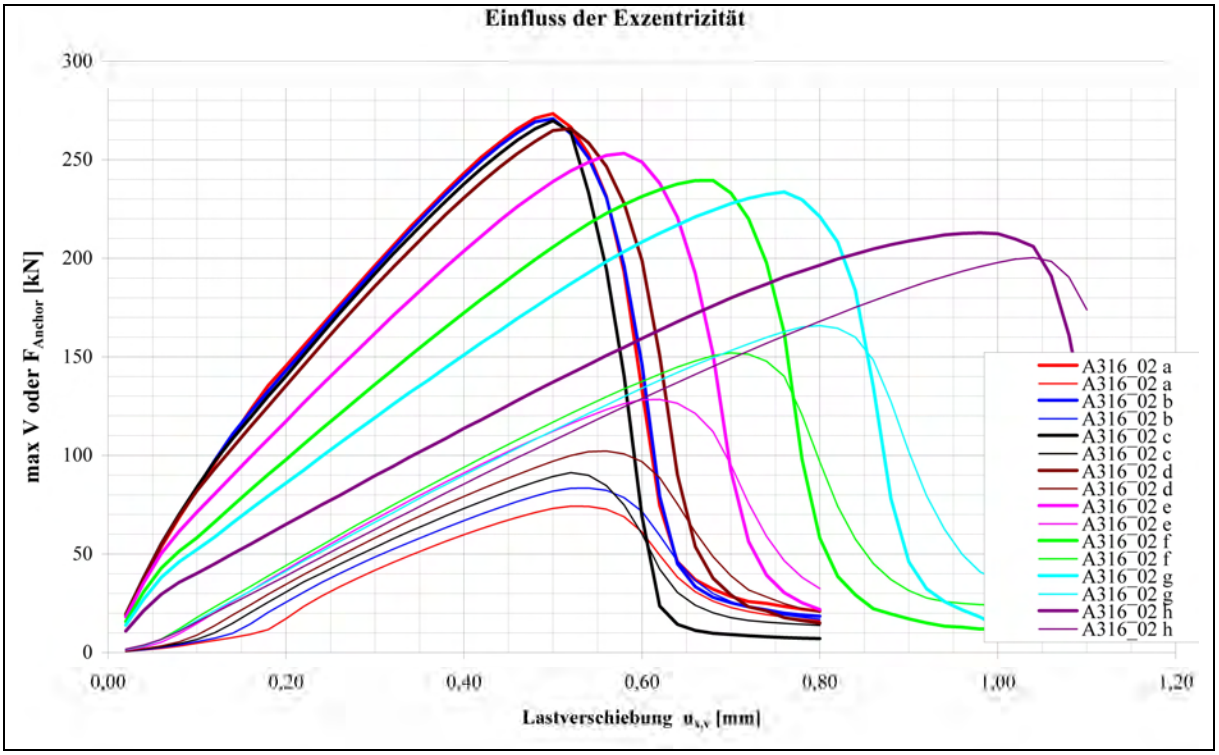
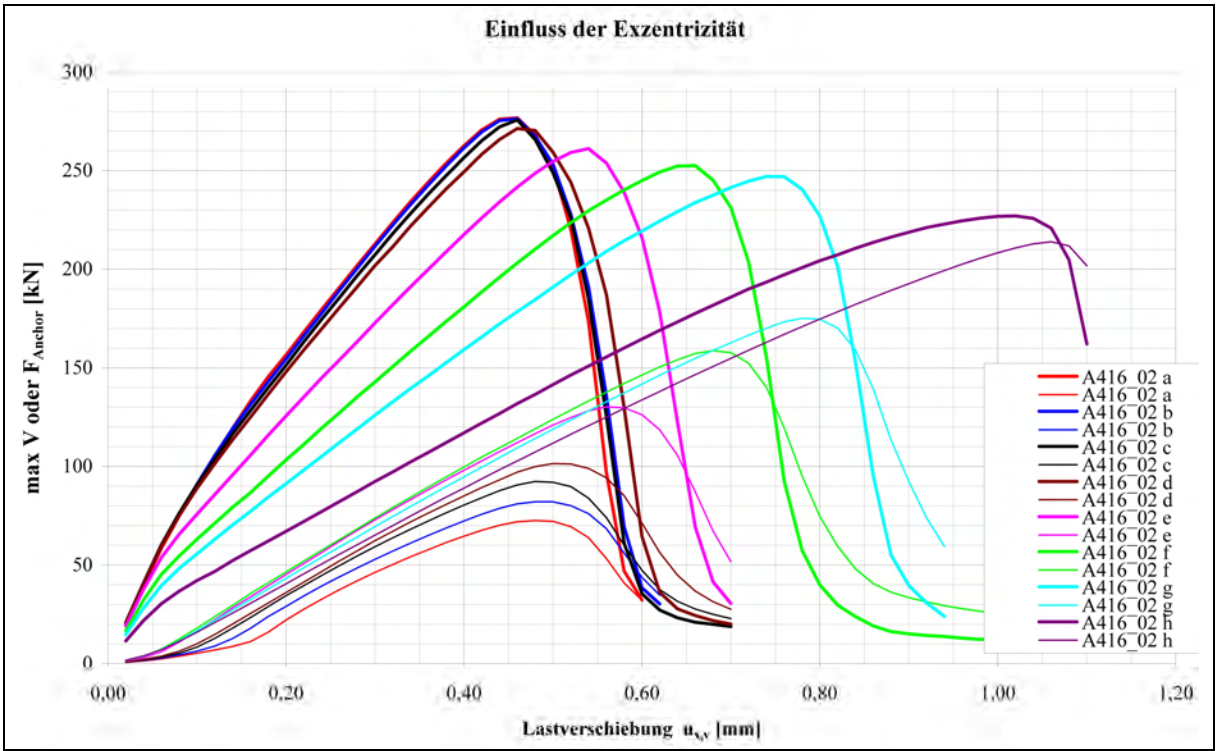


Abbildung 52 A316 Ankersteifigkeit 02

	ux Last	maxFx Last	FA Anker	ux Dübel	uy Dübel	ux Anker	uy Anker	ux Fuss	uy Fuss
	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
_02 a	0,50000	273,3	73,1	0,42210	0,09946	0,47630	0,16570	0,23170	0,09061
_02 b	0,50000	270,7	81,8	0,42320	0,10210	0,47670	0,18560	0,22240	0,09300
_02 c	0,50000	269,7	89,3	0,41930	0,10250	0,47180	0,20260	0,20780	0,09279
_02 d	0,52000	265,8	100,0	0,42740	0,10830	0,47880	0,22670	0,20650	0,09860
_02 e	0,58000	253,2	126,3	0,42960	0,11840	0,47750	0,28630	0,18390	0,10820
_02 f	0,68000	239,5	150,6	0,43760	0,12700	0,48440	0,34150	0,16730	0,11620
_02 g	0,76000	233,6	162,8	0,43770	0,12910	0,48370	0,36910	0,15500	0,11800
_02 h	0,98000	212,9	195,7	0,45440	0,15030	0,50860	0,44380	0,13540	0,13820

Abbildung 52 A316 Ankersteifigkeit 02 – Werte

A3.4.2.3 Auswertung A416



	ux Last	maxFx Last	FA Anker	ux Dübel	uy Dübel	ux Anker	uy Anker	ux Fuss	uy Fuss
	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
_02 a	0,46000	276,7	72,0	0,38810	0,10180	0,43590	0,16320	0,25420	0,09400
_02 b	0,46000	276,3	81,1	0,38920	0,10540	0,43620	0,18390	0,24320	0,09702
_02 c	0,46000	275,7	90,7	0,38500	0,10950	0,43120	0,20560	0,22600	0,10050
_02 d	0,46000	271,3	97,1	0,37510	0,11130	0,41920	0,22020	0,20980	0,10190
_02 e	0,54000	261,1	128,2	0,39380	0,12600	0,43480	0,29070	0,19050	0,11470
_02 f	0,66000	252,5	157,3	0,41430	0,14080	0,45450	0,35670	0,17760	0,12800
_02 g	0,74000	247,0	170,1	0,41030	0,14360	0,44930	0,38570	0,15980	0,13010
_02 h	1,02000	227,0	210,8	0,45370	0,16690	0,50280	0,47810	0,14530	0,15030

Abbildung 53 A416 Ankersteifigkeit 02

A3.4.3 EXZENTRIZITÄT DER LAST V MIT NORMALBEANSPRUCHUNG

Ausgehend von der Parametertabelle der Berechnung „ Horizontal“ wird der Einfluss der Exzentrizität mit gleichzeitig wirkender Normalbeanspruchung für einige ausgewählte Systeme untersucht. Die gewählten Systeme sind 114, 116, 136, 216, 236 und 416, sowie weitere nicht systematisch sondern als Einzelstichprobe gewählte. (Siehe hierzu Tabelle 25)

Für die Normalbeanspruchung werden diese Werte untersucht.

- Druck 100 kN
- Druck 200 kN
- N = 0 kN siehe A3.4.2
- Zug 100 kN
- Zug 200 kN

Die Beanspruchung wird in Schritten von 20 kN in jedem 2ten Lastschritt der Horizontalbeanspruchung aufgebracht, und nach erreichen des vorgesehenen Wertes konstant gehalten. Benennung der Lastfälle Exzentrizität wie oben.

f_c [N/mm²]	28	38	48	28	38	48	28	38	48	28	38	48
Einbinde-tiefe	**Dübeldicke t_{Lug}**											
	t_{Lug} = 20 mm			**t_{Lug} = 40 mm**			**t_{Lug} = 60 mm**			**t_{Lug} = 80 mm**		
h_L = 10 mm	111	121	131	211	221	231	311	321	331	411	421	431
h_L = 20 mm	112	122	132	212	222	232	312	322	332	412	422	432
h_L = 30 mm	113	123	133	213	223	233	313	323	333	413	423	433
h_L = 40 mm	**114**	124	134	214	224	234	314	324	334	414	424	434
h_L = 60 mm	115	125	135	215	225	235	315	325	335	415	425	435
h_L = 80 mm	**116**	126	**136**	**216**	226	**236**	316	326	336	**416**	426	436
h_L = 100mm	117	127	137	217	227	235	317	327	337	417	427	437
h_L = 150mm	118	128	138	218	228	238	318	328	338	418	428	438

Tabelle 25 Benennung der Rechnungen

A3.4.3.1 Auswertung A136

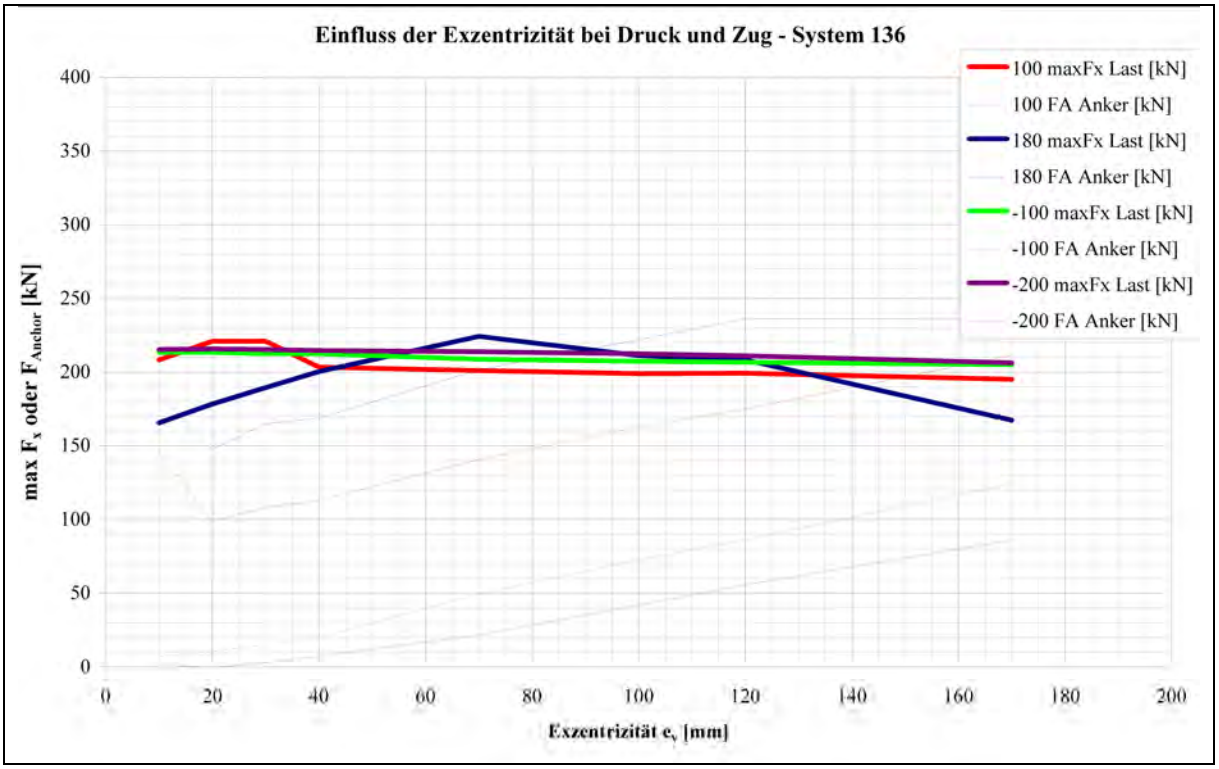


Abbildung 54 A136 Einfluss der Exzentrizität bei Normalkraft, Ankersteifigkeit 02

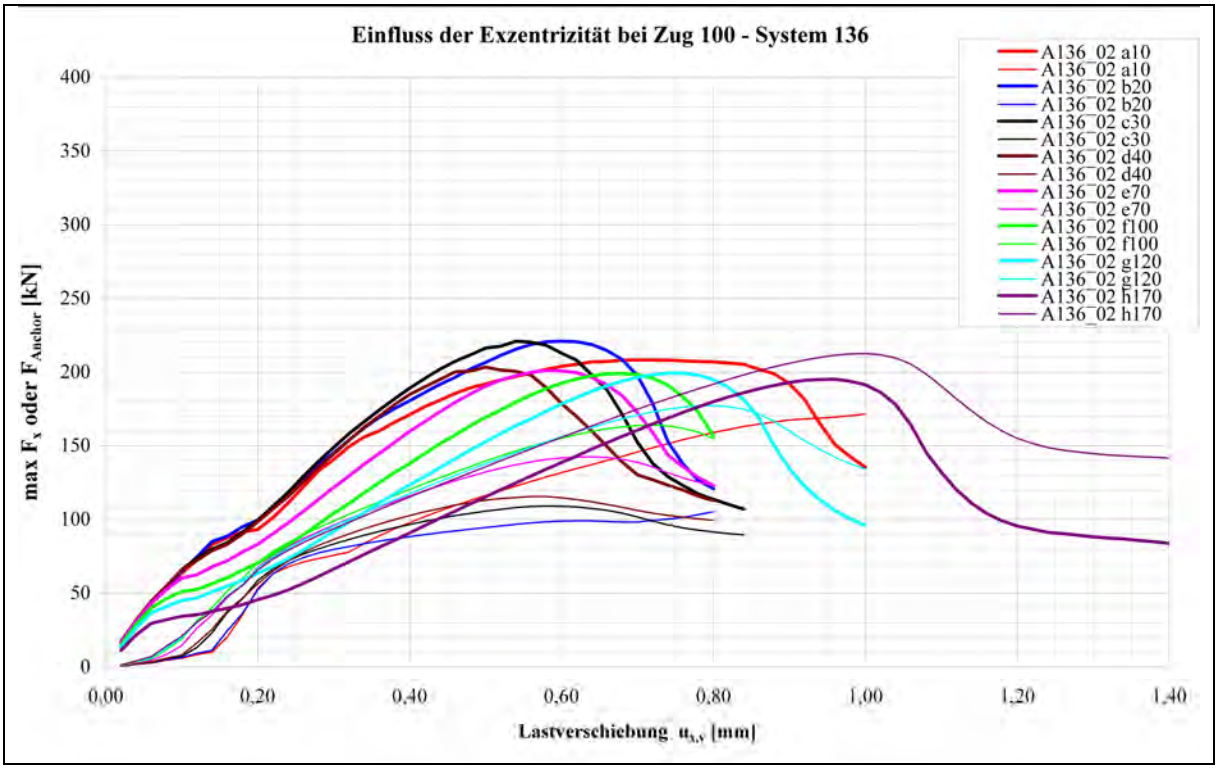


Abbildung 55 A136 Zug 100 kN für Ankersteifigkeit 02

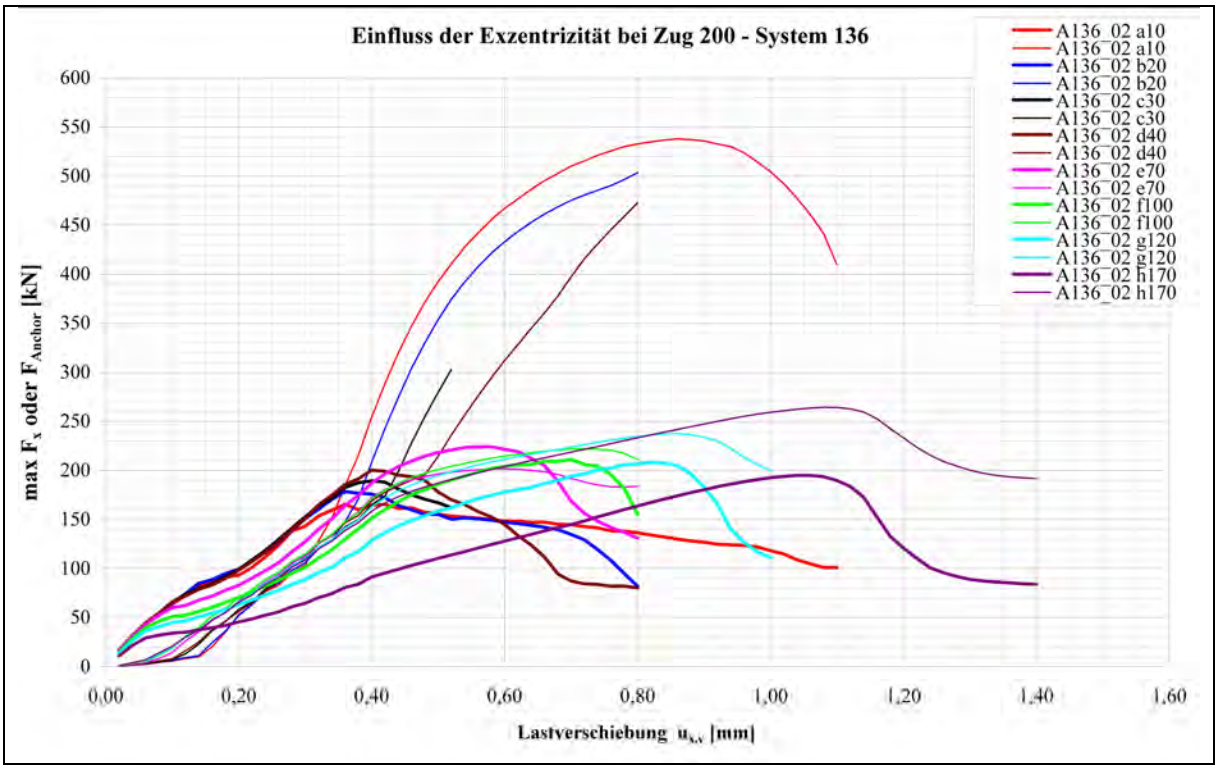


Abbildung 56 A136 Zug 200 kN für Ankersteifigkeit 02

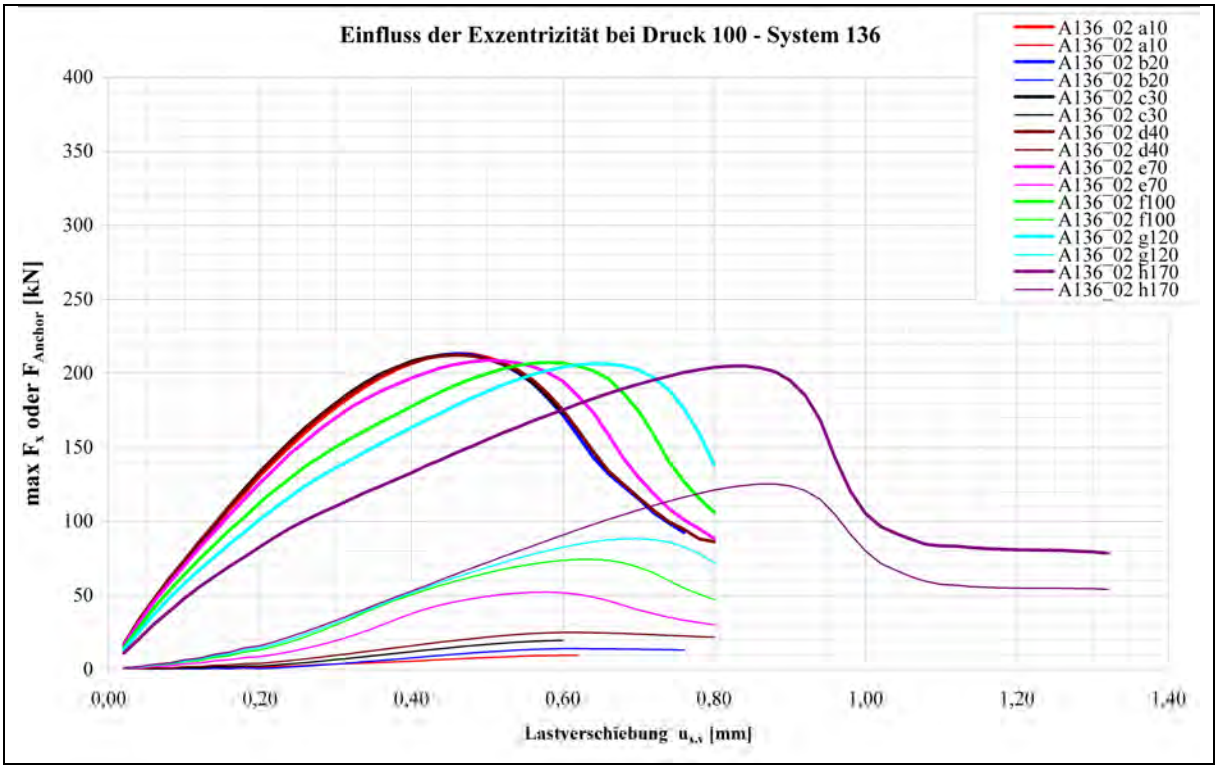


Abbildung 57 A136 Druck 100 kN für Ankersteifigkeit 02

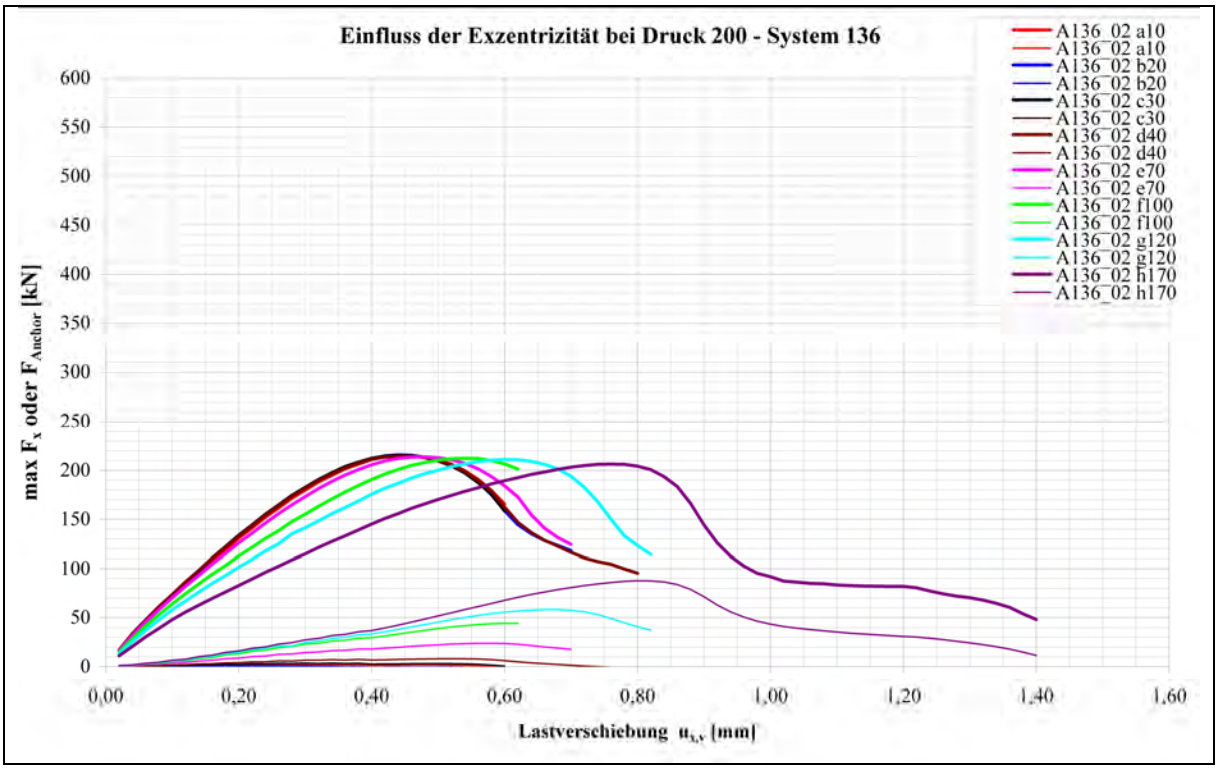


Abbildung 58 A136 Druck 200 kN für Ankersteifigkeit 02

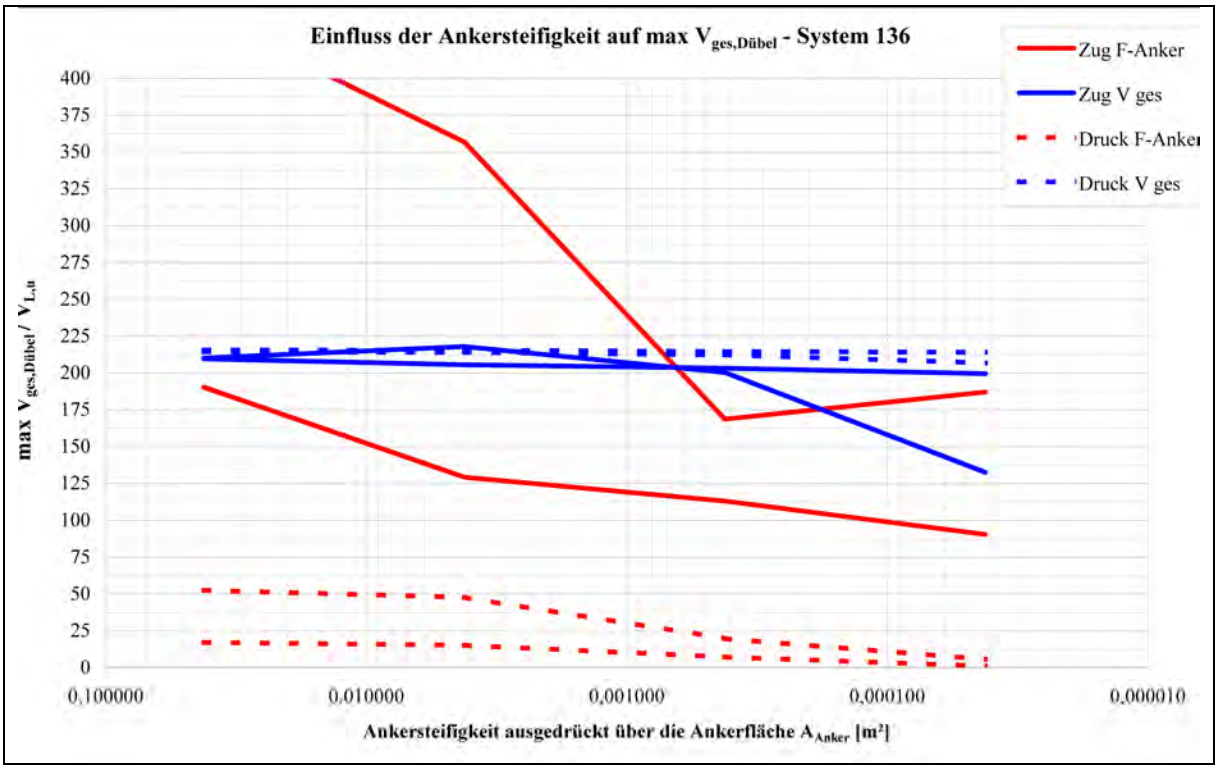


Abbildung 59 A136 Variation der Ankersteifigkeit, bei Exzentrizität 40 mm

A3.4.3.2 Auswertung A236

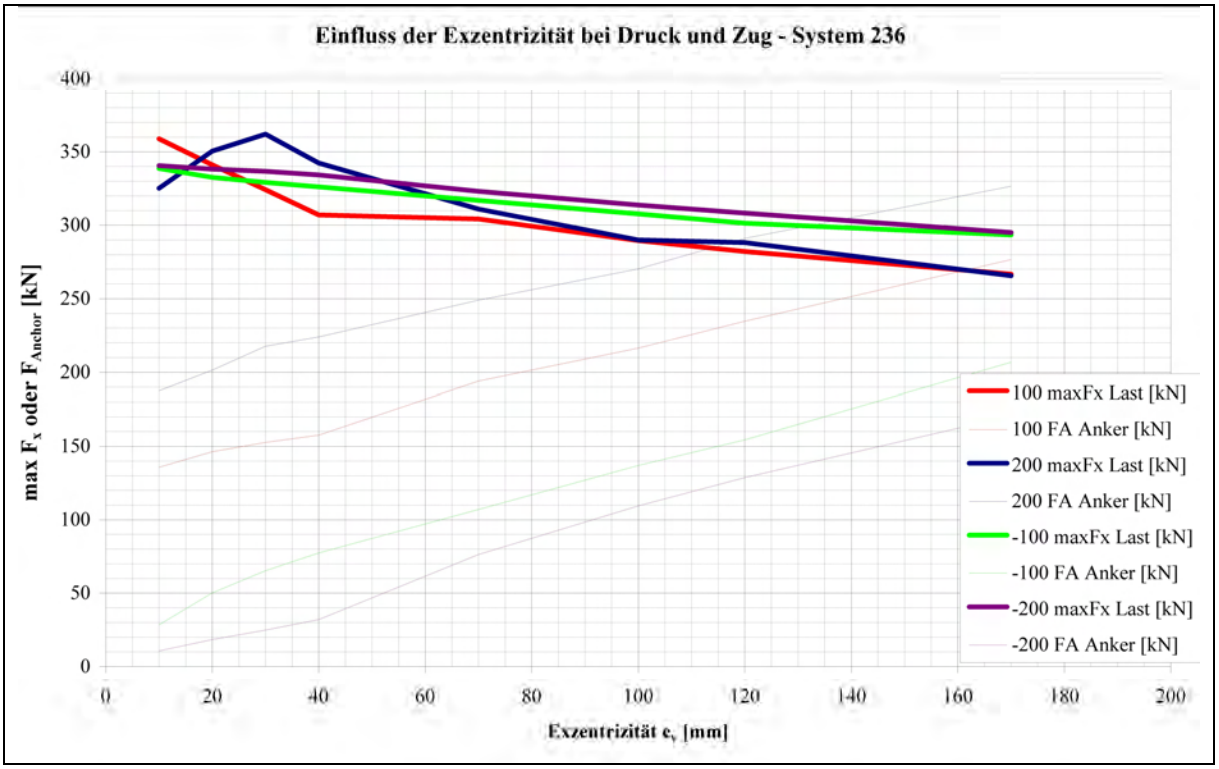


Abbildung 60 A236 Einfluss der Exzentrizität bei Normalkraft, Ankersteifigkeit 02

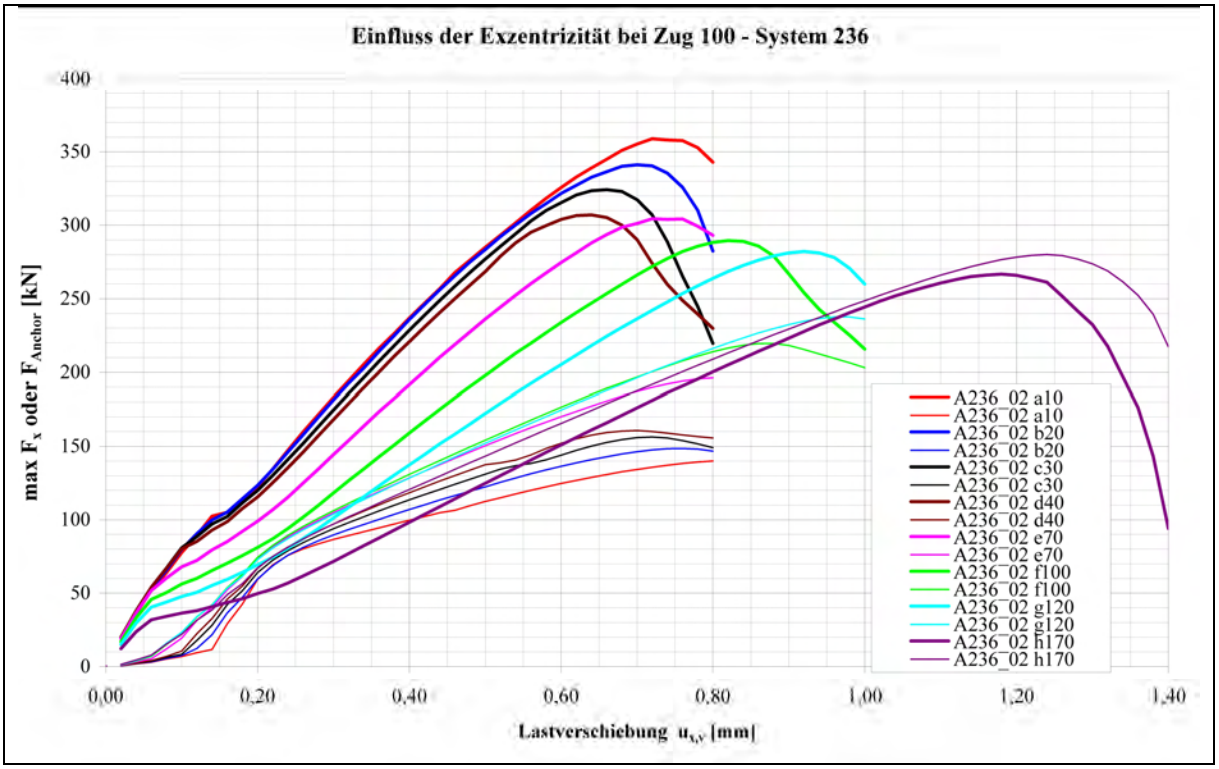


Abbildung 61 A236 Zug 100 kN für Ankersteifigkeit 02

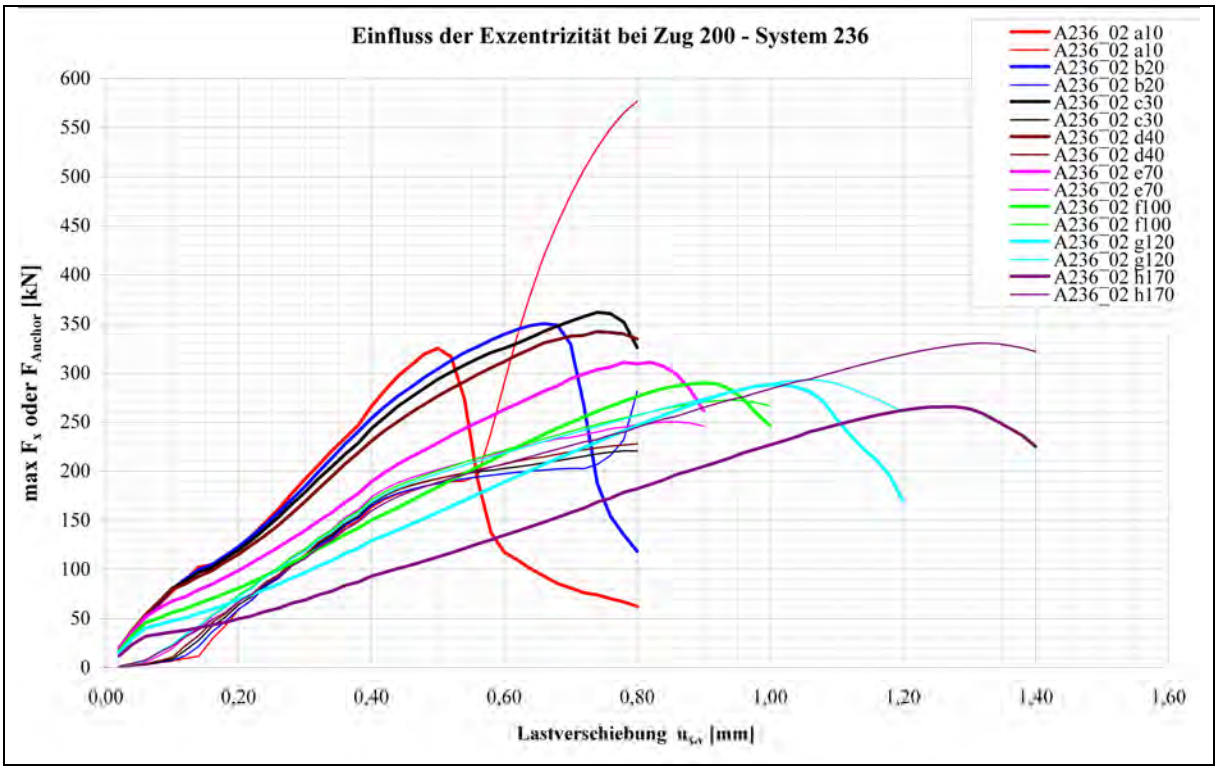


Abbildung 62 A236 Zug 200 kN für Ankersteifigkeit 02

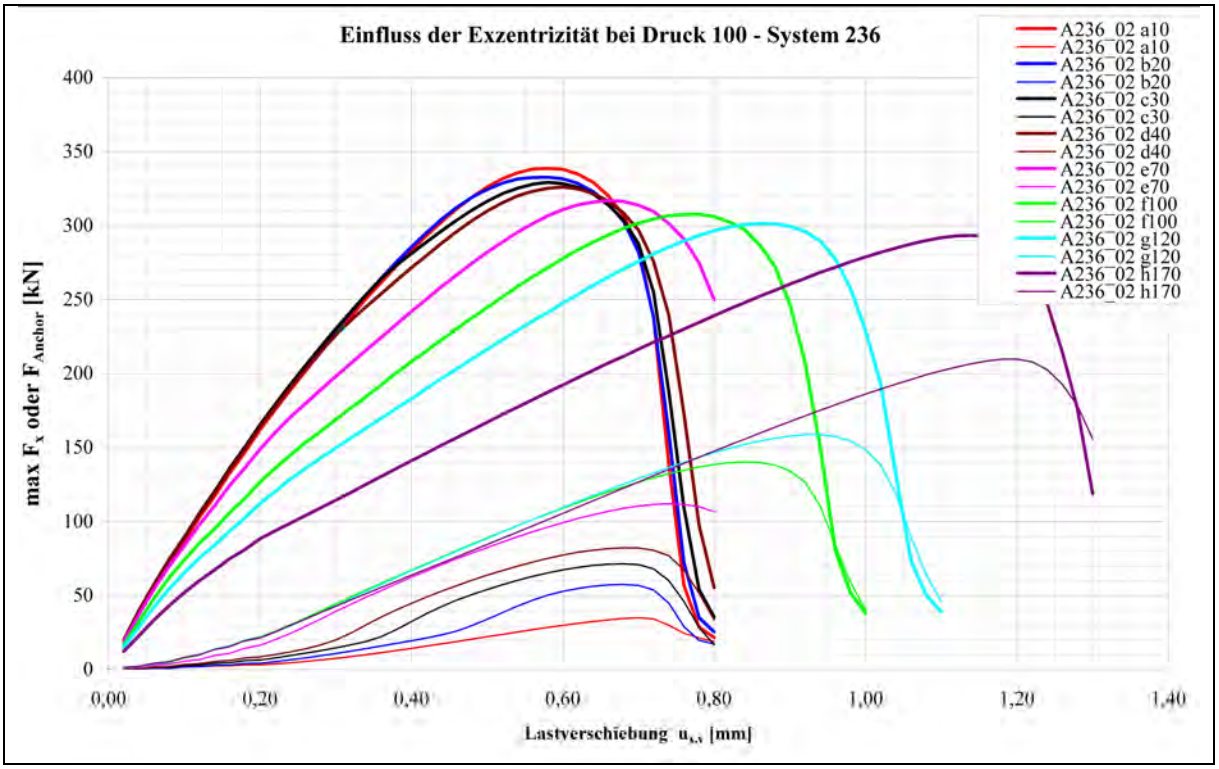


Abbildung 63 A236 Druck 100 kN für Ankersteifigkeit 02

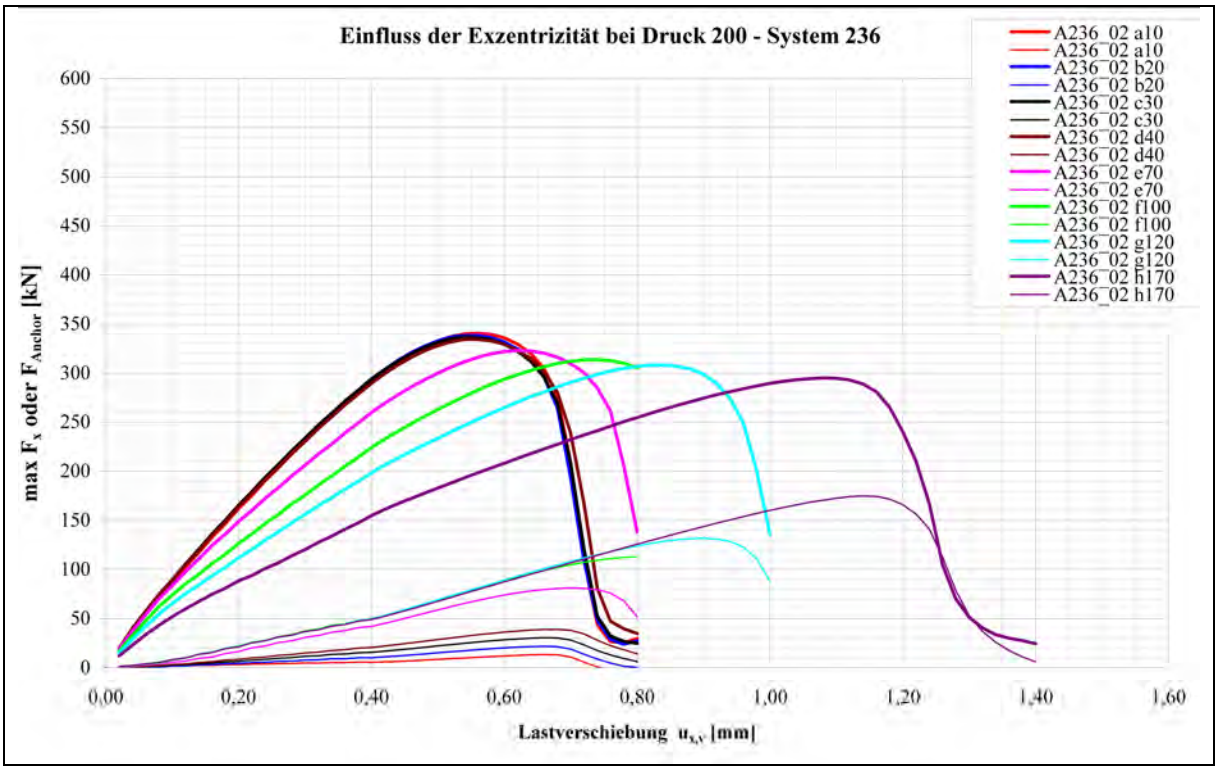


Abbildung 64 A236 Druck 200 kN für Ankersteifigkeit 02

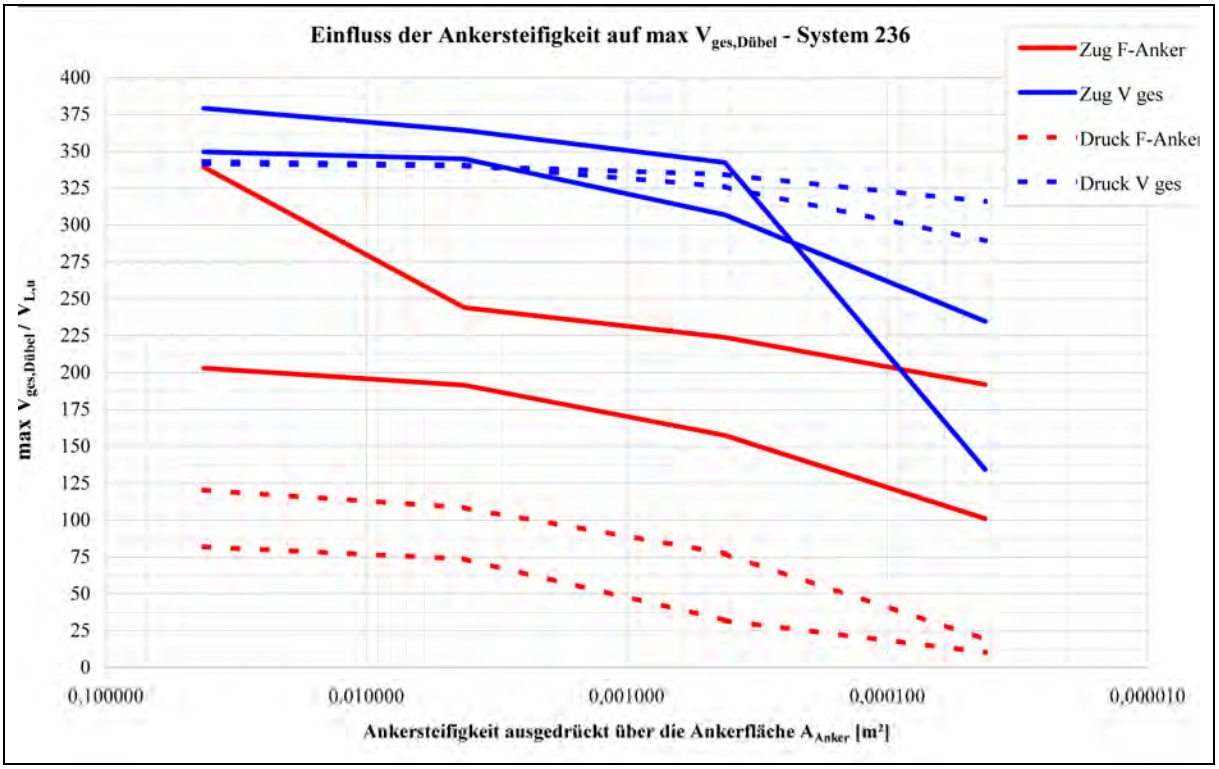


Abbildung 65 A236 Variation der Ankersteifigkeit, bei Exzentrizität 40 mm

A3.5 NACHRECHNUNG DER FEM-VERSUCHE MIT ENDLICH STEIFEM ZUGANKER

Die FEM-Versuche sollen hier nachgerechnet werden. Prinzipiell ist es möglich entsprechende Formel mittels Regression zu ermitteln, dabei geht aber schnell der Bezug zur Realität verloren, bzw. die Formeln gelten nur für bestimmte Konfigurationen. Als besseres Verfahren erscheint es, ein physikalisches Modell für die Nachrechnung zu entwickeln.

Aufbauend auf den Grundwerten für das unverformte Modell soll hier also ein physikalisch begründetes Modell für die Nachrechnung der Einflüsse aus Verformungen dargelegt werden.

Den oben dargestellten Kurven zur horizontalen Systembeanspruchung V_E und zur Ankerkraft F_A kann entnommen werden, das beide Größen von der herrschenden Verformung abhängig sind und diese wiederum selber bestimmen.

Aus der vorhandenen Ankerzugkraft F_A und der herrschenden Beanspruchung V_E in Kombination mit e_V, F und M kann man das theoretische e_{Lug} für R_{Lug} vor dem Dübel bestimmen. Ein einfacher Überschlag des Lastangriffes e_{Lug} liefert aber für etliche Systeme unrealistische Werte, die in der Praxis nicht auftauchen können, da der Dübel ja eine endliche Geometrie besitzt.

Es fehlt somit noch einen Kraft, um ein realistisches Gleichgewicht am verformten System bilden zu können. Hier taucht auch wieder der Gedanke der Querdruckkraft vor dem Dübel auf, der bereits bei der Untersuchung der Versuchsergebnisse angedacht wurde. Vor dem Dübel wird somit eine Querdruckkraft F_L eingeführt, deren verformungsabhänige Wert die Weitere Betrachtung liefern soll. Reduziert man zusätzlich die Grundlast vor dem Dübel R^*_{Lug} auf R_{Lug} und ergänzt sie durch eine rückwärtige Lastübertragung R_{Rear} hinter dem Dübel, so erhält man für das Gleichgewicht ein System nach Abbildung 66.

Im Weiteren soll nun gezeigt werden, wie die so eingeführten Größen in Abhängigkeit der Verformungen am System – siehe Abbildung 67 – dargestellt werden können. Dies ist ein iterativer Prozess, da die Verformungen die Kräfte beeinflussen und die Kräfte wiederum die Verformungen bestimmen.

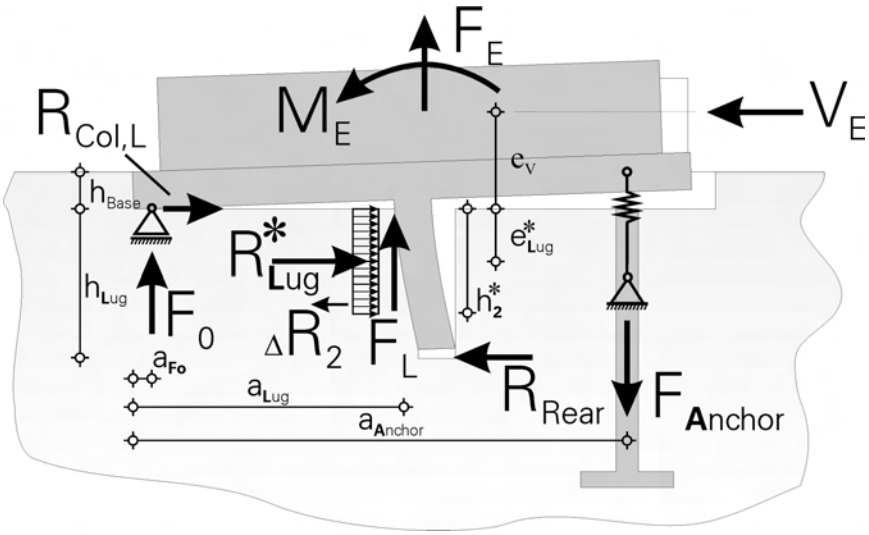


Abbildung 66 Abmessungen und Bezeichnungen am verformten Einbauteil

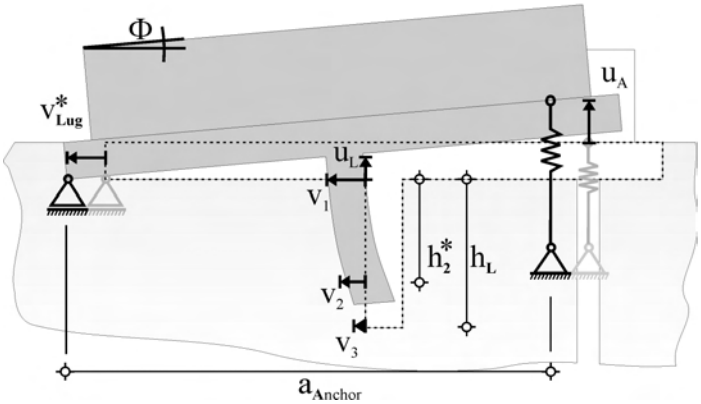


Abbildung 67 Verformungsgrößen am Einbauteil

A3.5.1 ANKERKRAFT, QUERDRUCKKRAFT UND NEUES RLUG

Mit den oben hergeleiten Grundwerten kann erstmals eine Ankerkraft F_A ermittelt werden, und mit der in der FEM errechneten verglichen werden. Die Ankerkraft F_A ist dann Grundlage für die Berechnung eines verformten Systems, nach Abbildung 66. Die Kraftkomponenten F_L und R_R können erst basierend auf den Ankerverformung und den Dübelverformungen ermittelt werden. Sie beeinflussen aber wiederum selber diese Verformung. Für die weiteren Iterationsschritte gilt dann der im Folgenden dargestellte Formelapparat. Für die erste Iteration werden die Grundwerte verwendet, für alle weiteren Iterationen dann die jeweils im Vorgängerschritt korrigierten Werte. Die von der Verformung abhängigen Größen F_L, R_R, ΔR_2 usw. werden im ersten Iterationsschritt zu null gesetzt.

Kräfte:

$$F_A = \frac{\left[V_E \cdot e_v + F_E \cdot a_{F_E} + M_E\right] + \left[R_L \cdot e_L - R_R \cdot h_L + F_L \cdot a_L\right]}{a_{Anker}}$$

$$V_E = R_{Lug} - R_{Rear}$$
$$F_0 = F_F = F_A - F_E - F_L$$

A3.5.2 AUSWERTUNG DER FEM-VERSUCHE

Der Einfluss der Ankersteifigkeit auf die maximal übertragbare Beanspruchung ist in Abbildung 68 dargestellt. Für die Rechnungen mit großer Ankersteifigkeit, hier ausgedrückt über die Ankerquerschnittsfläche A_{Anker}, wird immer die definierte Grundlast $R^*_{L,u}$ erreicht. Die in der FEM-Rechnung ermittelten Lasten werden dann auf diese definierte Last $R^*_{L,u}$ (oder $V_{L,u}$) normiert dargestellt. In der Abbildung 68 ist dann deutlich das Abfallen der maximalen Beanspruchung mit abnehmender Ankersteifigkeit zu erkennen.

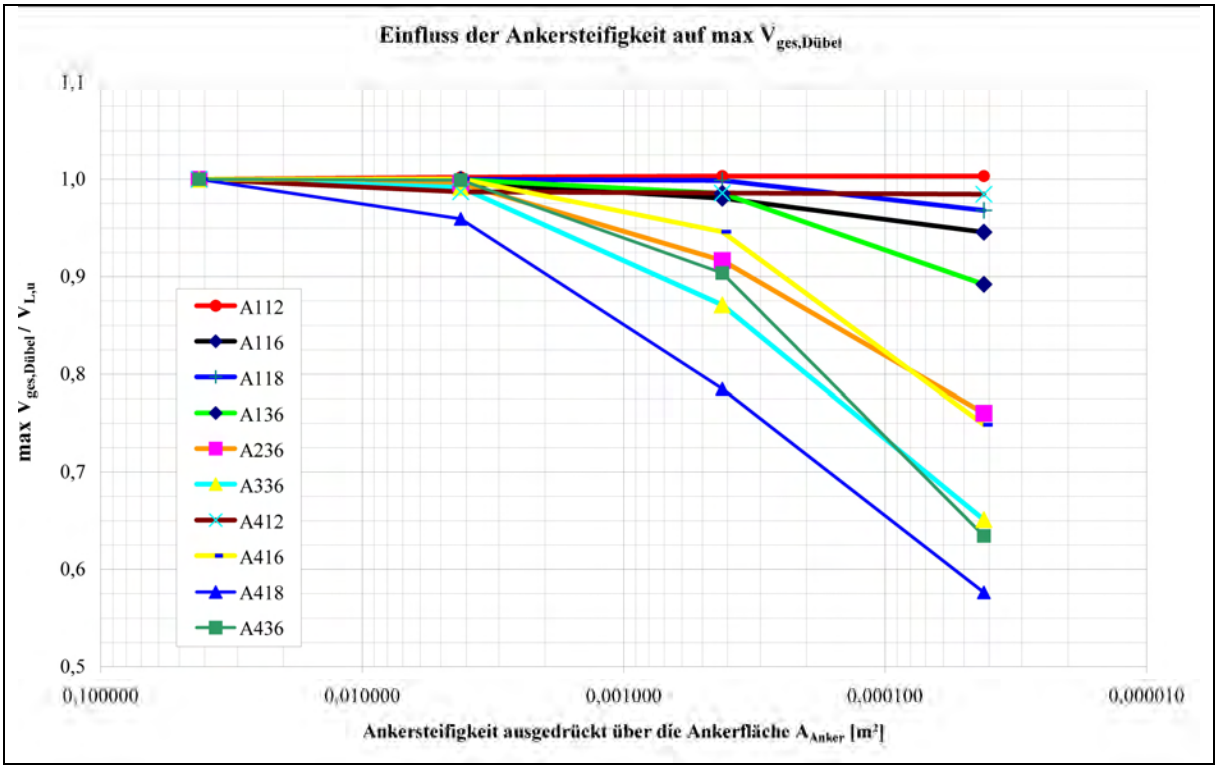


Abbildung 68 Einfluss der Ankersteifigkeit auf max $V_{ges,Dübel}$.

Auswertung F_A

Werte		u_x Last [mm]	max$F_{x\,Last}$ [kN]	F_A Anker [kN]	u_x Dübel [mm]	u_y Dübel [mm]	u_x Anker [mm]	u_y Anker [mm]	u_x Fuss [mm]	u_y Fuss [mm]	BM2 u_x [mm]	BM2 u_y [mm]	$V_{L,u}$ [kN]	$e_{v,cal}$ [mm]	A_{Anker} [m²]	s_{Anker} [N/mm²]	Kontrolle uy	Step	min $s_{Dübel}$ [N/mm²]	max $s_{Dübel}$ [N/mm²]	$M_{Dübel}$ [kNcm]	$e_{v,cal}$ [mm]	$e_{v,cal}$/ ($h_{dübel}$/2) iegend [%]
A_112	_00	0,16000	158,6	73,3	0,13780	0,00832	0,15190	0,00166	0,12010	0,00753	0,13710	0,00450	155,3	120,1	4,20E-02	1,7	768%	8					
	_01	0,16000	158,9	27,6	0,13630	0,01144	0,15120	0,00627	0,11860	0,01063	0,13560	0,00760	155,3	45,2	4,20E-03	6,6	216%	8					
	_02	0,16000	159,1	5,8	0,13590	0,01427	0,15140	0,01321	0,11760	0,01341	0,13520	0,01016	155,3	9,5	4,20E-04	13,9	87%	8					
	_03	0,16000	159,1	0,7	0,13580	0,01505	0,15140	0,01503	0,11730	0,01418	0,13510	0,01087	155,3	1,1	4,20E-05	15,8	74%	8					
A_116	_00	0,40000	282,4	156,6	0,36050	0,02140	0,38490	0,00355	0,02017	0,02548	0,35890	0,00650	283,3	144,1	4,20E-02	3,7	945%	20	-245,80	252,80	332,4	11,8	15% x
	_01	0,40000	281,3	64,6	0,35800	0,02799	0,38370	0,01465	0,01874	0,03127	0,35630	0,01306	283,3	59,7	4,20E-03	15,4	231%	20	-239,70	251,80	327,7	11,6	15% x
	_02	0,40000	276,9	25,6	0,35690	0,04249	0,38620	0,05807	0,01441	0,04393	0,35500	0,02589	283,3	24,0	4,20E-04	61,0	27%	20	-222,70	246,20	312,6	11,3	14% x
	_03	0,40000	267,0	9,6	0,35280	0,12510	0,39350	0,21850	0,00646	0,12670	0,34980	0,10360	283,3	9,4	4,20E-05	229,4	-1%	20	-184,80	206,90	261,1	9,8	12% x
A_118	_00	0,42000	307,4	152,8	0,37660	0,01670	0,40390	0,00346	0,02993	0,01669	0,37560	0,00078	283,3	129,2	4,20E-02	3,6	736%	21	-218,90	249,70	312,4	10,2	7% x
	_01	0,44000	307,4	64,9	0,39380	0,02568	0,42250	0,01472	0,02770	0,02562	0,39270	0,00915	283,3	54,9	4,20E-03	15,5	202%	22	-227,80	259,30	324,7	10,6	7% x
	_02	0,44000	307,0	21,4	0,39240	0,03863	0,42410	0,04853	0,02702	0,03804	0,39120	0,02083	283,3	18,1	4,20E-04	51,0	38%	22	-218,90	251,60	313,7	10,2	7% x
	_03	0,46000	297,6	12,6	0,40520	0,16790	0,45400	0,28520	0,00599	0,16690	0,40300	0,14290	283,3	11,0	4,20E-05	299,5	2%	23	-173,10	207,30	253,6	8,5	6% x
A_136	_00	0,46000	424,2	225,0	0,40160	0,03069	0,43740	0,00510	0,02298	0,03371	0,39920	0,01192	424,5	137,9	4,20E-02	5,4	943%	23	-286,50	303,90	393,6	9,3	12% x
	_01	0,48000	424,1	90,5	0,41750	0,04108	0,45540	0,02052	0,01862	0,04312	0,41500	0,02161	424,5	55,5	4,20E-03	21,5	247%	24	-292,30	318,50	407,2	9,6	12% x
	_02	0,48000	418,0	53,4	0,41480	0,08440	0,46070	0,12110	0,01330	0,08587	0,41170	0,06156	424,5	33,2	4,20E-04	127,2	21%	24	-261,40	291,70	368,7	8,8	11% x
	_03	0,48000	378,5	15,8	0,41220	0,20800	0,47260	0,35800	0,00227	0,20970	0,40770	0,17900	424,5	10,8	4,20E-05	375,9	1%	24	-206,00	234,40	293,6	7,8	10% x
A_236	_00	0,58000	691,5	378,1	0,49090	0,03908	0,54380	0,00857	0,14820	0,01760	0,00000	0,00000	713,9	142,2	4,20E-02	9,0	690%	29	-343,30	374,20	1913,3	27,7	35%
	_01	0,60000	688,7	193,3	0,50530	0,05885	0,56200	0,04384	0,14430	0,03545	0,00000	0,00000	713,9	73,0	4,20E-03	46,0	133%	30	-345,70	379,70	1934,4	28,1	35%
	_02	0,62000	633,9	135,0	0,52830	0,18800	0,59690	0,30610	0,13460	0,15860	0,00000	0,00000	713,9	55,4	4,20E-04	321,4	6%	31	-294,00	345,80	1706,1	26,9	34%
	_03	0,68000	525,7	37,5	0,58920	0,49610	0,68360	0,85010	0,08941	0,45860	0,00000	0,00000	713,9	18,5	4,20E-05	892,6	1%	34	-227,00	261,00	1301,3	24,8	31% x
A_336	_00	0,62000	895,0	467,0	0,50690	0,03391	0,57350	0,01059	0,29340	0,02368	0,50380	0,00020	926,3	135,7	4,20E-02	11,1	455%	31	-250,40	265,40	3094,8	34,6	43%
	_01	0,64000	887,7	241,5	0,52030	0,05659	0,59170	0,05477	0,29060	0,04516	0,51680	0,01792	926,3	70,7	4,20E-03	57,5	79%	32	-250,80	271,50	3133,8	35,3	44%
	_02	0,68000	779,5	181,2	0,56380	0,23490	0,65340	0,41080	0,23700	0,22060	0,55750	0,15680	926,3	60,4	4,20E-04	431,3	-1%	34	-212,40	237,30	2698,2	34,6	43% x
	_03	0,70000	582,7	44,6	0,59050	0,56890	0,70690	1,01100	0,13490	0,55110	0,58090	0,43470	926,3	19,9	4,20E-05	1061,6	-2%	35	-137,80	157,50	1771,8	30,4	38% x
A_412	_00	0,14000	155,2	64,7	0,12200	0,00712	0,13210	0,00147	0,12090	0,00659	0,11960	0,00594	155,3	108,5	4,20E-02	1,5	740%	7	-				
	_01	0,14000	153,2	24,0	0,12110	0,00949	0,13160	0,00545	0,11980	0,00897	0,11860	0,00806	155,3	40,8	4,20E-03	5,7	202%	7	-				
	_02	0,14000	153,0	4,2	0,12070	0,01110	0,13160	0,00958	0,11910	0,01062	0,11820	0,00908	155,3	7,2	4,20E-04	10,1	101%	7	-				
	_03	0,14000	152,8	0,5	0,12060	0,01149	0,13160	0,01078	0,11890	0,01103	0,11820	0,00927	155,3	0,8	4,20E-05	11,3	85%	7	-				
A_416	_00	0,40000	560,3	274,8	0,33430	0,01865	0,37110	0,00623	0,25800	0,01203	0,33030	0,00016	540,4	127,5	4,20E-02	6,5	419%	20	-110,70	114,60	2403,2	42,9	54%
	_01	0,42000	560,5	138,8	0,35000	0,03214	0,38970	0,03147	0,26520	0,02454	0,34560	0,00967	540,4	64,4	4,20E-03	33,0	77%	21	-111,00	117,70	2439,5	43,5	54%
	_02	0,46000	530,0	117,6	0,38850	0,15550	0,44150	0,26670	0,21940	0,14140	0,37990	0,09062	540,4	57,7	4,20E-04	280,0	1%	23	-107,10	113,40	2352,0	44,4	55%
	_03	0,52000	419,3	30,1	0,45230	0,38700	0,52370	0,68300	0,15580	0,36230	0,43760	0,25440	540,4	18,7	4,20E-05	717,2	-2%	26	-84,99	94,12	1910,5	45,6	57% x
A_418	_00	0,56000	763,5	420,2	0,46140	0,02181	0,52030	0,00953	0,14350	0,01211	0,46110	-0,02398	801,4	143,1	4,20E-02	10,0	297%	28	-268,00	231,10	5323,7	69,7	46%
	_01	0,56000	732,4	261,3	0,46040	0,04674	0,52170	0,05925	0,12780	0,03463	0,46000	-0,00585	801,4	92,8	4,20E-03	62,2	37%	28	-252,40	222,70	5067,7	69,2	46%
	_02	0,56000	599,3	147,4	0,46930	0,18930	0,54120	0,33430	0,04878	0,16950	0,46810	0,09529	801,4	64,0	4,20E-04	351,0	-2%	28	-171,70	164,60	3587,2	59,9	40% x
	_03	0,56000	440,1	31,5	0,47690	0,41840	0,56330	0,71340	-0,05422	0,39250	0,47450	0,27450	801,4	18,6	4,20E-05	749,1	2%	28	-93,06	90,20	1954,8	44,4	30% x
A_436	_00	0,58000	937,1	471,9	0,47030	0,03489	0,53140	0,01070	0,34540	0,02406	0,46390	0,00511	926,3	130,9	4,20E-02	11,2	465%	29	-185,00	191,90	4020,3	42,9	54%
	_01	0,60000	936,2	241,8	0,48310	0,05833	0,54920	0,05483	0,34190	0,04583	0,47580	0,02135	926,3	67,2	4,20E-03	57,6	84%	30	-186,50	198,30	4104,5	43,8	55%
	_02	0,66000	846,8	193,0	0,54600	0,25760	0,63080	0,43760	0,27430	0,23510	0,53220	0,15300	926,3	59,3	4,20E-04	459,5	2%	33	-171,00	180,30	3747,2	44,3	55% x
	_03	0,70000	594,4	49,9	0,60060	0,65190	0,71090	1,13200	0,14040	0,61370	0,57700	0,43410	926,3	21,8	4,20E-05	1188,6	0%	35	-110,30	120,20	2458,7	41,4	52% x

Tabelle 26 Zusammenstellung und Auswertung Beanspruchung im Dübel

Tabelle 27 Auswertung zum Einfluss Ankersteifigkeit mit $e_V = h_{Dübel}/2$

Auswertung F_A													Bestimmen des Drehpunktes						Einschätzung der Ankerkraft F_A						
Werte		u_x Last [mm]	max$F_{x\,Last}$ [kN]	F_A Anker [kN]	u_x Dübel [mm]	u_y Dübel [mm]	u_x Anker [mm]	u_y Anker [mm]	u_x Fuss [mm]	u_y Fuss [mm]	BM2 u_x [mm]	BM2 u_y [mm]	a1	c1	a2	c2	X0 [mm]	Y0 [mm]	$h_{Dübel}$ [mm]	$t_{Dübel}$ [mm]	F_A Soll [kN]	ΔF_A [kN]	$F_{Dübel}$ [kN]	ΔF_A / V [-]	$F_{Dübel}$ / V [-]
A_112	_00	0,16000	158,6	73,3	0,13780	0,00832	0,15190	0,00166	0,12010	0,00753	0,13710	0,00450	91,5	-10070	16,6	-20	134	2204	20	20	12,2	61,1	32,9	38,5%	20,7%
	_01	0,16000	158,9	27,6	0,13630	0,01144	0,15120	0,00627	0,11860	0,01063	0,13560	0,00760	24,1	-2663	11,9	-20	217	2560	20	20	12,2	15,4	8,3	9,7%	5,2%
	_02	0,16000	159,1	5,8	0,13590	0,01427	0,15140	0,01321	0,11760	0,01341	0,13520	0,01016	11,5	-1271	9,52	-20	646	6128	20	20	12,2	-6,4	-3,5	-4,0%	-2,2%
	_03	0,16000	159,1	0,7	0,13580	0,01505	0,15140	0,01503	0,11730	0,01418	0,13510	0,01087	10,1	-1118	9,02	-20	1046	9417	20	20	12,2	-11,6	-6,2	-7,3%	-3,9%
A_116	_00	0,40000	282,4	156,6	0,36050	0,02140	0,38490	0,00355	0,02017	0,02548	0,35890	0,00650	108	-11936	16,8	-20	130	2172	80	20	54,3	102,2	55,1	36,2%	19,5%
	_01	0,40000	281,3	64,6	0,35800	0,02799	0,38370	0,01465	0,01874	0,03127	0,35630	0,01306	26,2	-2891	12,8	-20	214	2720	80	20	54,1	10,5	5,7	3,7%	2,0%
	_02	0,40000	276,9	25,6	0,35690	0,04249	0,38620	0,05807	0,01441	0,04393	0,35500	0,02589	6,65	-741,6	8,4	-20	-413	-3485	80	20	53,3	-27,6	-14,9	-10,0%	-5,4%
	_03	0,40000	267,0	9,6	0,35280	0,12510	0,39350	0,21850	0,00646	0,12670	0,34980	0,10360	1,8	-208,1	2,82	-20	-185	-540	80	20	51,3	-41,7	-22,5	-15,6%	-8,4%
A_118	_00	0,42000	307,4	152,8	0,37660	0,01670	0,40390	0,00346	0,02993	0,01669	0,37560	0,00078	117	-12836	22,6	-20	136	3053	150	20	100,5	52,3	28,1	17,0%	9,2%
	_01	0,44000	307,4	64,9	0,39380	0,02568	0,42250	0,01472	0,02770	0,02562	0,39270	0,00915	28,7	-3167	15,3	-20	235	3590	150	20	100,5	-35,6	-19,2	-11,6%	-6,2%
	_02	0,44000	307,0	21,4	0,39240	0,03863	0,42410	0,04853	0,02702	0,03804	0,39120	0,02083	8,74	-971,3	10,2	-20	-670	-6830	150	20	100,4	-79,0	-42,5	-25,7%	-13,8%
	_03	0,46000	297,6	12,6	0,40520	0,16790	0,45400	0,28520	0,00599	0,16690	0,40300	0,14290	1,59	-185,1	2,41	-20	-201	-505	150	20	97,3	-84,7	-45,6	-28,5%	-15,3%
A_136	_00	0,46000	424,2	225,0	0,40160	0,03069	0,43740	0,00510	0,02298	0,03371	0,39920	0,01192	85,7	-9442	13,1	-20	130	1677	80	20	81,6	143,4	77,2	33,8%	18,2%
	_01	0,48000	424,1	90,5	0,41750	0,04108	0,45540	0,02052	0,01862	0,04312	0,41500	0,02161	22,2	-2451	10,2	-20	202	2034	80	20	81,6	8,9	4,8	2,1%	1,1%
	_02	0,48000	418,0	53,4	0,41480	0,08440	0,46070	0,12110	0,01330	0,08587	0,41170	0,06156	3,8	-428,5	4,91	-20	-368	-1828	80	20	80,4	-27,0	-14,5	-6,5%	-3,5%
	_03	0,48000	378,5	15,8	0,41220	0,20800	0,47260	0,35800	0,00227	0,20970	0,40770	0,17900	1,32	-155,2	1,98	-20	-204	-425	80	20	72,8	-57,0	-30,7	-15,1%	-8,1%
A_236	_00	0,58000	691,5	378,1	0,49090	0,03908	0,54380	0,00857	0,14820	0,01760	0,00000	0,00000	63,4	-6987	12,6	-20	137	1700	80	40	133,0	245,1	122,5	35,4%	17,7%
	_01	0,60000	688,7	193,3	0,50530	0,05885	0,56200	0,04384	0,14430	0,03545	0,00000	0,00000	12,8	-1420	8,59	-20	331	2820	80	40	132,4	60,9	30,4	8,8%	4,4%
	_02	0,62000	633,9	135,0	0,52830	0,18800	0,59690	0,30610	0,13460	0,15860	0,00000	0,00000	1,95	-224,5	2,81	-20	-238	-688	80	40	121,9	13,1	6,5	2,1%	1,0%
	_03	0,68000	525,7	37,5	0,58920	0,49610	0,68360	0,85010	0,08941	0,45860	0,00000	0,00000	0,8	-98,46	1,19	-20	-205	-263	80	40	101,1	-63,6	-31,8	-12,1%	-6,0%
A_336	_00	0,62000	895,0	467,0	0,50690	0,03391	0,57350	0,01059	0,29340	0,02368	0,50380	0,00020	54,2	-5967	14,9	-20	152	2247	80	60	172,1	294,9	136,1	33,0%	15,2%
	_01	0,64000	887,7	241,5	0,52030	0,05659	0,59170	0,05477	0,29060	0,04516	0,51680	0,01792	10,8	-1198	9,19	-20	732	6713	80	60	170,7	70,8	32,7	8,0%	3,7%
	_02	0,68000	779,5	181,2	0,56380	0,23490	0,65340	0,41080	0,23700	0,22060	0,55750	0,15680	1,59	-185	2,4	-20	-204	-509	80	60	149,9	31,3	14,4	4,0%	1,9%
	_03	0,70000	582,7	44,6	0,59050	0,56890	0,70690	1,01100	0,13490	0,55110	0,58090	0,43470	0,7	-86,91	1,04	-20	-198	-225	80	60	112,1	-67,5	-31,1	-11,6%	-5,3%
A_412	_00	0,14000	155,2	64,7	0,12200	0,00712	0,13210	0,00147	0,12090	0,00659	0,11960	0,00594	90	-9909	17,1	-20	136	2308	20	80	11,9	52,8	22,3	34,0%	14,4%
	_01	0,14000	153,2	24,0	0,12110	0,00949	0,13160	0,00545	0,11980	0,00897	0,11860	0,00806	24,2	-2668	12,8	-20	232	2945	20	80	11,8	12,2	5,2	8,0%	3,4%
	_02	0,14000	153,0	4,2	0,12070	0,01110	0,13160	0,00958	0,11910	0,01062	0,11820	0,00908	13,7	-1521	10,9	-20	524	5681	20	80	11,8	-7,5	-3,2	-4,9%	-2,1%
	_03	0,14000	152,8	0,5	0,12060	0,01149	0,13160	0,01078	0,11890	0,01103	0,11820	0,00927	12,2	-1353	10,5	-20	779	8153	20	80	11,8	-11,3	-4,8	-7,4%	-3,1%
A_416	_00	0,40000	560,3	274,8	0,33430	0,01865	0,37110	0,00623	0,25800	0,01203	0,33030	0,00016	59,5	-6560	17,9	-20	157	2797	80	80	107,8	167,1	70,7	29,8%	12,6%
	_01	0,42000	560,5	138,8	0,35000	0,03214	0,38970	0,03147	0,26520	0,02454	0,34560	0,00967	12,4	-1372	10,9	-20	905	9840	80	80	107,8	31,0	13,1	5,5%	2,3%
	_02	0,46000	530,0	117,6	0,38850	0,15550	0,44150	0,26670	0,21940	0,14140	0,37990	0,09062	1,66	-192,1	2,5	-20	-204	-530	80	80	101,9	15,7	6,6	3,0%	1,3%
	_03	0,52000	419,3	30,1	0,45230	0,38700	0,52370	0,68300	0,15580	0,36230	0,43760	0,25440	0,77	-94,34	1,17	-20	-185	-236	80	80	80,6	-50,5	-21,4	-12,0%	-5,1%
A_418	_00	0,56000	763,5	420,2	0,46140	0,02181	0,52030	0,00953	0,14350	0,01211	0,46110	-0,02398	54,6	-6017	21,2	-20	179	3772	150	80	249,6	170,6	72,2	22,3%	9,5%
	_01	0,56000	732,4	261,3	0,46040	0,04674	0,52170	0,05925	0,12780	0,03463	0,46000	-0,00585	8,81	-978,6	9,85	-20	-917	-9054	150	80	239,4	21,9	9,2	3,0%	1,3%
	_02	0,56000	599,3	147,4	0,46930	0,18930	0,54120	0,33430	0,04878	0,16950	0,46810	0,09529	1,62	-188,1	2,48	-20	-195	-504	150	80	195,9	-48,5	-20,5	-8,1%	-3,4%
	_03	0,56000	440,1	31,5	0,47690	0,41840	0,56330	0,71340	-0,05422	0,39250	0,47450	0,27450	0,79	-96,86	1,14	-20	-219	-270	150	80	143,9	-112,4	-47,6	-25,5%	-10,8%
A_436	_00	0,58000	937,1	471,9	0,47030	0,03489	0,53140	0,01070	0,34540	0,02406	0,46390	0,00511	49,7	-5473	13,5	-20	151	2011	80	80	180,2	291,7	123,4	31,1%	13,2%
	_01	0,60000	936,2	241,8	0,48310	0,05833	0,54920	0,05483	0,34190	0,04583	0,47580	0,02135	10	-1112	8,28	-20	630	5194	80	80	180,0	61,8	26,1	6,6%	2,8%
	_02	0,66000	846,8	193,0	0,54600	0,25760	0,63080	0,43760	0,27430	0,23510	0,53220	0,15300	1,44	-168,6	2,12	-20	-219	-484	80	80	162,8	30,1	12,7	3,6%	1,5%
	_03	0,70000	594,4	49,9	0,60060	0,65190	0,71090	1,13200	0,14040	0,61370	0,57700	0,43410	0,63	-79,08	0,92	-20	-201	-206	80	80	114,3	-64,4	-27,2	-10,8%	-4,6%

Auswertung F_A

Werte	u_x Last [mm]	max$F_{x\,Last}$ [kN]	F_A Anker [kN]	u_x Dübel [mm]	u_y Dübel [mm]	u_x Anker [mm]	u_y Anker [mm]	u_x Fuss [mm]	u_y Fuss [mm]	BM2 u_x [mm]	BM2 u_y [mm]	Bestimmen des Drehpunktes a1	c1	a2	c2	X0 [mm]	Y0 [mm]	Einschätzung der Ankerkraft F_A $h_{Dübel}$ [mm]	$t_{Dübel}$ [mm]	F_A Soll [kN]	ΔF_A [kN]	$F_{Dübel}$ [kN]	ΔF_A / V [-]	$F_{Dübel}$ / V [-]
A_116 _00	0,40000	282,4	156,6	0,36050	0,02140	0,38490	0,00355	0,02017	0,02548	0,35890	0,00650	108	-11936	16,8	-20	130	2172	80	20	54,3	102,2	55,1	36,2%	19,5%
_01	0,40000	281,3	64,6	0,35800	0,02799	0,38370	0,01465	0,01874	0,03127	0,35630	0,01306	26,2	-2891	12,8	-20	214	2720	80	20	54,1	10,5	5,7	3,7%	2,0%
_02	0,40000	276,9	25,6	0,35690	0,04249	0,38620	0,05807	0,01441	0,04393	0,35500	0,02589	6,65	-741,6	8,4	-20	-413	-3485	80	20	53,3	-27,6	-14,9	-10,0%	-5,4%
_03	0,40000	267,0	9,6	0,35280	0,12510	0,39350	0,21850	0,00646	0,12670	0,34980	0,10360	1,8	-208,1	2,82	-20	-185	-540	80	20	51,3	-41,7	-22,5	-15,6%	-8,4%
A_116 _00	0,40000	282,4	156,6	0,36050	0,02140	0,38490	0,00355	0,02017	0,02548	0,35890	0,00650	108	-11936	16,8	-20	130	2172	80	20	54,3	102,2	55,1	36,2%	19,5%
_01	0,40000	281,3	64,6	0,35800	0,02799	0,38370	0,01465	0,01874	0,03127	0,35630	0,01306	26,2	-2891	12,8	-20	214	2720	80	20	54,1	10,5	5,7	3,7%	2,0%
_02	0,40000	276,9	25,6	0,35690	0,04250	0,38620	0,05808	0,01441	0,04393	0,35500	0,02589	6,65	-741,4	8,4	-20	-413	-3486	80	20	53,3	-27,6	-14,9	-10,0%	-5,4%
_03	0,40000	267,4	9,6	0,35270	0,12490	0,39350	0,21800	0,00664	0,12640	0,34980	0,10340	1,81	-208,6	2,82	-20	-185	-543	80	20	51,4	-41,8	-22,5	-15,6%	-8,4%
A_116 _00	0,40000	282,4	156,6	0,36050	0,02140	0,38490	0,00355	0,02017	0,02548	0,35890	0,00650	108	-11936	16,8	-20	130	2172	80	20	54,3	102,2	55,1	36,2%	19,5%
_01	0,40000	281,3	64,6	0,35800	0,02799	0,38370	0,01465	0,01874	0,03127	0,35630	0,01306	26,2	-2891	12,8	-20	214	2720	80	20	54,1	10,5	5,7	3,7%	2,0%
_02	0,40000	276,9	25,6	0,35690	0,04250	0,38620	0,05808	0,01441	0,04393	0,35500	0,02589	6,65	-741,4	8,4	-20	-413	-3486	80	20	53,3	-27,6	-14,9	-10,0%	-5,4%
_03	0,40000	267,4	9,6	0,35270	0,12490	0,39350	0,21800	0,00664	0,12640	0,34980	0,10340	1,81	-208,6	2,82	-20	-185	-543	80	20	51,4	-41,8	-22,5	-15,6%	-8,4%

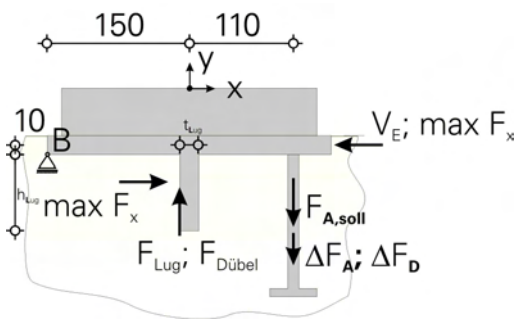
Tabelle 27 Teil 2

Betrachtet man die Werte der Berechnung in Tabelle 26 und Tabelle 27 so kann folgendes festgestellt werden: (Quelle: Datei ...\Ankersteifigkeit_3.xls)

- Die Verschiebungen u_x – in Lastrichtung – am Dübel werden durch die Ankersteifigkeit nicht beeinflusst. Die Auftretenden Unterschiede können allein mit der unterschiedlich hohen Beanspruchung begründet werden.
- Dito kann für die Verschiebung u_x am Anker festgestellt werden.
- Die Verschiebungen u_y hingegen zeigen eine enge Korrelation mit der Ankersteifigkeit. Allerdings steigen diese Werte lediglich um eine Zehnerpotenz, wohingegen die Ankerfläche um 3 Zehnerpotenzen variiert wird.
- Versucht man sich aus diesen Verschiebungen am Dübel und am Anker einen Drehpunkt des Systems zu ermittelt, so ergibt sich hierbei kein einheitliches Bild. Die Lage der so ermittelten Drehpunkte ist im Mittelteil der Tabelle „Bestimmung des Drehpunktes“ angegeben, und lässt keinerlei einheitliche Tendenzen erkennen.
- Vergleicht man die gemessene Zugankerkraft $F_{A,Anker}$ mit der aus dem Versatzmoment infolge e_V auftretenden Zugankerkraft $F_{A,Soll}$, so fällt $F_{A,Anker}$ für die steifen Zuganker deutlich größer aus als $F_{A,Soll}$ erwarten läst. Für die weichen Zuganker stimmen die Kräfte hingegen überein. Dieser Sachverhalt soll im Weiteren näher beleuchtet werden.

A3.5.3 ANKERKRAFT IM ZUGANKER

Für die Kraft im Zuganker nach Tabelle 27 wird ein vereinfachtes Modell ansetzen.



Es gilt:

$$F_{A,soll} = F_{A,\max F_x} = \max F_x \frac{10 + h_{Lug}/2}{150 + 110}$$

$$\Delta F_D = F_{A,F_{Dübel}} = F_{Dübel} \cdot \frac{150 - t_{Lug}/2}{150 + 110}$$

Aus der äußeren Beanspruchung *max* F_x (oder V_E) erhält man eine Beanspruchung im Anker $F_{A,Soll}$. Infolge der Kraft *max* F_A ist $F_{A,Soll}$ abhängig von der Lastabtragung vor dem Dübel – siehe e_V – und dem vorderen Auflagerpunkt der Grundplatte. Unterstellt man den ungünstigsten Fall, so ist die Last vor dem Dübel auf halber Dübelhöhe anzusetzen, und der vordere Auflagerpunkt B kommt an der Vorderkante der Grundplatte zu liegen. Der Anteil der Ankerkraft infolge äußerer Beanspruchung kann ebenso in das Modell integriert werden.

Die Zugankerlast $F_{A,Soll}$ bestimmt sich einfach über die vorliegende Geometrie. Vergleicht man diese Kraft $F_{A,Soll}$ mit der gemessenen Zugankerkraft *max* F_A so beliebt eine Differenzankerkraft ΔF_A, die im Modell lediglich auf eine Vertikalkraft $F_{Dübel}$ vor dem Dübel zurückgeführt werden kann. Vereinfacht wird diese direkt in der

Kontaktfläche Dübel/Beton angenommen, womit diese sicher etwas zu gering aber in der Wirkung richtig abgeschätzt wird.

Betrachtet man die Werte für $F_{Dübel}$ nach Tabelle 27 so beträgt diese für die steifen Anker (Zeile _00) jeweils ca. 0,2. Dieser Wert erinnert an die Querdehnzahl für Beton.

Es kann also gefolgert werden: Infolge einer behinderten Querdehnung, vor dem Dübel wird eine Vertikalkraft hervorgerufen. Der Grad der Querdehnungsbehinderung ist wiederum abhängig von der Zugankersteifigkeit. So sinkt die effektive Querdehnzahl für die weicheren Anker (Zeile _01) auf 5% ab, für die noch weicheren Anker (Zeile 02 und 03) verliert sich dieser Effekt. Da der Beton hier keiner Querdehnungsbehinderung mehr ausgesetzt ist, infolge der großen Verschiebung u_y in der Grundplatte.

Berechnet man F_{Anker} mit $e_{v,cal}$ statt mit $h_{Dübel}/2$, so ergeben sich ähnliche Werte, nur dass jetzt $F_{Dübel}$ etwas größer ausfällt. Diese Werte können der Tabelle 28 entnommen werden.

Als brauchbares Maß für die Zugankersteifigkeit kann alleine der Effekt der Zugankersteifigkeit – die Verformung – herangezogen werden. Da dieser Effekt aber im Bereich der Lastabtragung vor dem Dübel benötigt wird, wird im Weiteren versucht die Anhebung der Grundplatte infolge Zugankehrsteifigkeit und Beanspruchung mit der erwarteten Verschiebung u_x zu vergleichen, siehe „@Ankersteifigkeit_4.xls“.

Tabelle 28 Auswertung zum Einfluss Ankersteifigkeit mit $e_{v,cal}$ (Ankersteifigkeit_4).

Auswertung F_A mit $e_{v,Dübel}$ Werte											Bestimmen $e_{v,Dübel}$									Abweichung	Einschätzung der Ankerkraft F_A				
		u_x Last	$maxF_{x,Last}$	F_A Anker	u_x Dübel	u_y Dübel	u_x Anker	u_y Anker	BM2 u_x	BM2 u_y	$h_{Dübel}$	$t_{Dübel}$	f_c	$h_{Dübel,max}$	$e^*_{v,Dübel}$	a	α	β	$e_{v,Dübel}$	$e_{v,Dübel}$ zu $e_{v,cal}$	$F_{A,Soll}$ aus $e_{v,Dübel}$	ΔF_A F_A-$F_{A,Soll}$	$F_{Dübel}$	ΔF_A / V	$F_{Dübel}$ / V
		[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[N/mm²]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[mm]	[%]	[kN]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
A_112	_00	0,16000	158,6	73,3	0,13780	0,00832	0,15190	0,00166	0,13710	0,00450	20	20	28	40,0	6,4	1,0	0,001	0,500	5,0	-50%	9,15	64,1	34,5	40,4%	21,8%
	_01	0,16000	158,9	27,6	0,13630	0,01144	0,15120	0,00627	0,13560	0,00760	20	20	28	40,0	6,4	1,0	0,001	0,500	5,0	-50%	9,17	18,5	9,9	11,6%	6,3%
	_02	0,16000	159,1	5,8	0,13590	0,01427	0,15140	0,01321	0,13520	0,01016	20	20	28	40,0	6,4	1,0	0,001	0,500	5,0	-50%	9,18	-3,4	-1,8	-2,1%	-1,1%
	_03	0,16000	159,1	0,7	0,13580	0,01505	0,15140	0,01503	0,13510	0,01087	20	20	28	40,0	6,4	1,0	0,001	0,500	5,0	-50%	9,18	-8,5	-4,6	-5,4%	-2,9%
A_116	_00	0,40000	282,4	156,6	0,36050	0,02140	0,38490	0,00355	0,35890	0,00650	80	20	28	40,0	11,3	4,0	1,000	0,000	11,3	-4%	23,17	133,4	71,8	47,2%	25,4%
	_01	0,40000	281,3	64,6	0,35800	0,02799	0,38370	0,01465	0,35630	0,01306	80	20	28	40,0	11,3	4,0	1,000	0,000	11,3	-3%	23,08	41,5	22,4	14,8%	7,9%
	_02	0,40000	276,9	25,6	0,35690	0,04249	0,38620	0,05807	0,35500	0,02589	80	20	28	40,0	11,3	4,0	1,000	0,000	11,3	0%	22,72	2,9	1,6	1,0%	0,6%
	_03	0,40000	267,0	9,6	0,35280	0,12510	0,39350	0,21850	0,34980	0,10360	80	20	28	40,0	11,3	4,0	1,000	0,000	11,3	16%	21,91	-12,3	-6,6	-4,6%	-2,5%
A_118	_00	0,42000	307,4	152,8	0,37660	0,01670	0,40390	0,00346	0,37560	0,00078	150	20	28	40,0	11,7	7,5	1,000	0,000	11,7	15%	25,64	127,1	68,5	41,4%	22,3%
	_01	0,44000	307,4	64,9	0,39380	0,02568	0,42250	0,01472	0,39270	0,00915	150	20	28	40,0	11,7	7,5	1,000	0,000	11,7	11%	25,64	39,3	21,2	12,8%	6,9%
	_02	0,44000	307,0	21,4	0,39240	0,03863	0,42410	0,04853	0,39120	0,02083	150	20	28	40,0	11,7	7,5	1,000	0,000	11,7	14%	25,60	-4,2	-2,3	-1,4%	-0,7%
	_03	0,46000	297,6	12,6	0,40520	0,16790	0,45400	0,28520	0,40300	0,14290	150	20	28	40,0	11,7	7,5	1,000	0,000	11,7	37%	24,82	-12,2	-6,6	-4,1%	-2,2%
A_136	_00	0,46000	424,2	225,0	0,40160	0,03069	0,43740	0,00510	0,39920	0,01192	80	20	48	34,4	9,8	4,7	1,000	0,000	9,8	5%	32,23	192,7	103,8	45,4%	24,5%
	_01	0,48000	424,1	90,5	0,41750	0,04108	0,45540	0,02052	0,41500	0,02161	80	20	48	34,4	9,8	4,7	1,000	0,000	9,8	2%	32,22	58,3	31,4	13,7%	7,4%
	_02	0,48000	418,0	53,4	0,41480	0,08440	0,46070	0,12110	0,41170	0,06156	80	20	48	34,4	9,8	4,7	1,000	0,000	9,8	11%	31,76	21,6	11,7	5,2%	2,8%
	_03	0,48000	378,5	15,8	0,41220	0,20800	0,47260	0,35800	0,40770	0,17900	80	20	48	34,4	9,8	4,7	1,000	0,000	9,8	26%	28,76	-13,0	-7,0	-3,4%	-1,8%
A_236	_00	0,58000	691,5	378,1	0,49090	0,03908	0,54380	0,00857	0,00000	0,00000	80	40	48	60,7	24,8	2,6	1,000	0,000	24,8	-10%	92,65	285,4	142,7	41,3%	20,6%
	_01	0,60000	688,7	193,3	0,50530	0,05885	0,56200	0,04384	0,00000	0,00000	80	40	48	60,7	24,8	2,6	1,000	0,000	24,8	-12%	92,27	101,1	50,5	14,7%	7,3%
	_02	0,62000	633,9	135,0	0,52830	0,18800	0,59690	0,30610	0,00000	0,00000	80	40	48	60,7	24,8	2,6	1,000	0,000	24,8	-8%	84,93	50,1	25,0	7,9%	3,9%
	_03	0,68000	525,7	37,5	0,58920	0,49610	0,68360	0,85010	0,00000	0,00000	80	40	48	60,7	24,8	2,6	1,000	0,000	24,8	0%	70,43	-32,9	-16,5	-6,3%	-3,1%
A_336	_00	0,62000	895,0	467,0	0,50690	0,03391	0,57350	0,01059	0,50380	0,00020	80	60	48	83,8	40,8	1,9	0,910	0,065	39,7	15%	171,10	295,9	136,6	33,1%	15,3%
	_01	0,64000	887,7	241,5	0,52030	0,05659	0,59170	0,05477	0,51680	0,01792	80	60	48	83,8	40,8	1,9	0,910	0,065	39,7	12%	169,71	71,8	33,2	8,1%	3,7%
	_02	0,68000	779,5	181,2	0,56380	0,23490	0,65340	0,41080	0,55750	0,15680	80	60	48	83,8	40,8	1,9	0,910	0,065	39,7	15%	149,02	32,1	14,8	4,1%	1,9%
	_03	0,70000	582,7	44,6	0,59050	0,56890	0,70690	1,01100	0,58090	0,43470	80	60	48	83,8	40,8	1,9	0,910	0,065	39,7	31%	111,40	-66,8	-30,8	-11,5%	-5,3%
A_412	_00	0,14000	155,2	64,7	0,12200	0,00712	0,13210	0,00147	0,11960	0,00594	20	80	28	120,7	41,0	0,3	0,000	0,663	6,6	-34%	9,92	54,8	23,2	35,3%	14,9%
	_01	0,14000	153,2	24,0	0,12110	0,00949	0,13160	0,00545	0,11860	0,00806	20	80	28	120,7	41,0	0,3	0,000	0,663	6,6	-34%	9,80	14,2	6,0	9,3%	3,9%
	_02	0,14000	153,0	4,2	0,12070	0,01110	0,13160	0,00958	0,11820	0,00908	20	80	28	120,7	41,0	0,3	0,000	0,663	6,6	-34%	9,78	-5,6	-2,4	-3,6%	-1,5%
	_03	0,14000	152,8	0,5	0,12060	0,01149	0,13160	0,01078	0,11820	0,00927	20	80	28	120,7	41,0	0,3	0,000	0,663	6,6	-34%	9,77	-9,3	-3,9	-6,1%	-2,6%
A_416	_00	0,40000	560,3	274,8	0,33430	0,01865	0,37110	0,00623	0,33030	0,00016	80	80	28	120,7	65,7	1,3	0,325	0,447	39,3	-8%	106,18	168,7	71,4	30,1%	12,7%
	_01	0,42000	560,5	138,8	0,35000	0,03214	0,38970	0,03147	0,34560	0,00967	80	80	28	120,7	65,7	1,3	0,325	0,447	39,3	-10%	106,21	32,6	13,8	5,8%	2,5%
	_02	0,46000	530,0	117,6	0,38850	0,15550	0,44150	0,26670	0,37990	0,09062	80	80	28	120,7	65,7	1,3	0,325	0,447	39,3	-12%	100,43	17,2	7,3	3,2%	1,4%
	_03	0,52000	419,3	30,1	0,45230	0,38700	0,52370	0,68300	0,43760	0,25440	80	80	28	120,7	65,7	1,3	0,325	0,447	39,3	-14%	79,46	-49,3	-20,9	-11,8%	-5,0%
A_418	_00	0,56000	763,5	420,2	0,46140	0,02181	0,52030	0,00953	0,46110	-0,02398	150	80	28	120,7	71,3	2,5	1,000	0,000	71,3	2%	238,77	181,4	76,8	23,8%	10,1%
	_01	0,56000	732,4	261,3	0,46040	0,04674	0,52170	0,05925	0,46000	-0,00585	150	80	28	120,7	71,3	2,5	1,000	0,000	71,3	3%	229,04	32,3	13,6	4,4%	1,9%
	_02	0,56000	599,3	147,4	0,46930	0,18930	0,54120	0,33430	0,46810	0,09529	150	80	28	120,7	71,3	2,5	1,000	0,000	71,3	19%	187,42	-40,0	-16,9	-6,7%	-2,8%
	_03	0,56000	440,1	31,5	0,47690	0,41840	0,56330	0,71340	0,47450	0,27450	150	80	28	120,7	71,3	2,5	1,000	0,000	71,3	61%	137,63	-106,2	-44,9	-24,1%	-10,2%
A_436	_00	0,58000	937,1	471,9	0,47030	0,03489	0,53140	0,01070	0,46390	0,00511	80	80	48	105,0	57,2	1,5	0,524	0,363	44,5	4%	196,31	275,6	116,6	29,4%	12,4%
	_01	0,60000	936,2	241,8	0,48310	0,05833	0,54920	0,05483	0,47580	0,02135	80	80	48	105,0	57,2	1,5	0,524	0,363	44,5	1%	196,12	45,7	19,3	4,9%	2,1%
	_02	0,66000	846,8	193,0	0,54600	0,25760	0,63080	0,43760	0,53220	0,15300	80	80	48	105,0	57,2	1,5	0,524	0,363	44,5	0%	177,39	15,6	6,6	1,8%	0,8%
	_03	0,70000	594,4	49,9	0,60060	0,65190	0,71090	1,13200	0,57700	0,43410	80	80	48	105,0	57,2	1,5	0,524	0,363	44,5	7%	124,52	-74,6	-31,6	-12,5%	-5,3%
A_116	_00	0,40000	282,4	156,6	0,36050	0,02140	0,38490	0,00355	0,35890	0,00650	80	20	28	40,0	11,3	4,0	1,000	0,000	11,3	-72%	23,17	133,4	71,8	47,2%	25,4%
	_01	0,40000	281,3	64,6	0,35800	0,02799	0,38370	0,01465	0,35630	0,01306	80	20	28	40,0	11,3	4,0	1,000	0,000	11,3	-72%	23,08	41,5	22,4	14,8%	7,9%
	_02	0,40000	276,9	25,6	0,35690	0,04249	0,38620	0,05807	0,35500	0,02589	80	20	28	40,0	11,3	4,0	1,000	0,000	11,3	-72%	22,72	2,9	1,6	1,0%	0,6%
	_03	0,40000	267,0	9,6	0,35280	0,12510	0,39350	0,21850	0,34980	0,10360	80	20	28	40,0	11,3	4,0	1,000	0,000	11,3	-72%	21,91	-12,3	-6,6	-4,6%	-2,5%
A_116	_00	0,40000	282,4	156,6	0,36050	0,02140	0,38490	0,00355	0,35890	0,00650	80	20	28	40,0	11,3	4,0	1,000	0,000	11,3	-72%	23,17	133,4	71,8	47,2%	25,4%
	_01	0,40000	281,3	64,6	0,35800	0,02799	0,38370	0,01465	0,35630	0,01306	80	20	28	40,0	11,3	4,0	1,000	0,000	11,3	-72%	23,08	41,5	22,4	14,8%	7,9%
	_02	0,40000	276,9	25,6	0,35690	0,04250	0,38620	0,05808	0,35500	0,02589	80	20	28	40,0	11,3	4,0	1,000	0,000	11,3	-72%	22,72	2,9	1,6	1,0%	0,6%
	_03	0,40000	267,4	9,6	0,35270	0,12490	0,39350	0,21800	0,34980	0,10340	80	20	28	40,0	11,3	4,0	1,000	0,000	11,3	-72%	21,94	-12,3	-6,6	-4,6%	-2,5%
A_116	_00	0,40000	282,4	156,6	0,36050	0,02140	0,38490	0,00355	0,35890	0,00650	80	20	28	40,0	11,3	4,0	1,000	0,000	11,3	-72%	23,17	133,4	71,8	47,2%	25,4%
	_01	0,40000	281,3	64,6	0,35800	0,02799	0,38370	0,01465	0,35630	0,01306	80	20	28	40,0	11,3	4,0	1,000	0,000	11,3	-72%	23,08	41,5	22,4	14,8%	7,9%
	_02	0,40000	276,9	25,6	0,35690	0,04250	0,38620	0,05808	0,35500	0,02589	80	20	28	40,0	11,3	4,0	1,000	0,000	11,3	-72%	22,72	2,9	1,6	1,0%	0,6%
	_03	0,40000	267,4	9,6	0,35270	0,12490	0,39350	0,21800	0,34980	0,10340	80	20	28	40,0	11,3	4,0	1,000	0,000	11,3	-72%	21,94	-12,3	-6,6	-4,6%	-2,5%

A3.5.4 GLEICHGEWICHTSKOMPONENTE $F_{DÜBEL}$

Zu $F_{Dübel}$ bzw. F_{Lug} siehe auch die Herleitung in Kapitel 6.6.1.

A3.5.5 QUERDRUCKKRAFT F VOR DEM DÜBEL

Die Querdruckkraft vor dem Dübel $F_{Dübel}$ ist abhängig von der Dehnungsbehinderung des Betonvolumens vor dem Dübel. Somit kann sie aus der Verformung im Einbauteil ermittelt werden. Da diese Verformung in Z-Richtung aber wiederum von der Querdruckkraft abhängig ist, muss dieser Prozess iterativ durchlaufen werden.

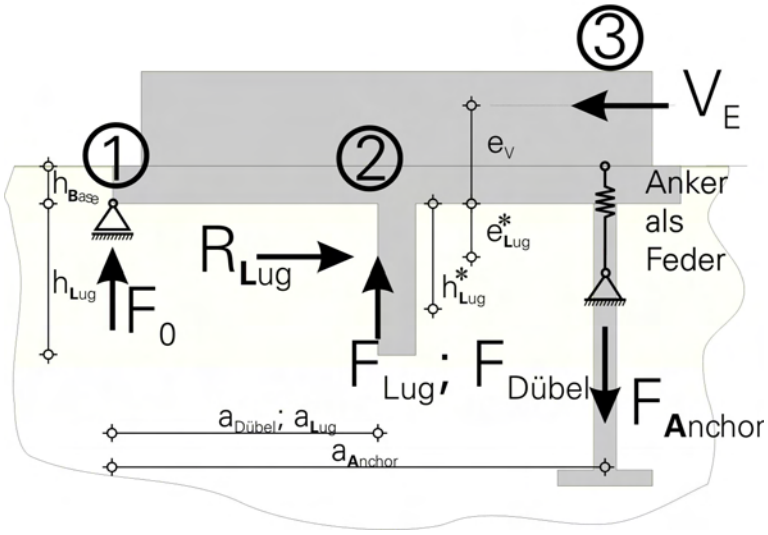


Abbildung 69 Ermittlung von F_A

Ausgehend von $F_{Dübel}$ = 0 kann die Ankerzugkraft F_A nach Abbildung 69 ermittelt werden. Diese Ankerkraft wird in eine Verformung bzw. Anhebung der Grundplatte in Z-Richtung vor dem Dübel umgerechnet und damit die Querdruckkraft vor dem Dübel $F_{Dübel}$ bestimmt. Mit dieser Querdruckkraft kann eine verbesserte Ankerkraft ermittelt werden und so weiter.

Es gilt:

$$F_A = \frac{R_{Lug} \cdot \left(e_v + e_{Lug}\right) + F_{Lug} \cdot a_{Lug}}{a_{Anker}} \qquad \alpha = \frac{u_{z,Lug}}{u^*_{\varepsilon,z}} \quad \text{mit} \quad 0 \le \alpha \le 1$$

$$u_{z,Lug} = \frac{F_A / D \cdot a_{Lug}}{a_{Anker}} \qquad F_{Lug} = R_{Lug} \cdot (1-\alpha)\frac{\mu}{1-\mu}$$

mit:

$$e_D = e_{Lug} = h^*_{Lug} / 2$$

$$h^*_{Lug} = h_{Lug,\max}$$

Federkonstante $D = \dfrac{E_{Anker} \cdot A_{Anker}}{L_{Anker}}$

$$u^*_{\varepsilon,z} = \frac{\sigma_x}{E_{Beton}} \cdot \mu \cdot (1+\mu) \cdot h^*_{Lug}$$

$$\sigma_x = \frac{R_{Lug}}{b_{Lug} \cdot h^*_{Lug}}$$ (Druckspannung ist positiv einzusetzen)

Die so ermittelte Ankerkraft F_A korrespondiert recht gut mit der Ankerkraft $F_{A,soll}$, die in der FEM-Rechnung ermittelt wurde.

Auswertung F_A mit $e_{v,Dübel}=h_{D,ma}$:				Werte		Ankersteifigkeit							Iteration FA, Schritt 1						
Werte								$h_{Dübel,max}$					nue=	0,2					
		$maxF_{x\,Last}$ [kN]	u_y Dübel [mm]	$h_{Dübel}$ [mm]	$t_{Dübel}$ [mm]	L/EA [mm/kN]	f_c [N/mm²]	h_D^* [mm]	$V_{L,u}$ [N]	F_{A0} [N]	$u_{z2,FA0}$ [mm]	$u_{L,xu}$ [mm]	u_{cz}^* [mm]	α [-]	$F_{Dübel,1}$ [N]	F_{A1} [N]	$u_{z2,FA0}$ [mm]	F_A [kN]	$F_{A,soll}$ [kN]
A_112	_00	158,6	0,00832	20	20	0,0000227	28	40,0	155306	17910	0,0002	0,1380	0,0059	0,04	37396	87359	0,0011	79	73
	_01	158,9	0,01144	20	20	0,0002268	28	40,0	155306	17910	0,0022	0,1380	0,0059	0,37	24533	63471	0,0078	36	28
	_02	159,1	0,01427	20	20	0,0022676	28	40,0	155306	17910	0,0219	0,1380	0,0059	1,00	0	17910	0,0219	18	6
	_03	159,1	0,01505	20	20	0,0226757	28	40,0	155306	17910	0,2187	0,1380	0,0059	1,00	0	17910	0,2187	18	1
A_116	_00	282,4	0,02140	80	20	0,0000227	28	40,0	283344	32675	0,0004	0,3618	0,0108	0,04	68226	159381	0,0019	144	157
	_01	281,3	0,02799	80	20	0,0002268	28	40,0	283344	32675	0,0040	0,3618	0,0108	0,37	44759	115798	0,0141	66	65
	_02	276,9	0,04249	80	20	0,0022676	28	40,0	283344	32675	0,0399	0,3618	0,0108	1,00	0	32675	0,0399	33	26
	_03	267,0	0,12510	80	20	0,0226757	28	40,0	283344	32675	0,3990	0,3618	0,0108	1,00	0	32675	0,3990	33	10
A_118	_00	307,4	0,01670	150	20	0,0000227	28	40,0	283344	32675	0,0004	0,3618	0,0108	0,04	68226	159381	0,0019	144	153
	_01	307,4	0,02568	150	20	0,0002268	28	40,0	283344	32675	0,0040	0,3618	0,0108	0,37	44759	115798	0,0141	66	65
	_02	307,0	0,03863	150	20	0,0022676	28	40,0	283344	32675	0,0399	0,3618	0,0108	1,00	0	32675	0,0399	33	21
	_03	297,6	0,16790	150	20	0,0226757	28	40,0	283344	32675	0,3990	0,3618	0,0108	1,00	0	32675	0,3990	33	13
A_136	_00	424,2	0,03069	80	20	0,0000227	48	34,4	424499	44408	0,0005	0,4230	0,0140	0,04	102015	233864	0,0029	207	225
	_01	424,1	0,04108	80	20	0,0002268	48	34,4	424499	44408	0,0054	0,4230	0,0140	0,39	65060	165234	0,0202	88	90
	_02	418,0	0,08440	80	20	0,0022676	48	34,4	424499	44408	0,0542	0,4230	0,0140	1,00	0	44408	0,0542	44	53
	_03	378,5	0,20800	80	20	0,0226757	48	34,4	424499	44408	0,5422	0,4230	0,0140	1,00	0	44408	0,5422	44	16
A_236	_00	691,5	0,03908	80	40	0,0000227	48	60,7	713919	110815	0,0013	0,4893	0,0236	0,05	168956	448727	0,0051	401	378
	_01	688,7	0,05885	80	40	0,0002268	48	60,7	713919	110815	0,0126	0,4893	0,0236	0,53	83327	277469	0,0315	171	193
	_02	633,9	0,18800	80	40	0,0022676	48	60,7	713919	110815	0,1256	0,4893	0,0236	1,00	0	110815	0,1256	111	135
	_03	525,7	0,49610	80	40	0,0226757	48	60,7	713919	110815	1,2564	0,4893	0,0236	1,00	0	110815	1,2564	111	37
A_336	_00	895,0	0,03391	80	60	0,0000227	48	83,8	926335	184884	0,0019	0,5057	0,0306	0,06	216917	654870	0,0069	588	467
	_01	887,7	0,05659	80	60	0,0002268	48	83,8	926335	184884	0,0194	0,5057	0,0306	0,63	85042	369141	0,0386	252	242
	_02	779,5	0,23490	80	60	0,0022676	48	83,8	926335	184884	0,1935	0,5057	0,0306	1,00	0	184884	0,1935	185	181
	_03	582,7	0,56890	80	60	0,0226757	48	83,8	926335	184884	1,9349	0,5057	0,0306	1,00	0	184884	1,9349	185	45
A_412	_00	155,2	0,00712	20	80	0,0000227	28	120,7	155306	42028	0,0004	0,1156	0,0059	0,07	36189	127565	0,0012	117	65
	_01	153,2	0,00949	20	80	0,0002268	28	120,7	155306	42028	0,0040	0,1156	0,0059	0,68	12472	71508	0,0069	54	24
	_02	153,0	0,01110	20	80	0,0022676	28	120,7	155306	42028	0,0403	0,1156	0,0059	1,00	0	42028	0,0403	42	4
	_03	152,8	0,01149	20	80	0,0226757	28	120,7	155306	42028	0,4032	0,1156	0,0059	1,00	0	42028	0,4032	42	0
A_416	_00	560,3	0,01865	80	80	0,0000227	28	120,7	540362	146231	0,0014	0,3021	0,0207	0,07	125913	443843	0,0043	407	275
	_01	560,5	0,03214	80	80	0,0002268	28	120,7	540362	146231	0,0140	0,3021	0,0207	0,68	43394	248799	0,0239	187	139
	_02	530,0	0,15550	80	80	0,0022676	28	120,7	540362	146231	0,1403	0,3021	0,0207	1,00	0	146231	0,1403	146	118
	_03	419,3	0,38700	80	80	0,0226757	28	120,7	540362	146231	1,4029	0,3021	0,0207	1,00	0	146231	1,4029	146	30
A_418	_00	763,5	0,02181	150	80	0,0000227	28	120,7	801418	216877	0,0021	0,4841	0,0307	0,07	186743	658270	0,0063	603	420
	_01	732,4	0,04674	150	80	0,0002268	28	120,7	801418	216877	0,0208	0,4841	0,0307	0,68	64359	368998	0,0354	278	261
	_02	599,3	0,18930	150	80	0,0022676	28	120,7	801418	216877	0,2081	0,4841	0,0307	1,00	0	216877	0,2081	217	147
	_03	440,1	0,41840	150	80	0,0226757	28	120,7	801418	216877	2,0806	0,4841	0,0307	1,00	0	216877	2,0806	217	31
A_436	_00	937,1	0,03489	80	80	0,0000227	48	105,0	926335	222628	0,0021	0,4327	0,0306	0,07	215394	731741	0,0070	659	472
	_01	936,2	0,05833	80	80	0,0002268	48	105,0	926335	222628	0,0214	0,4327	0,0306	0,70	69830	387682	0,0372	282	242
	_02	846,8	0,25760	80	80	0,0022676	48	105,0	926335	222628	0,2136	0,4327	0,0306	1,00	0	222628	0,2136	223	193
	_03	594,4	0,65190	80	80	0,0226757	48	105,0	926335	222628	2,1358	0,4327	0,0306	1,00	0	222628	2,1358	223	50
A_116	_00	282,4	0,02140	80	20	0,0000227	28	40,0	283344	32675	0,0004	0,3618	0,0108	0,04	68226	159381	0,0019	144	157
	_01	281,3	0,02799	80	20	0,0002268	28	40,0	283344	32675	0,0040	0,3618	0,0108	0,37	44759	115798	0,0141	66	65
	_02	276,9	0,04249	80	20	0,0022676	28	40,0	283344	32675	0,0399	0,3618	0,0108	1,00	0	32675	0,0399	33	26
	_03	267,0	0,12510	80	20	0,0226757	28	40,0	283344	32675	0,3990	0,3618	0,0108	1,00	0	32675	0,3990	33	10
A_116_	_00	282,4	0,02140	80	20	0,0000227	28	40,0	283344	32675	0,0004	0,3618	0,0108	0,04	68226	159381	0,0019	144	157
	_01	281,3	0,02799	80	20	0,0002268	28	40,0	283344	32675	0,0040	0,3618	0,0108	0,37	44759	115798	0,0141	66	65
	_02	276,9	0,04250	80	20	0,0022676	28	40,0	283344	32675	0,0399	0,3618	0,0108	1,00	0	32675	0,0399	33	26
	_03	267,4	0,12490	80	20	0,0226757	28	40,0	283344	32675	0,3990	0,3618	0,0108	1,00	0	32675	0,3990	33	10
A_116_	_00	282,4	0,02140	80	20	0,0000227	28	40,0	283344	32675	0,0004	0,3618	0,0108	0,04	68226	159381	0,0019	144	157
	_01	281,3	0,02799	80	20	0,0002268	28	40,0	283344	32675	0,0040	0,3618	0,0108	0,37	44759	115798	0,0141	66	65
	_02	276,9	0,04250	80	20	0,0022676	28	40,0	283344	32675	0,0399	0,3618	0,0108	1,00	0	32675	0,0399	33	26
	_03	267,4	0,12490	80	20	0,0226757	28	40,0	283344	32675	0,3990	0,3618	0,0108	1,00	0	32675	0,3990	33	10

Quelle: „@Ankersteifigkeit_6.xls – Ermittlung FA“

Tabelle 29 Querdruckkraft F vor dem Dübel

A3.5.6 LASTÜBERTRAGUNG VOR DEM DÜBEL – R_{LUG}

Wenden wir uns jetzt wieder der Lastübertragung R_{Lug} vor dem Dübel zu. Im Weiteren wird auch häufig die Bezeichnung $V_{Dübel}$ verwendet.

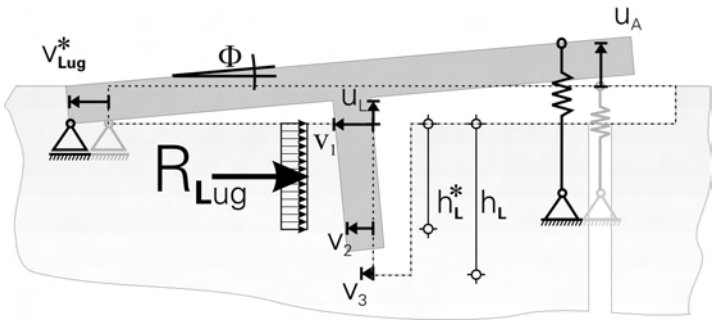


Abbildung 70 Schiefstellung des Dübels infolge Ankerdehnung

Infolge der Dehnung im Zuganker wird das Einbauteil um den Punkt „0“ gedreht (Siehe Stelle 1 in Abbildung 69). Die Beanspruchung V hingegen bewirkt eine Verschiebung v des ganzen Einbauteils in Lastrichtung. Wirkt sich diese Verdrehung für Verschiebungen der Punkte an der Unterseite der Grundplatte nur gering aus, so ist der Einfluss der Verdrehung für die Verschiebung der unteren Dübelbereiche signifikant.

Für die weitere Untersuchung wird jeweils nur die maximal wirksame Dübeleinbindetiefe $h_{D,max}$ bzw. h_D^* angesetzt. Ausgehend von der Grundverschiebung $u_{L,u}$ erhält man am Dübel die Verschiebungen v_1 und v_2 bzw. v_3.

Es gilt:

$$v_1 = v_{Lug}^*$$

$$v_2 = v_1 - \Delta v$$

$$\Delta v = u_{Anker} \cdot \frac{h_{Lug}^*}{a_{Anker}}$$

$$\tan \Phi = \frac{u_{Anker}}{a_{Anker}}$$

$$v_2 = v_1 - h_{Lug}^* \cdot \tan \Phi$$

Der Verschiebungsverlaufes (Durchbiegungszustand) vor dem Dübel dient dazu einen neuen Scherpunkt der Lastübertragung $e_{v,cal}$ und eine reduzierte Schubkraftübertragung zu berechnen.

$$e_{v,cal} = \alpha_2 \cdot h_D^*$$

$$R_{Dübel} = \alpha_3 \cdot R_{Lug}^*$$

mit den Grundwerten h_{Lug}^* und R_{Lug}^*

Zur Ermittlung dieser Werte ist eine geeignete Kraft-Verformungsbeziehung anzusetzen. Eine Spannungs-Dehnungsbeziehung kann hier nicht explizit unterstellt werden, da zwar die Verschiebung $u_{L,u}$ bekannt ist, die entsprechende Basis zur Ermittlung der zugehörenden Dehnung ε jedoch unbekannt ist, somit wird ε durch das Integral, also die Verschiebung, v ersetzt.

In Anlehnung an die bekannten Spannungs-Dehnungsbeziehungen werden 2 Beziehung σ_{Beton}/v, nach Abbildung 71 untersucht. Einmal wird stark vereinfachend eine lineare Beziehung σ_{Beton}/v, wie in Abbildung 71 – Linie 1 – dargestellt unterstellt. Zum Zweiten wird eine bilineare Beziehung – Linie 2 – untersucht. Für letztere wird der Knickpunkt variabel eingeführt ($\beta\, v_1$).

Zu unterscheiden sind weiterhin die Fälle

- $v_2 > 0$
- $v_2 < 0$

Für $v_2 < 0$ ist die effektive Einbindetiefe zu reduzieren, da ähnlich der klaffenden Fundamentfuge in diesem Bereich keine Kräfte zwischen Beton und Dübel übertragen werden können. Der Dübel liegt hier an seiner Rückseite am Beton an. Die hier übertragenen Kräfte werden vorerst nicht berücksichtigt.

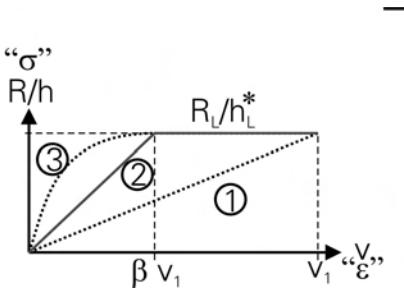


Abbildung 71 Kraft - Weg Beziehungen

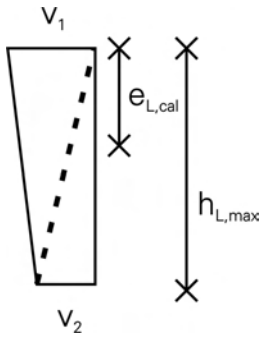


Abbildung 72 Scherpunkt für $R_{Dübel}$ bzw. R_{Lug}

Fall: lineare Beziehung – Linie 1, es gilt:

Am Dübel:

$$e_{L,cal} = \alpha_2 \cdot h^*_{Lug}$$

$$R_{Lug} = \alpha_3 \cdot R^*_{Lug}$$

für $v_2 \geq 0$

$$\alpha_2 = \frac{v_1 + 2 \cdot v_2}{3 \cdot (v_A + v_2)}$$

$$\alpha_3 = \frac{(v_1 + v_2)}{2 \cdot v_1}$$

für $v_2 < 0$

$$x = \frac{v_1}{(v_1 - v_2)} \cdot h^*_{Lug}$$

$$\alpha_2 = \frac{v_1}{3 \cdot (v_1 - v_2)}; \quad \alpha_3 = \frac{v_1}{2 \cdot (v_1 - v_2)}$$

Auswertung F_A mit $e_{v,cal}$, berücks							Iteration FA, Schritt 1									Wertung					
linear							nue=	0,2													
Werte																					
		maxF x Last [kN]	F_A Anker [kN]	F_{A0} [N]	$u_{z2,FA0}$ [mm]	$u_{L,xu}$ [mm]	u_{sz}^* [mm]	α_1 [-]	$u_{B,1}$ [mm]	α_2 [-]	α_3 [-]	$F_{Dübel,1}$ [N]	F_{A1} [N]	$u_{z2,FA0}$ [mm]	$F_{A,0}$ [kN]	F_A [kN]	$F_{A,soll}$ [kN] soll	$V_{L,u}$ [kN]	$V_{Dübel}$ [kN]	maxF x Last [kN] soll
A_112	_00	158,6	73,3	17910	0,0002	0,1380	0,0059	0,04	0,1380	0,50	1,00	37396	87354	0,0011	18	78	73	155,3	155,2	158,6
	_01	158,9	27,6	17910	0,0022	0,1380	0,0059	0,37	0,1374	0,50	1,00	24533	63422	0,0077	18	63	28	155,3	155,0	158,9
	_02	159,1	5,8	17910	0,0219	0,1380	0,0059	1,00	0,1318	0,50	0,98	0	17415	0,0213	18	17	6	155,3	151,9	159,1
	_03	159,1	0,7	17910	0,2187	0,1380	0,0059	1,00	0,0756	0,45	0,77	0	12960	0,1582	18	14	1	155,3	127,7	159,1
A_116	_00	282,4	156,6	32675	0,0004	0,3618	0,0108	0,04	0,3617	0,50	1,00	68226	159374	0,0019	33	143	157	283,3	283,1	282,4
	_01	281,3	64,6	32675	0,0040	0,3618	0,0108	0,37	0,3607	0,50	1,00	44759	115735	0,0141	33	116	65	283,3	282,9	281,3
	_02	276,9	25,6	32675	0,0399	0,3618	0,0108	1,00	0,3504	0,50	0,98	0	32047	0,0391	33	32	26	283,3	279,0	276,9
	_03	267,0	9,6	32675	0,3990	0,3618	0,0108	1,00	0,2479	0,47	0,84	0	26390	0,3222	33	27	10	283,3	245,9	267,0
A_118	_00	307,4	152,8	32675	0,0004	0,3618	0,0108	0,04	0,3617	0,50	1,00	68226	159374	0,0019	33	143	153	283,3	283,1	307,4
	_01	307,4	64,9	32675	0,0040	0,3618	0,0108	0,37	0,3607	0,50	1,00	44759	115735	0,0141	33	116	65	283,3	282,9	307,4
	_02	307,0	21,4	32675	0,0399	0,3618	0,0108	1,00	0,3504	0,50	0,98	0	32047	0,0391	33	32	21	283,3	279,0	307,0
	_03	297,6	12,6	32675	0,3990	0,3618	0,0108	1,00	0,2479	0,47	0,84	0	26390	0,3222	33	27	13	283,3	245,9	297,6
A_136	_00	424,2	225,0	44408	0,0005	0,4230	0,0140	0,04	0,4229	0,50	1,00	102015	233855	0,0029	44	206	225	424,5	424,2	424,2
	_01	424,1	90,5	44408	0,0054	0,4230	0,0140	0,39	0,4217	0,50	1,00	65060	165149	0,0202	44	165	90	424,5	423,8	424,1
	_02	418,0	53,4	44408	0,0542	0,4230	0,0140	1,00	0,4097	0,50	0,98	0	43561	0,0532	44	44	53	424,5	417,9	418,0
	_03	378,5	15,8	44408	0,5422	0,4230	0,0140	1,00	0,2898	0,47	0,84	0	35941	0,4388	44	37	16	424,5	368,3	378,5
A_236	_00	691,5	378,1	110815	0,0013	0,4893	0,0236	0,05	0,4887	0,50	1,00	168956	448644	0,0051	111	399	378	713,9	712,4	691,5
	_01	688,7	193,3	110815	0,0126	0,4893	0,0236	0,53	0,4834	0,50	0,99	83327	276638	0,0314	111	277	193	713,9	709,7	688,7
	_02	633,9	135,0	110815	0,1256	0,4893	0,0236	1,00	0,4306	0,49	0,94	0	102504	0,1162	111	103	135	713,9	674,1	633,9
	_03	525,7	37,5	110815	1,2564	0,4893	0,0236	1,00	-0,0975	0,28	0,42	0	30768	0,3488	111	53	37	713,9	416,2	525,7
A_336	_00	895,0	467,0	184884	0,0019	0,5057	0,0306	0,06	0,5043	0,50	1,00	216917	654556	0,0069	185	585	467	926,3	922,4	895,0
	_01	887,7	241,5	184884	0,0194	0,5057	0,0306	0,63	0,4922	0,50	0,99	85042	366006	0,0383	185	368	242	926,3	914,4	887,7
	_02	779,5	181,2	184884	0,1935	0,5057	0,0306	1,00	0,3706	0,47	0,87	0	153540	0,1607	185	158	181	926,3	820,5	779,5
	_03	582,7	44,6	184884	1,9349	0,5057	0,0306	1,00	-0,8453	0,12	0,19	0	13638	0,1427	185	18	45	926,3	204,8	582,7
A_412	_00	155,2	64,7	42028	0,0004	0,1156	0,0059	0,07	0,1152	0,50	1,00	36189	127462	0,0012	42	116	65	155,3	154,5	155,2
	_01	153,2	24,0	42028	0,0040	0,1156	0,0059	0,68	0,1112	0,50	0,98	12472	70473	0,0068	42	71	24	155,3	152,5	153,2
	_02	153,0	4,2	42028	0,0403	0,1156	0,0059	1,00	0,0714	0,46	0,81	0	31686	0,0304	42	34	4	155,3	131,4	153,0
	_03	152,8	0,5	42028	0,4032	0,1156	0,0059	1,00	-0,3269	0,09	0,13	0	1601	0,0154	42	2	0	155,3	22,8	152,8
A_416	_00	560,3	274,8	146231	0,0014	0,3021	0,0207	0,07	0,3006	0,50	1,00	125913	443363	0,0043	146	404	275	540,4	536,6	560,3
	_01	560,5	138,8	146231	0,0140	0,3021	0,0207	0,68	0,2867	0,50	0,97	43394	244007	0,0234	146	247	139	540,4	527,4	560,5
	_02	530,0	117,6	146231	0,1403	0,3021	0,0207	1,00	0,1481	0,44	0,75	0	98314	0,0943	146	110	118	540,4	436,3	530,0
	_03	419,3	30,1	146231	1,4029	0,3021	0,0207	1,00	-1,2375	0,07	0,10	0	3649	0,0350	146	4	30	540,4	58,4	419,3
A_418	_00	763,5	420,2	216877	0,0021	0,4841	0,0307	0,07	0,4818	0,50	1,00	186743	657611	0,0063	217	599	420	801,4	796,2	763,5
	_01	732,4	261,3	216877	0,0208	0,4841	0,0307	0,68	0,4612	0,50	0,98	64359	362419	0,0348	217	367	261	801,4	783,5	732,4
	_02	599,3	147,4	216877	0,2081	0,4841	0,0307	1,00	0,2557	0,45	0,76	0	151097	0,1450	217	166	147	801,4	656,0	599,3
	_03	440,1	31,5	216877	2,0806	0,4841	0,0307	1,00	-1,7993	0,07	0,11	0	6054	0,0581	217	7	31	801,4	94,0	440,1
A_436	_00	937,1	471,9	222628	0,0021	0,4327	0,0306	0,07	0,4307	0,50	1,00	215394	731069	0,0070	223	655	472	926,3	919,9	937,1
	_01	936,2	241,8	222628	0,0214	0,4327	0,0306	0,70	0,4123	0,50	0,98	69830	380970	0,0366	223	386	242	926,3	905,7	936,2
	_02	846,8	193,0	222628	0,2136	0,4327	0,0306	1,00	0,2289	0,45	0,76	0	155518	0,1492	223	171	193	926,3	758,3	846,8
	_03	594,4	49,9	222628	2,1358	0,4327	0,0306	1,00	-1,6054	0,07	0,11	0	6592	0,0632	223	8	50	926,3	109,5	594,4
A_116	_00	282,4	156,6	32675	0,0004	0,3618	0,0108	0,04	0,3617	0,50	1,00	68226	159374	0,0019	33	143	157	283,3	283,1	282,4
	_01	281,3	64,6	32675	0,0040	0,3618	0,0108	0,37	0,3607	0,50	1,00	44759	115735	0,0141	33	116	65	283,3	282,9	281,3
	_02	276,9	25,6	32675	0,0399	0,3618	0,0108	1,00	0,3504	0,50	0,98	0	32047	0,0391	33	32	26	283,3	279,0	276,9
	_03	267,0	9,6	32675	0,3990	0,3618	0,0108	1,00	0,2479	0,47	0,84	0	26390	0,3222	33	27	10	283,3	245,9	267,0
A_116_	_00	282,4	156,6	32675	0,0004	0,3618	0,0108	0,04	0,3617	0,50	1,00	68226	159374	0,0019	33	143	157	283,3	283,1	282,4
	_01	281,3	64,6	32675	0,0040	0,3618	0,0108	0,37	0,3607	0,50	1,00	44759	115735	0,0141	33	116	65	283,3	282,9	281,3
	_02	276,9	25,6	32675	0,0399	0,3618	0,0108	1,00	0,3504	0,50	0,98	0	32047	0,0391	33	32	26	283,3	279,0	276,9
	_03	267,4	9,6	32675	0,3990	0,3618	0,0108	1,00	0,2479	0,47	0,84	0	26390	0,3222	33	27	10	283,3	245,9	267,4
A_116_	_00	282,4	156,6	32675	0,0004	0,3618	0,0108	0,04	0,3617	0,50	1,00	68226	159374	0,0019	33	143	157	283,3	283,1	282,4
	_01	281,3	64,6	32675	0,0040	0,3618	0,0108	0,37	0,3607	0,50	1,00	44759	115735	0,0141	33	116	65	283,3	282,9	281,3
	_02	276,9	25,6	32675	0,0399	0,3618	0,0108	1,00	0,3504	0,50	0,98	0	32047	0,0391	33	32	26	283,3	279,0	276,9
	_03	267,4	9,6	32675	0,3990	0,3618	0,0108	1,00	0,2479	0,47	0,84	0	26390	0,3222	33	27	10	283,3	245,9	267,4

Quelle: „@Ankersteifigkeit_6.xls – Ermittlung FA u VD"

Tabelle 30 Nachrechnung mit $F_{Dübel}$ und $V_{Dübel}$, e_V mit Ansatz „linear"

Fall: bilineare Beziehung – Linie 2

Für Verschiebungen $v > \beta \cdot v_1$ wird der volle Grundwertanteil (bezogen auf die Länge x_1) der Schubkraft vor dem Dübel übertragen. Zu untersuchen sind somit die zwei Bereiche x_1 und x_2 vor dem Dübel, wie in Abbildung 73 und Abbildung 74 dargestellt wird.

Es gilt:

$$e_{L,cal} = \alpha_2 \cdot h^*_{Lug}$$

$$R_{Lug} = \alpha_3 \cdot R^*_{Lug}$$

und für $v_2 \geq 0$

$$x_1 = \frac{v_1 \cdot (1-\beta)}{(v_1 - v_2)} \cdot h^*_L$$

$$x_2 = h^*_L - x_1$$

$$\alpha_2 = \frac{h_L^{*2} - \left[\left(1 - \frac{v_2}{\beta \cdot v_1}\right) \cdot x_2 \cdot \left(h^*_{Lug} - \frac{2}{3} x_2\right)\right]}{\left[2 \cdot h_L^{*2} - \left(1 - \frac{v_2}{\beta \cdot v_1}\right) \cdot x_2 \cdot h^*_L\right]}$$

$$\alpha_3 = 1 - \left(1 - \frac{v_2}{\beta \cdot v_1}\right) \cdot \frac{x_2}{2 \cdot h^*_L}$$

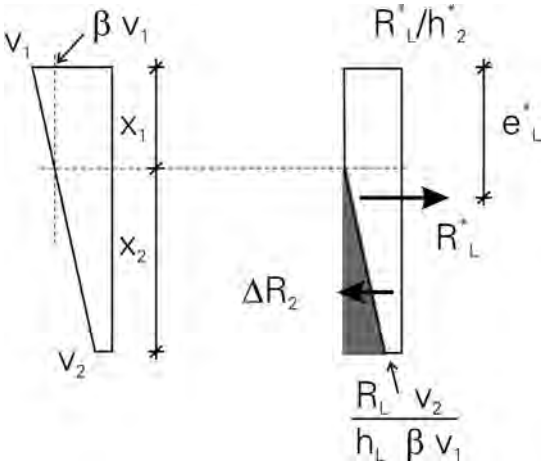


Abbildung 73 Definition am Dübel – Teil 1

und für $v_2 < 0$

$$x = \frac{v_1}{(v_1 - v_2)} \cdot h^*_{Lug}$$

$$x_1 = (1-\beta) \cdot x = \frac{v_1 \cdot (1-\beta)}{(v_1 - v_2)} \cdot h^*_{Lug}$$

$$x_2 = \beta \cdot x = \frac{v_1 \cdot \beta}{(v_1 - v_2)} \cdot h^*_{Lug}$$

$$\alpha_2 = \frac{x_1^2 + x_1 \cdot x_2 + \frac{1}{3} \cdot x_2^2}{h^*_{Lug} \cdot (2 \cdot x_1 + x_2)}$$

$$\alpha_3 = \frac{x_1 + \frac{1}{2} \cdot x_2}{h^*_{Lug}}$$

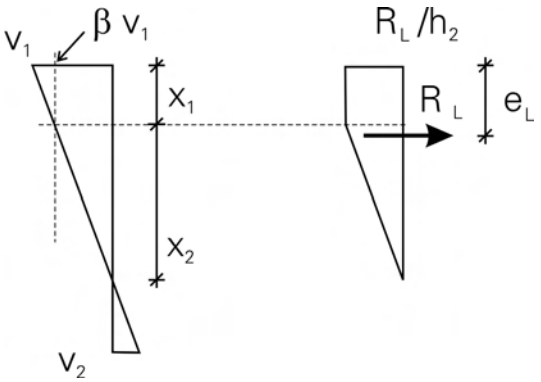


Abbildung 74 Definition am Dübel – Teil 2

Auswertung F_A mit $e_{v,cal}$, berücksichtigt wird $F_{Dübel}$ Iteration FA, Schritt 1 Wertung

nue= 0,2

β= 0,5

Werte		$maxF_{x\,Last}$ [kN]	F_A Anker [kN]	$u_{z2;FA0}$ [mm]	u_{cz}^* [mm]	α_1 [-]	α_2 [-]	α_3 [-]	$u_{z2;FA0}$ [mm]	$F_{A,0}$ [kN]	F_A [kN]	$F_{A,soll}$ [kN]	$V_{L,u}$ [kN]	$V_{Dübel}$ [kN]	$maxF_{x\,Las}$ [kN]
A_112	_00	158,6	73,3	0,0002	0,0059	0,04	0,5000	1,0000	0,0011	18	78	73	155,3	155,3	158,6
	_01	158,9	27,6	0,0022	0,0059	0,37	0,5000	1,0000	0,0078	18	63	28	155,3	155,3	158,9
	_02	159,1	5,8	0,0219	0,0059	1,00	0,5000	1,0000	0,0219	18	18	6	155,3	155,3	159,1
	_03	159,1	0,7	0,2187	0,0059	1,00	0,5000	1,0000	0,2187	18	18	1	155,3	155,3	159,1
A_116	_00	282,4	156,6	0,0004	0,0108	0,04	0,5000	1,0000	0,0019	33	143	157	283,3	283,3	282,4
	_01	281,3	64,6	0,0040	0,0108	0,37	0,5000	1,0000	0,0141	33	116	65	283,3	283,3	281,3
	_02	276,9	25,6	0,0399	0,0108	1,00	0,5000	1,0000	0,0399	33	33	26	283,3	283,3	276,9
	_03	267,0	9,6	0,3990	0,0108	1,00	0,5000	1,0000	0,3990	33	33	10	283,3	283,3	267,0
A_118	_00	307,4	152,8	0,0004	0,0108	0,04	0,5000	1,0000	0,0019	33	143	153	283,3	283,3	307,4
	_00a	306,9	131,5	0,0008	0,0108	0,07	0,5000	1,0000	0,0038	33	127	132	283,3	283,3	306,9
	_01	307,4	64,9	0,0040	0,0108	0,37	0,5000	1,0000	0,0141	33	116	65	283,3	283,3	307,4
	_01a	307,0	53,8	0,0080	0,0108	0,74	0,5000	1,0000	0,0165	33	67	54	283,3	283,3	307,0
	_02	307,0	21,4	0,0399	0,0108	1,00	0,5000	1,0000	0,0399	33	33	21	283,3	283,3	307,0
	_02a	304,5	40,0	0,0798	0,0108	1,00	0,5000	1,0000	0,0798	33	33	40	283,3	283,3	304,5
	_03	297,6	12,6	0,3990	0,0108	1,00	0,5000	1,0000	0,3990	33	33	13	283,3	283,3	297,6
A_136	_00	424,2	225,0	0,0005	0,0140	0,04	0,5000	1,0000	0,0029	44	206	225	424,5	424,5	424,2
	_01	424,1	90,5	0,0054	0,0140	0,39	0,5000	1,0000	0,0202	44	165	90	424,5	424,5	424,1
	_02	418,0	53,4	0,0542	0,0140	1,00	0,5000	1,0000	0,0542	44	44	53	424,5	424,5	418,0
	_03	378,5	15,8	0,5422	0,0140	1,00	0,5000	1,0000	0,5422	44	44	16	424,5	424,5	378,5
A_236	_00	691,5	378,1	0,0013	0,0236	0,05	0,5000	1,0000	0,0051	111	399	378	713,9	713,9	691,5
	_01	688,7	193,3	0,0126	0,0236	0,53	0,5000	1,0000	0,0315	111	277	193	713,9	713,9	688,7
	_02	633,9	135,0	0,1256	0,0236	1,00	0,5000	1,0000	0,1256	111	111	135	713,9	713,9	633,9
	_03	525,7	37,5	1,2564	0,0236	1,00	0,4542	0,7085	0,8288	111	75	37	713,9	521,1	525,7
A_336	_00	895,0	467,0	0,0019	0,0306	0,06	0,5000	1,0000	0,0069	185	586	467	926,3	926,3	895,0
	_01	887,7	241,5	0,0194	0,0306	0,63	0,5000	1,0000	0,0386	185	369	242	926,3	926,3	887,7
	_02	779,5	181,2	0,1935	0,0306	1,00	0,5000	1,0000	0,1935	185	185	181	926,3	926,3	779,5
	_03	582,7	44,6	1,9349	0,0306	1,00	0,5287	0,5936	1,2017	185	117	45	926,3	600,6	582,7
A_412	_00	155,2	64,7	0,0004	0,0059	0,07	0,5000	1,0000	0,0012	42	117	65	155,3	155,3	155,2
	_01	153,2	24,0	0,0040	0,0059	0,68	0,5000	1,0000	0,0069	42	72	24	155,3	155,3	153,2
	_02	153,0	4,2	0,0403	0,0059	1,00	0,5000	1,0000	0,0403	42	42	4	155,3	155,3	153,0
	_03	152,8	0,5	0,4032	0,0059	1,00	0,5612	0,5653	0,2519	42	26	0	155,3	93,9	152,8
A_416	_00	560,3	274,8	0,0014	0,0207	0,07	0,5000	1,0000	0,0043	146	405	275	540,4	540,4	560,3
	_01	560,5	138,8	0,0140	0,0207	0,68	0,5000	1,0000	0,0239	146	249	139	540,4	540,4	560,5
	_02	530,0	117,6	0,1403	0,0207	1,00	0,5045	0,9998	0,1413	146	148	118	540,4	540,1	530,0
	_03	419,3	30,1	1,4029	0,0207	1,00	0,5832	0,5491	0,8802	146	91	30	540,4	312,7	419,3
A_418	_00	763,5	420,2	0,0021	0,0307	0,07	0,5000	1,0000	0,0063	217	601	420	801,4	801,4	763,5
	_00a	759,9	420,2	0,0042	0,0307	0,14	0,5000	1,0000	0,0120	217	533	420	801,4	801,4	759,9
	_01	732,4	261,3	0,0208	0,0307	0,68	0,5000	1,0000	0,0354	217	369	261	801,4	801,4	732,4
	_01a	713,6	261,3	0,0416	0,0307	1,00	0,5000	1,0000	0,0416	217	217	261	801,4	801,4	713,6
	_02	599,3	147,4	0,2081	0,0307	1,00	0,5000	1,0000	0,2081	217	217	147	801,4	801,4	599,3
	_02a	534,7	147,4	0,4161	0,0307	1,00	0,5048	0,7916	0,3321	217	187	147	801,4	676,2	534,7
	_03	440,1	31,5	2,0806	0,0307	1,00	0,5776	0,5530	1,3038	217	135	31	801,4	468,9	440,1
A_436	_00	937,1	471,9	0,0021	0,0306	0,07	0,5000	1,0000	0,0070	223	657	472	926,3	926,3	937,1
	_01	936,2	241,8	0,0214	0,0306	0,70	0,5000	1,0000	0,0372	223	388	242	926,3	926,3	936,2
	_02	846,8	193,0	0,2136	0,0306	1,00	0,5000	1,0000	0,2136	223	223	193	926,3	926,3	846,8
	_03	594,4	49,9	2,1358	0,0306	1,00	0,5775	0,5531	1,3350	223	139	50	926,3	542,2	594,4
A_116	_00	282,4	156,6	0,0004	0,0108	0,04	0,5000	1,0000	0,0019	33	143	157	283,3	283,3	282,4
	_01	281,3	64,6	0,0040	0,0108	0,37	0,5000	1,0000	0,0141	33	116	65	283,3	283,3	281,3
	_02	276,9	25,6	0,0399	0,0108	1,00	0,5000	1,0000	0,0399	33	33	26	283,3	283,3	276,9
	_03	267,0	9,6	0,3990	0,0108	1,00	0,5000	1,0000	0,3990	33	33	10	283,3	283,3	267,0
A_116_	_00	282,4	156,6	0,0004	0,0108	0,04	0,5000	1,0000	0,0019	33	143	157	283,3	283,3	282,4
	_01	281,3	64,6	0,0040	0,0108	0,37	0,5000	1,0000	0,0141	33	116	65	283,3	283,3	281,3
	_02	276,9	25,6	0,0399	0,0108	1,00	0,5000	1,0000	0,0399	33	33	26	283,3	283,3	276,9
	_03	267,4	9,6	0,3990	0,0108	1,00	0,5000	1,0000	0,3990	33	33	10	283,3	283,3	267,4
A_116_	_00	282,4	156,6	0,0004	0,0108	0,04	0,5000	1,0000	0,0019	33	143	157	283,3	283,3	282,4
	_01	281,3	64,6	0,0040	0,0108	0,37	0,5000	1,0000	0,0141	33	116	65	283,3	283,3	281,3
	_02	276,9	25,6	0,0399	0,0108	1,00	0,5000	1,0000	0,0399	33	33	26	283,3	283,3	276,9
	_03	267,4	9,6	0,3990	0,0108	1,00	0,5000	1,0000	0,3990	33	33	10	283,3	283,3	267,4

Quelle: „@Ankersteifigkeit_6.xls – Ermittlung FA u VD2“

Tabelle 31 Nachrechnung mit $F_{Dübel}$ und $R_{Dübel}$, e_v mit Ansatz „bilinear“

Als Entscheidungskriterium gilt die Qualität der Nachrechnung von V nach Tabelle 31 Betrachtet man die Differenz V_{rech} zu V_{FEM} und definiert positiv – $V_{rech} < V_{FEM}$ – so gilt:

- im Mittel: -0,76 %
- positive im Mittel 7,23 % negative im Mittel -4,65 %
- maximal negativ -25,20 % i Steifigkeit _02 (schon recht weich)

A3.5.7 ERWEITERUNG DER DÜBELVERFORMUNG

Die Verformung im Dübel setzt sich aus insgesamt drei Anteilen zusammen.

- Durchbiegung aus Biegung im Dübel
- Verformung aus Schubverzerrung im Dübel
- Verformung aus Verdrehung in der Einspannstelle (aus Ankerverlängerung und Verbiegung der Grundplatte

Für den Dübelkopf gilt: $f_{Kopf} = f_{Biegung} + f_{Schub} + f_{Verdrehung}$

Für eine Einzellast am Dübelkopf gilt:

$$f_{Biegung} = \frac{V_{E,Kopf} \cdot h_{Dübel}^3}{3 \cdot EI_{Dübel}}$$

$$f_{Schub} = \frac{V_{E,Kopf} \cdot h_{Dübel}}{G \cdot A_{Dübel}} \cdot \chi_Q \text{ mit } \chi_{Q,Rechteck} = 1{,}2$$

$$f_{Verdrehung} = \Phi_{Fuss} \cdot h_{Dübel}$$

Für eine Gleichstreckenlast über die Dübelhöhe $h_{Dübel}$ gilt:

$$f_{Biegung} = \frac{q \cdot h_{Dübel}^4}{8 \cdot EI_{Dübel}} \text{ und } \tau_{h_{Dübel}} = \frac{q \cdot h_{Dübel}^3}{6 \cdot EI_{Dübel}}$$

$$f_{Schub} = \frac{q \cdot h_{Dübel}^2}{2 \cdot G \cdot A_{Dübel}} \cdot \chi_Q \text{ mit } \chi_{Q,Rechteck} = 1{,}2$$

$Dübel = Lug$

$$I_{Dübel} = \frac{b_{Dübel} \cdot t_{Dübel}^3}{12}$$

$$A_{Dübel} = b_{Dübel} \cdot t_{Dübel}$$

$$E_{Dübel} = 210000 \text{ N/mm}^2$$

$$G_{Dübel} = 81000 \text{ N/mm}^2$$

Für die Untersuchung der Auswirkungen der Ankersteifigkeit wurde bisher lediglich die Dübelverdrehung angesetzt, wobei für die Fußverdrehung Φ die Anteile aus der Zugankerdehnung berücksichtigt wurden. Eventuelle Biegeverformungen in der Grundplatte sind ebenfalls zu berücksichtigen.

Dübelbiegung und Schubverformung im Dübel sind bisher unberücksichtigt geblieben. Es zeigt sich, dass die Werte aus Schubverformung nur für extrem kleine Biegelängen über dem 10%-Bereich der Werte aus einer Biegeverformung liegen. Dieser Aussage liegt eine Einheitslast am Dübelkopf aufgebracht zugrunde.

A3.5.8 ERWEITERUNG UM EIN RÜCKSEITIGES ANLIEGEN

Für $v_2 < 0$ liegt der Dübel mit dem Dübelkopf am rückwärtigen Beton an. Eine hier übertragene Druckkraft hat die gleiche Wirkungsrichtung wie die Beanspruchung V. Sie mindert die übertragbare Beanspruchung V bei gleich bleibender Kraft R_{Lug} somit ab. Allerdings hat dieses Anliegen auch einen positiven Einfluss auf die Dübelverformung und somit indirekt auf die Kraft V_{LUG}. Für diesen Effekt muss die Dübelverformung im Dübelkopf untersucht werden. Die bisher untersuchte Verformung v_2 bei

einer Einbindetiefe h_{LUG}^* ist für $h_{LUG} > h_{LUG}^*$ ungeeignet. Daher wird die Verformung v_3 bei einer Einbindetiefe h_{LUG} eingeführt.

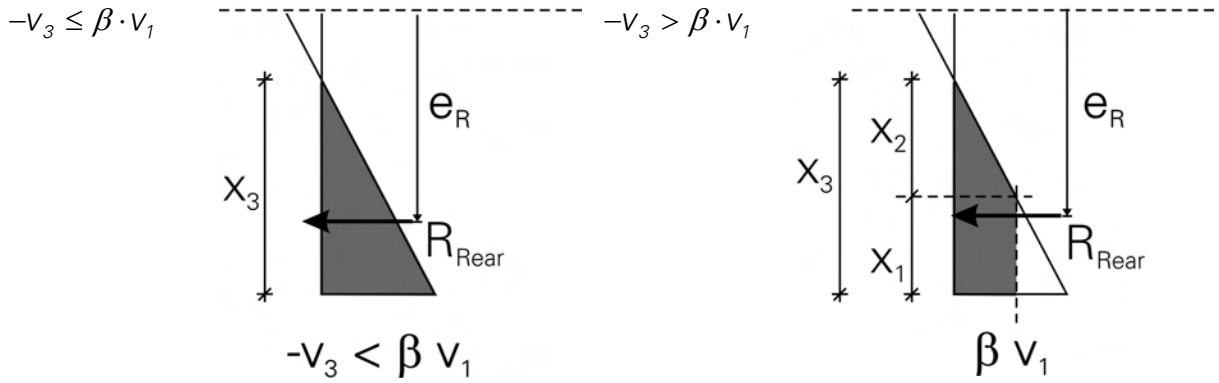


Abbildung 75 Bezeichnungen für Dübel liegt rückseitig an

$$V_{Last} = R_{Lug} - R_{Rear}$$

$$e_R = \alpha_4 \cdot h_{Lug}$$

$$R_{Rear} = \alpha_5 \cdot R_{Lug}^*$$

für $-v_3 \leq \beta \cdot v_1$

$$x_3 = \frac{v_3}{(v_3 - v_1)} \cdot h_{Lug,ges}$$

$$v_3 = v_1 \cdot h_{Lug,ges} \cdot \tan\Theta$$

$$\tan\Theta = \frac{u_{y,Anker}}{a_{Anker}}$$

$$\alpha_4 = \frac{e_R}{h_{Lug,ges}} = 1 - \frac{v_3}{3 \cdot (v_3 - v_1)}$$

$$\alpha_5 = \frac{h_{Lug,ges}}{2 \cdot h_{Lug}^*} \cdot \frac{v_3}{\beta \cdot v_1} \cdot \frac{v_3}{(v_3 - v_1)}$$

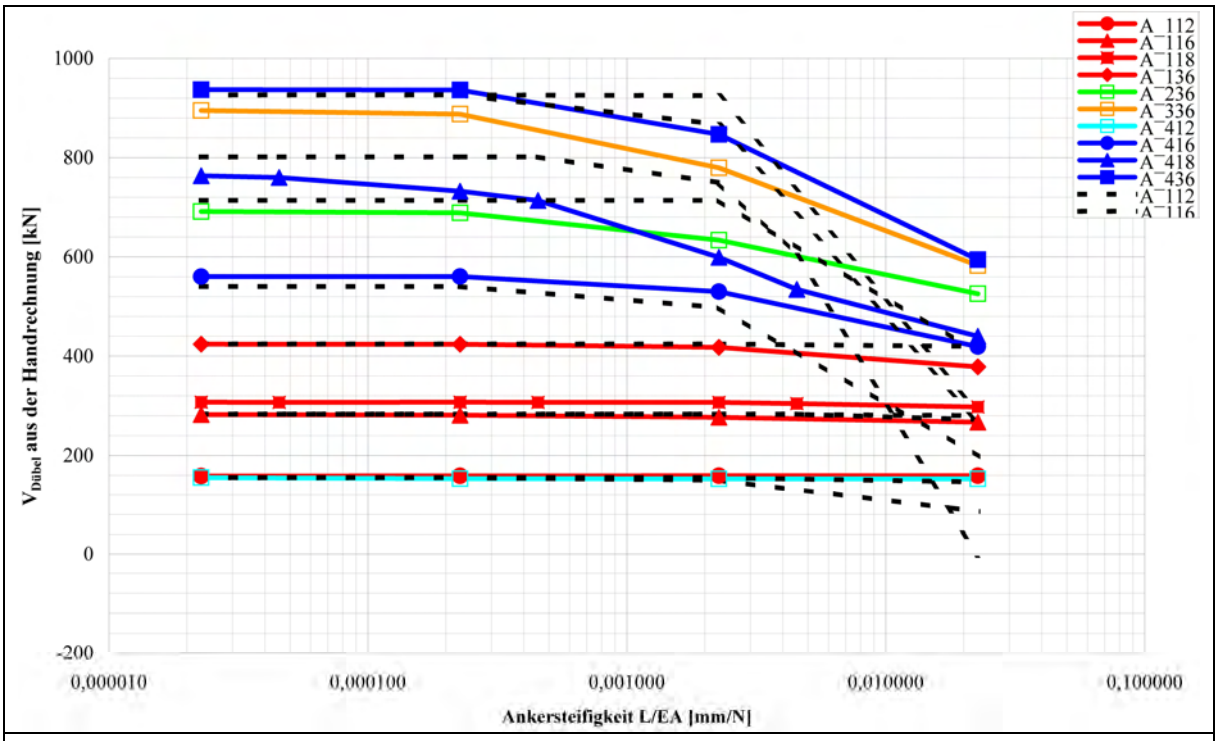
für $-v_3 > \beta \cdot v_1$ $\quad x_3 = \frac{v_3}{(v_3 - v_1)} \cdot h_{D,ges}$

$$x_{1,3} = (1-\beta) \cdot x_3 = \frac{v_3 \cdot (1-\beta)}{(v_3 - v_1)} \cdot h_{Lug,ges}$$

$$x_{2,3} = h_{Lug}^* - x_1 = \beta \cdot x_3 = \frac{v_3 \cdot \beta}{(v_3 - v_1)} \cdot h_{Lug,ges}$$

$$\alpha_4 = 1 - \frac{x_{1,3}^2 + \frac{1}{3} \cdot x_{2,3}^2}{h_{Lug,ges} \cdot (2 \cdot x_{1,3} + x_{2,3})} = 1 - \frac{\frac{v_3}{(v_3 - v_1)} \cdot \left[(1-\beta)^2 + \frac{\beta^2}{3}\right]}{(2-\beta)}$$

$$\alpha_5 = \frac{x_{1,3} + \frac{x_{2,3}}{2}}{h_{Lug}^*} = \frac{h_{Lug,ges}}{h_{Lug}^*} \cdot \frac{v_3}{(v_3 - v_1)} \cdot \left(1 - \frac{\beta}{2}\right)$$



Quelle: „@Ankersteifigkeit_7.xls – Ermittlung FA u VD2“

Abbildung 76 Vergleich für mit rückwärtigem Anliegen

Der Ansatz des Rückwärtigen Anliegens bringt keine Verbesserung. Ein Anliegen ist nur für die weichen Anker „03“ zu beobachten. Hier wird die zulässige horizontale Beanspruchung V_{Last} weit unter die tatsächlichen Werte reduziert. Eine bessere Anpassung im Bereich der Steifigkeit „02“ ist nicht zu beobachten.

Vermutlich werden hier zu hohe Kräfte $R_{Rück}$ angesetzt, die tatsächlich nicht entstehen können, da der Dübel infolge $R_{Rück}$ eine deutliche Verformung erfährt, die diese Kraft wieder reduziert.

Um diesen offensichtlichen Fehler zu korrigieren, kann als Bedingung gesetzt werden $v_3 \geq 0$. die notwendige Kraft $V_{Rück}$ (R_{Rear}) ist dann die Kraft, die benötigt wird, um den Dübel entsprechend zurückzubiegen. Allerdings ist dann nahe liegend, dass auch die Biegung infolge $V_{Rück}$ zu berücksichtigen ist.

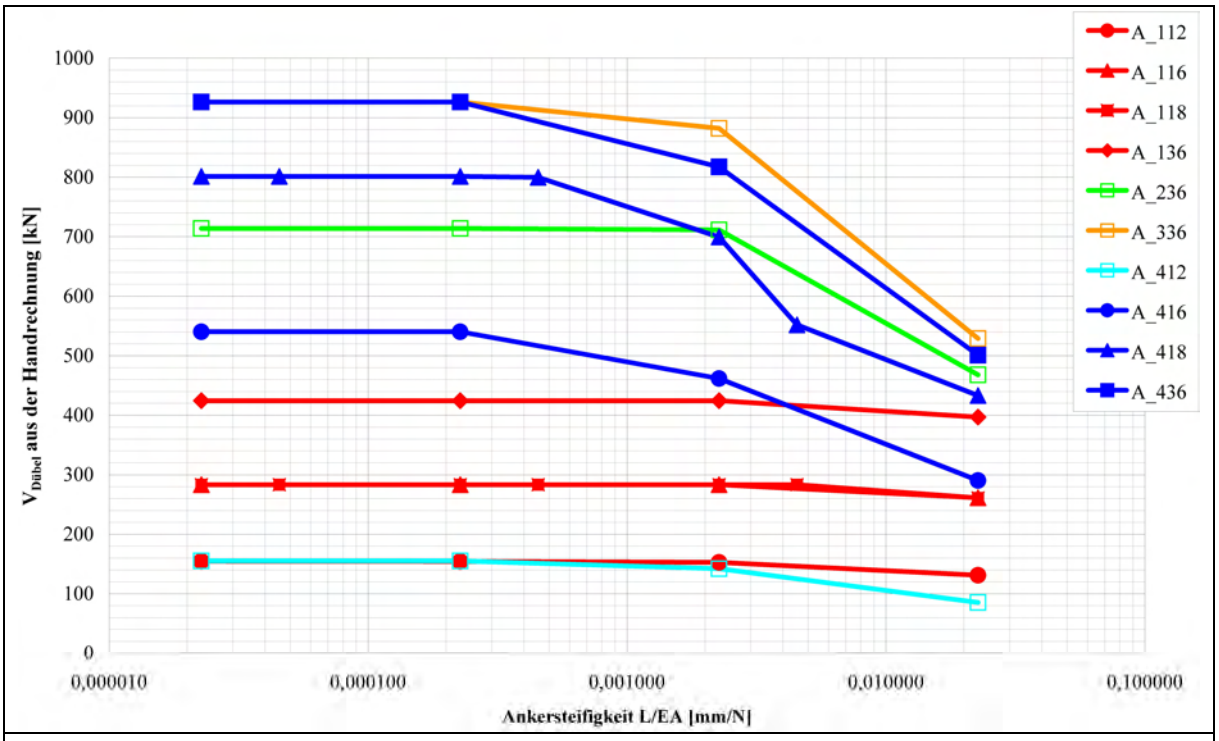
Auswertung F	Iteration FA, Schritt 1																	Wertung					Mittel
	nue=	0,2																					pos
Werte	β=	0,75		vor dem Dübel			hinter dem Dübel																neg
	u_{iz}^*	α_1	$\tan\Phi$	$u_{B,1}$	α_2	α_3	$u_{C,1}$	XC	$\alpha 4$	$\alpha 5$	$F_{Dübel,1}$	$V_{Dübel,1}$	$V_{Rück,1}$	F_{A1}	$u_{z3,FA1}$	$u_{z2,FA0}$	$F_{A,0}$	F_A	$F_{A,soll}$	$V_{L,u}$	V_{Last}	$maxF_{x,Last}$
	[mm]	[-]	[-]	[mm]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[N]	[N]	[N]	[N]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
A_112 _00	0,0059	0,04	0,0000	0,1380	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	37396	155306	0	38046	0,0009	0,0005	18	37	73	155,3	155,3	158,6
_01	0,0059	0,37	0,0000	0,1374	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	24533	155306	0	63471	0,0144	0,0078	18	63	28	155,3	155,3	158,9
_02	0,0059	1,00	0,0002	0,1318	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	0	155306	0	17910	0,0406	0,0219	18	18	6	155,3	155,3	159,1
_03	0,0059	1,00	0,0016	0,0756	0,5282	0,9397	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	0	145941	0	17463	0,3960	0,2132	18	18	1	155,3	146,6	159,1
A_116 _00	0,0108	0,04	0,0000	0,3617	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	68226	283344	0	159381	0,0036	0,0019	33	143	157	283,3	283,3	282,4
_01	0,0108	0,37	0,0000	0,3607	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	44759	283344	0	115798	0,0263	0,0141	33	116	65	283,3	283,3	281,3
_02	0,0108	1,00	0,0003	0,3504	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	0	283344	0	32675	0,0741	0,0399	33	33	26	283,3	283,3	276,9
_03	0,0108	1,00	0,0028	0,2479	0,5310	0,9911	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	0	280825	0	33725	0,7647	0,4118	33	34	10	283,3	280,1	267,0
A_118 _00	0,0108	0,04	0,0000	0,3617	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	68226	283344	0	159381	0,0036	0,0019	33	143	153	283,3	283,3	307,4
_00a	0,0108	0,07	0,0000	0,3616	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	65616	283344	0	154533	0,0070	0,0038	33	127	132	283,3	283,3	306,9
_01	0,0108	0,37	0,0000	0,3607	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	44759	283344	0	115798	0,0263	0,0141	33	116	65	283,3	283,3	307,4
_01a	0,0108	0,74	0,0001	0,3595	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	18693	283344	0	67390	0,0306	0,0165	33	67	54	283,3	283,3	307,0
_02	0,0108	1,00	0,0003	0,3504	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	0	283344	0	32675	0,0741	0,0399	33	33	21	283,3	283,3	307,0
_02a	0,0108	1,00	0,0006	0,3390	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	0	283344	0	32675	0,1482	0,0798	33	33	40	283,3	283,3	304,5
_03	0,0108	1,00	0,0028	0,2479	0,5310	0,9911	-0,0657	23,0	0,9488	0,0280	0	280825	7927	33725	0,7647	0,4118	33	34	13	283,3	272,2	297,6
A_136 _00	0,0140	0,04	0,0000	0,4229	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	102015	424499	0	233864	0,0053	0,0029	44	206	225	424,5	424,5	424,2
_01	0,0140	0,39	0,0000	0,4217	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	65060	424499	0	165234	0,0375	0,0202	44	165	90	424,5	424,5	424,1
_02	0,0140	1,00	0,0004	0,4097	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	0	424499	0	44408	0,1007	0,0542	44	44	53	424,5	424,5	418,0
_03	0,0140	1,00	0,0039	0,2898	0,5310	0,9911	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	0	420709	0	45738	1,0371	0,5585	44	46	16	424,5	419,7	378,5
A_236 _00	0,0236	0,05	0,0000	0,4887	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	166956	713919	0	448727	0,0102	0,0051	111	399	378	713,9	713,9	691,5
_01	0,0236	0,53	0,0001	0,4834	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	83327	713919	0	277469	0,0629	0,0315	111	277	193	713,9	713,9	688,7
_02	0,0236	1,00	0,0010	0,4306	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	0	713919	0	110815	0,2513	0,1256	111	111	135	713,9	713,9	633,9
_03	0,0236	1,00	0,0097	-0,0975	0,5181	0,6042	-0,2839	29,4	0,8776	0,1127	0	431374	80448	68785	1,5597	0,7799	111	76	37	713,9	406,3	525,7
A_336 _00	0,0306	0,06	0,0000	0,5043	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	216917	926335	0	654870	0,0149	0,0069	185	586	467	926,3	926,3	895,0
_01	0,0306	0,63	0,0002	0,4922	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	85042	926335	0	369141	0,0837	0,0386	185	369	242	926,3	926,3	887,7
_02	0,0306	1,00	0,0016	0,3706	0,5139	0,9993	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	0	925653	0	188890	0,4283	0,1977	185	190	181	926,3	925,0	779,5
_03	0,0306	1,00	0,0161	-0,8453	0,5864	0,5468	-0,7843	48,6	0,8784	0,2623	0	506507	#####	115201	2,6123	1,2057	185	115	45	926,3	290,0	582,7
A_412 _00	0,0059	0,07	0,0000	0,1152	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	36189	155306	0	127565	0,0029	0,0012	42	117	65	155,3	155,3	155,2
_01	0,0059	0,68	0,0000	0,1112	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	12472	155306	0	71508	0,0162	0,0069	42	72	24	155,3	155,3	153,2
_02	0,0059	1,00	0,0004	0,0714	0,5336	0,9693	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	0	150541	0	43084	0,0977	0,0413	42	43	4	155,3	150,1	153,0
_03	0,0059	1,00	0,0037	-0,3269	0,6080	0,5327	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	0	82726	0	26536	0,6017	0,2546	42	26	0	155,3	85,7	152,8
A_416 _00	0,0207	0,07	0,0000	0,3006	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	125913	540362	0	443843	0,0101	0,0043	146	405	275	540,4	540,4	560,3
_01	0,0207	0,68	0,0001	0,2867	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	43394	540362	0	248799	0,0564	0,0239	146	249	139	540,4	540,4	560,5
_02	0,0207	1,00	0,0013	0,1481	0,5229	0,9118	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	0	492715	0	138572	0,3142	0,1329	146	140	118	540,4	498,0	530,0
_03	0,0207	1,00	0,0128	-1,2375	0,6214	0,5245	-0,7182	56,3	0,8592	0,1731	0	283435	93547	92683	2,1017	0,8892	146	92	30	540,4	197,7	419,3
A_418 _00	0,0307	0,07	0,0000	0,4818	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	186743	801418	0	658270	0,0149	0,0063	217	601	420	801,4	801,4	763,5
_00a	0,0307	0,14	0,0000	0,4795	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	173131	801418	0	626097	0,0284	0,0120	217	533	361	801,4	801,4	759,9
_01	0,0307	0,68	0,0002	0,4612	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	64359	801418	0	368998	0,0837	0,0354	217	369	261	801,4	801,4	732,4
_01a	0,0307	1,00	0,0004	0,4384	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	0	801418	0	216877	0,0984	0,0416	217	217	252	801,4	801,4	713,6
_02	0,0307	1,00	0,0019	0,2557	0,5265	0,9305	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	0	745738	0	210983	0,4784	0,2024	217	212	147	801,4	749,4	599,3
_02a	0,0307	1,00	0,0038	0,0274	0,5003	0,6602	-0,0834	22,0	0,9510	0,0110	0	529112	8800	143249	0,6496	0,2749	217	167	112	801,4	603,1	534,7
_03	0,0307	1,00	0,0189	-1,7993	0,6181	0,5265	-2,3532	124,4	0,8341	0,5450	0	421946	#####	137326	3,1140	1,3174	217	136	31	801,4	-2,3	440,1
A_436 _00	0,0306	0,07	0,0000	0,4307	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	215394	926335	0	731741	0,0166	0,0070	223	657	472	926,3	926,3	937,1
_01	0,0306	0,70	0,0002	0,4123	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	69830	926335	0	387682	0,0879	0,0372	223	388	242	926,3	926,3	936,2
_02	0,0306	1,00	0,0019	0,2289	0,5266	0,9309	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	0	862293	0	216483	0,4909	0,2077	223	218	193	926,3	866,6	846,8
_03	0,0306	1,00	0,0194	-1,6054	0,6180	0,5265	-1,1206	57,7	0,8557	0,2517	0	487752	#####	140469	3,1852	1,3476	223	140	50	926,3	269,2	594,4
A_116 _00	0,0108	0,04	0,0000	0,3617	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	68226	283344	0	159381	0,0036	0,0019	33	143	157	283,3	283,3	282,4
_01	0,0108	0,37	0,0000	0,3607	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	44759	283344	0	115798	0,0263	0,0141	33	116	65	283,3	283,3	281,3
_02	0,0108	1,00	0,0003	0,3504	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	0	283344	0	32675	0,0741	0,0399	33	33	26	283,3	283,3	276,9
_03	0,0108	1,00	0,0028	0,2479	0,5310	0,9911	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	0	280825	0	33725	0,7647	0,4118	33	34	10	283,3	280,1	267,0
A_116 _00	0,0108	0,04	0,0000	0,3617	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	68226	283344	0	159381	0,0036	0,0019	33	143	157	283,3	283,3	282,4
_01	0,0108	0,37	0,0000	0,3607	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	44759	283344	0	115798	0,0263	0,0141	33	116	65	283,3	283,3	281,3
_02	0,0108	1,00	0,0003	0,3504	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	0	283344	0	32675	0,0741	0,0399	33	33	26	283,3	283,3	276,9
_03	0,0108	1,00	0,0028	0,2479	0,5310	0,9911	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	0	280825	0	33725	0,7647	0,4118	33	34	10	283,3	280,1	267,4
A_116 _00	0,0108	0,04	0,0000	0,3617	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	68226	283344	0	159381	0,0036	0,0019	33	143	157	283,3	283,3	282,4
_01	0,0108	0,37	0,0000	0,3607	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	44759	283344	0	115798	0,0263	0,0141	33	116	65	283,3	283,3	281,3
_02	0,0108	1,00	0,0003	0,3504	0,5000	1,0000	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	0	283344	0	32675	0,0741	0,0399	33	33	26	283,3	283,3	276,9
_03	0,0108	1,00	0,0028	0,2479	0,5310	0,9911	0,0000	0,0	1,0000	0,0000	0	280825	0	33725	0,7647	0,4118	33	34	10	283,3	280,1	267,4

Quelle: „@Ankersteifigkeit_7.xls – Ermittlung FA u VD2“

Tabelle 32 Nachrechnung mit rückwärtigem Anliegen

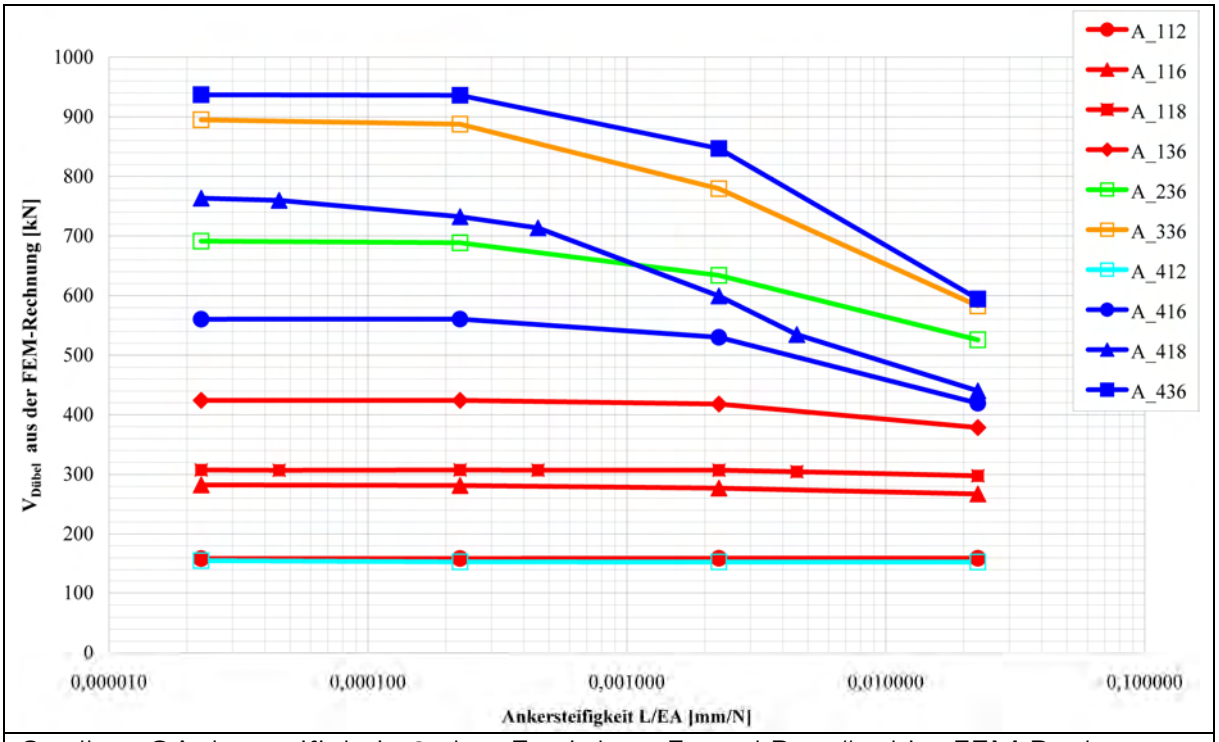
A3.5.9 VERBESSERUNG RÜCKSEITIGES ANLIEGEN UND VERFORMUNG

Berücksichtigt man die Beigeverformung im Schubdübel und setzt R_{Rear} vereinfachend als Einzellast am unteren Dübelende an, so gelten die in der Hauptarbeit (Kapitel 6.6.4) dargestellten Formeln. Zusätzlich kann die Schubverformungen am Dübel berücksichtigt werden, bei üblichen Dübelformen überwiegt aber der Beigeanteil, so dass vereinfachend die Schubverformung vernachlässigt werden kann. In der hier dargestellten Gegenüberstellung wird die Schubverformung nicht berücksichtigt.



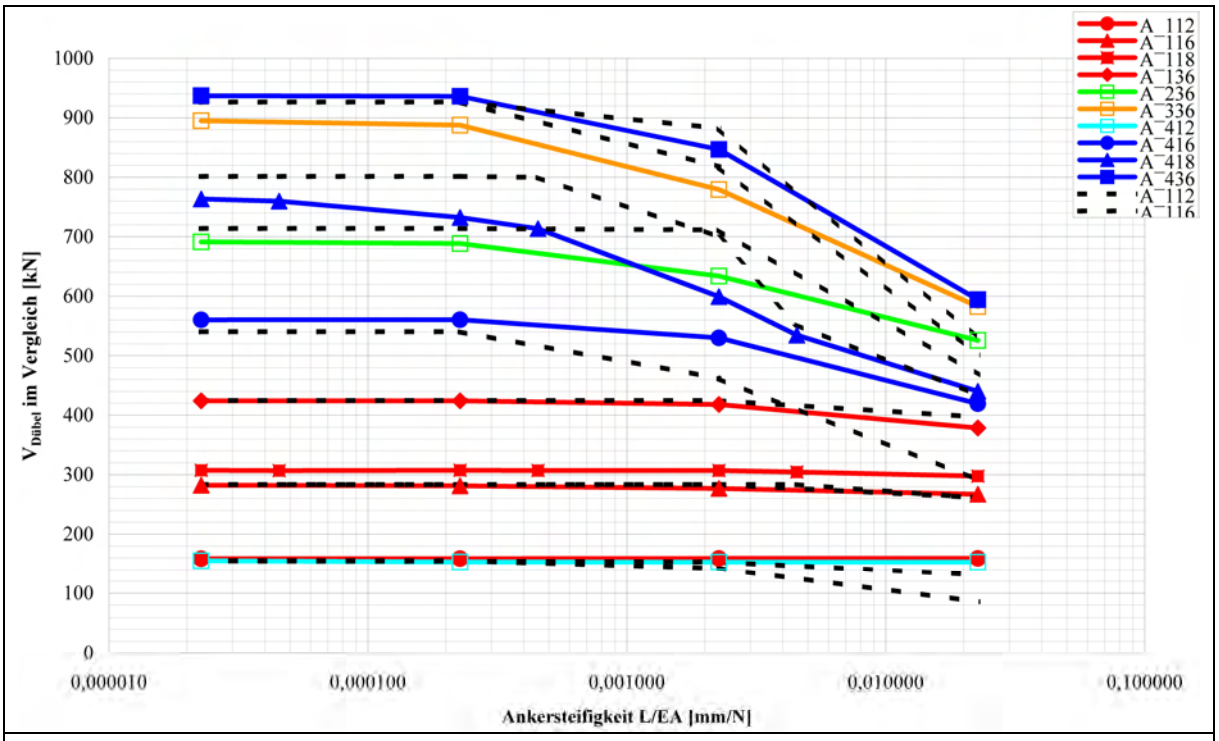
Quelle: „@Ankersteifigkeit_8.xls – Ermittlung FA u VD2" – hier Darstellung der Nachrechnung

Abbildung 77 Vergleich für mit rückwärtigem Anliegen, aber $v_3 \geq 0$ – nur Biegung T1



Quelle: „@Ankersteifigkeit_8.xls – Ermittlung F_A und R_{Lug2}" – hier FEM-Rechnung

Abbildung 78 Vergleich für mit rückwärtigem Anliegen, aber $v_3 \geq 0$ – nur Biegung T2



Quelle: „@Ankersteifigkeit_8.xls – Ermittlung F_A und R_{Lug2}" – hier Gegenüberstellung Nachrechnung und FEM-Rechnung

Abbildung 79 Vergleich für mit rückwärtigem Anliegen, aber $v_3 \geq 0$ – nur Biegung T3

Auswertung mit R	Iteration FA, Schritt 1															Wertung					Mittel
	nue=	0,2																			pos
Werte	β=	0,75		vor dem Dübel					hinter dem Dübel												neg
	u_{rz}^* [mm]	α_1 [-]	$\tan\Phi$ [-]	$u_{B,1}$ [mm]	X1 [mm]	X2 [mm]	α_2 [-]	α_3 [-]	$u_{C,1}$ [mm]	$V_{Rück,1}$ [N]	$F_{Dübel,1}$ [N]	$V_{Dübel,1}$ [N]	F_{A1} [N]	$u_{z3,FA1}$ [mm]	$u_{z2,FA0}$ [mm]	$F_{A,0}$ [kN]	F_A [kN]	$F_{A,soll}$ [kN]	V_{Lu} [kN]	V_{Last} [kN]	$maxF_{x\,Last}$ [kN]
A_112 _00	0,0059	0,04	0,0000	0,1011	37,3	2,6	0,5141	0,9992	0,1232	0	37396	155185	38368	0,0009	0,0005	18	38	73	155,3	154,7	158,6
_01	0,0059	0,37	0,0000	0,1005	36,8	3,2	0,5165	0,9988	0,1230	0	24533	155126	31494	0,0071	0,0038	18	28	28	155,3	154,5	158,9
_02	0,0059	1,00	0,0002	0,0949	32,0	8,0	0,5306	0,9917	0,1201	0	0	154014	18486	0,0419	0,0226	18	18	6	155,3	152,7	159,1
_03	0,0059	1,00	0,0016	0,0387	13,9	26,1	0,5069	0,7958	0,0920	0	0	123590	14384	0,3262	0,1756	18	15	1	155,3	131,2	159,1
A_116 _00	0,0108	0,04	0,0000	0,2944	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,2134	0	68226	283344	69412	0,0016	0,0008	33	68	157	283,3	283,3	282,4
_01	0,0108	0,37	0,0000	0,2934	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,2113	0	44759	283344	56776	0,0129	0,0069	33	50	65	283,3	283,3	281,3
_02	0,0108	1,00	0,0003	0,2831	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,1908	0	0	283344	32675	0,0741	0,0399	33	33	26	283,3	283,3	276,9
_03	0,0108	1,00	0,0028	0,1806	20,0	20,0	0,5236	0,9163	-0,0144	2355	0	259621	30066	0,6818	0,3671	33	31	10	283,3	261,4	267,0
A_118 _00	0,0108	0,04	0,0000	0,2944	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,0718	0	68226	283344	69412	0,0016	0,0008	33	68	153	283,3	283,3	307,4
_00a	0,0108	0,07	0,0000	0,2943	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,0713	0	65616	283344	68007	0,0031	0,0017	33	65	132	283,3	283,3	306,9
_01	0,0108	0,37	0,0000	0,2934	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,0679	0	44759	283344	56776	0,0129	0,0069	33	50	65	283,3	283,3	307,4
_01a	0,0108	0,74	0,0001	0,2922	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,0636	0	18693	283344	42740	0,0194	0,0104	33	41	54	283,3	283,3	307,0
_02	0,0108	1,00	0,0003	0,2831	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,0294	0	0	283344	32675	0,0741	0,0399	33	33	21	283,3	283,3	307,0
_02a	0,0108	1,00	0,0006	0,2717	40,0	0,0	0,5000	1,0000	-0,0133	331	0	283344	32471	0,1473	0,0793	33	33	40	283,3	283,3	304,5
_03	0,0108	1,00	0,0028	0,1806	20,0	20,0	0,5236	0,9163	-0,3553	8842	0	259621	25440	0,5769	0,3106	33	31	13	283,3	261,0	297,6
A_136 _00	0,0140	0,04	0,0000	0,3586	34,4	0,0	0,5000	1,0000	0,2562	0	102015	424499	99339	0,0023	0,0012	44	97	225	424,5	424,5	424,2
_01	0,0140	0,39	0,0000	0,3574	34,4	0,0	0,5000	1,0000	0,2534	0	65060	424499	79440	0,0180	0,0097	44	69	90	424,5	424,5	424,1
_02	0,0140	1,00	0,0004	0,3454	34,4	0,0	0,5000	1,0000	0,2255	0	0	424499	44408	0,1007	0,0542	44	44	53	424,5	424,5	418,0
_03	0,0140	1,00	0,0039	0,2255	18,4	16,0	0,5268	0,9328	-0,0534	8754	0	395985	39798	0,9025	0,4859	44	43	16	424,5	396,9	378,5
A_236 _00	0,0236	0,05	0,0000	0,4144	60,7	0,0	0,5000	1,0000	0,3859	0	168956	713919	195293	0,0044	0,0022	111	192	378	713,9	713,9	691,5
_01	0,0236	0,53	0,0001	0,4091	60,7	0,0	0,5000	1,0000	0,3789	0	83327	713919	152478	0,0346	0,0173	111	140	193	713,9	713,9	688,7
_02	0,0236	1,00	0,0010	0,3563	55,8	4,9	0,5167	0,9988	0,3094	0	0	713089	113460	0,2573	0,1286	111	115	135	713,9	711,4	633,9
_03	0,0236	1,00	0,0097	-0,1718	11,2	49,5	0,5298	0,5925	-0,3865	507280	0	423010	-106995	#####	-1,2131	111	73	37	713,9	467,9	525,7
A_336 _00	0,0306	0,06	0,0000	0,4292	83,8	0,0	0,5000	1,0000	0,4334	0	216917	926335	285000	0,0065	0,0030	185	281	467	926,3	926,3	895,0
_01	0,0306	0,63	0,0002	0,4171	83,8	0,0	0,5000	1,0000	0,4218	0	85042	926335	224134	0,0508	0,0235	185	214	242	926,3	926,3	887,7
_02	0,0306	1,00	0,0016	0,2955	50,4	33,4	0,5315	0,9560	0,3057	0	0	885571	185727	0,4212	0,1944	185	185	181	926,3	882,1	779,5
_03	0,0306	1,00	0,0161	-0,9204	7,4	76,4	0,5901	0,5443	-0,8553	3788700	0	504226	######	#####	######	185	115	45	926,3	528,9	582,7
A_412 _00	0,0059	0,07	0,0000	0,0993	120,7	0,0	0,5000	1,0000	0,1156	0	36189	155306	57339	0,0013	0,0006	42	57	65	155,3	155,3	155,2
_01	0,0059	0,68	0,0000	0,0953	120,7	0,0	0,5000	1,0000	0,1149	0	12472	155306	47305	0,0107	0,0045	42	46	24	155,3	155,3	153,2
_02	0,0059	1,00	0,0004	0,0555	58,0	62,7	0,5219	0,9065	0,1083	0	0	140784	39530	0,0896	0,0379	42	40	4	155,3	142,2	153,0
_03	0,0059	1,00	0,0037	-0,3428	7,6	113,1	0,6098	0,5315	0,0423	0	0	82550	26549	0,6020	0,2547	42	26	0	155,3	85,4	152,8
A_416 _00	0,0207	0,07	0,0000	0,2453	120,7	0,0	0,5000	1,0000	0,2682	0	125913	540362	199502	0,0045	0,0019	146	198	275	540,4	540,4	560,3
_01	0,0207	0,68	0,0001	0,2314	120,7	0,0	0,5000	1,0000	0,2590	0	43394	540362	164590	0,0373	0,0158	146	161	139	540,4	540,4	560,5
_02	0,0207	1,00	0,0013	0,0929	43,6	77,1	0,5086	0,8115	0,1672	0	0	438490	120404	0,2730	0,1155	146	128	118	540,4	461,7	530,0
_03	0,0207	1,00	0,0128	-1,2928	5,7	115,0	0,6229	0,5237	-0,7511	7886100	0	282976	######	#####	######	146	92	30	540,4	290,4	419,3
A_418 _00	0,0307	0,07	0,0000	0,3998	120,7	0,0	0,5000	1,0000	0,3754	0	186743	801418	295884	0,0067	0,0028	217	294	420	801,4	801,4	763,5
_00a	0,0307	0,14	0,0000	0,3975	120,7	0,0	0,5000	1,0000	0,3726	0	173131	801418	290125	0,0132	0,0056	217	286	361	801,4	801,4	759,9
_01	0,0307	0,68	0,0002	0,3793	120,7	0,0	0,5000	1,0000	0,3499	0	64359	801418	244106	0,0554	0,0234	217	238	261	801,4	801,4	732,4
_01a	0,0307	1,00	0,0004	0,3564	114,5	6,3	0,5115	0,9995	0,3215	0	0	801041	221061	0,1003	0,0424	217	224	252	801,4	799,8	713,6
_02	0,0307	1,00	0,0019	0,1738	47,1	73,6	0,5119	0,8410	0,0945	0	0	673974	186105	0,4220	0,1785	217	195	147	801,4	699,5	599,3
_02a	0,0307	1,00	0,0038	-0,0546	27,1	93,6	0,5107	0,6123	-0,1892	301354	0	490737	-50211	#####	-0,0963	217	150	112	801,4	552,0	534,7
_03	0,0307	1,00	0,0189	-1,8813	6,2	114,5	0,6197	0,5256	-2,4590	3916859	0	421210	######	#####	######	217	136	31	801,4	433,1	440,1
A_436 _00	0,0306	0,07	0,0000	0,3684	105,0	0,0	0,5000	1,0000	0,3867	0	215394	926335	313756	0,0071	0,0030	223	311	472	926,3	926,3	937,1
_01	0,0306	0,70	0,0002	0,3501	105,0	0,0	0,5000	1,0000	0,3727	0	69830	926335	252171	0,0572	0,0242	223	245	242	926,3	926,3	936,2
_02	0,0306	1,00	0,0019	0,1666	42,7	62,3	0,5138	0,8556	0,2329	0	0	792585	194892	0,4419	0,1870	223	202	193	926,3	817,4	846,8
_03	0,0306	1,00	0,0194	-1,6677	5,4	99,6	0,6194	0,5258	-1,1651	#######	0	487023	######	#####	######	223	140	50	926,3	501,0	594,4
A_116 _00	0,0108	0,04	0,0000	0,2944	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,2134	0	68226	283344	69412	0,0016	0,0008	33	68	157	283,3	283,3	282,4
_01	0,0108	0,37	0,0000	0,2934	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,2113	0	44759	283344	56776	0,0129	0,0069	33	50	65	283,3	283,3	281,3
_02	0,0108	1,00	0,0003	0,2831	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,1908	0	0	283344	32675	0,0741	0,0399	33	33	26	283,3	283,3	276,9
_03	0,0108	1,00	0,0028	0,1806	20,0	20,0	0,5236	0,9163	-0,0144	2355	0	259621	30066	0,6818	0,3671	33	31	10	283,3	261,4	267,0
A_116 _00	0,0108	0,04	0,0000	0,2944	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,2134	0	68226	283344	69412	0,0016	0,0008	33	68	157	283,3	283,3	282,4
_01	0,0108	0,37	0,0000	0,2934	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,2113	0	44759	283344	56776	0,0129	0,0069	33	50	65	283,3	283,3	281,3
_02	0,0108	1,00	0,0003	0,2831	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,1908	0	0	283344	32675	0,0741	0,0399	33	33	26	283,3	283,3	276,9
_03	0,0108	1,00	0,0028	0,1806	20,0	20,0	0,5236	0,9163	-0,0144	2355	0	259621	30066	0,6818	0,3671	33	31	10	283,3	261,4	267,4
A_116 _00	0,0108	0,04	0,0000	0,2944	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,2134	0	68226	283344	69412	0,0016	0,0008	33	68	157	283,3	283,3	282,4
_01	0,0108	0,37	0,0000	0,2934	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,2113	0	44759	283344	56776	0,0129	0,0069	33	50	65	283,3	283,3	281,3
_02	0,0108	1,00	0,0003	0,2831	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,1908	0	0	283344	32675	0,0741	0,0399	33	33	26	283,3	283,3	276,9
_03	0,0108	1,00	0,0028	0,1806	20,0	20,0	0,5236	0,9163	-0,0144	2355	0	259621	30066	0,6818	0,3671	33	31	10	283,3	261,4	267,4

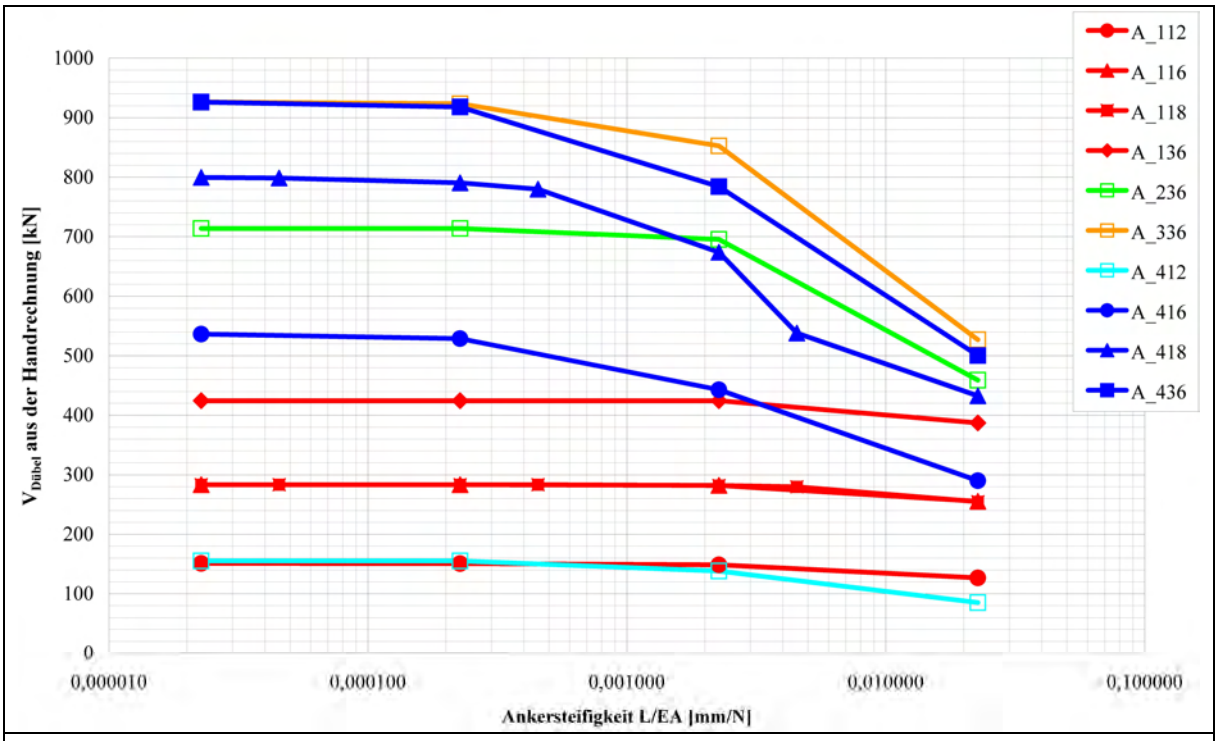
Quelle: „@Ankersteifigkeit_8.xls – Ermittlung F_A und R_{Lug2}“

Tabelle 33 Nachrechnung mit rückwärtigem Anliegen, aber $v_3 \geq 0$ – nur Biegung

Qualität für die Nachrechnung von V nach Tabelle 33:

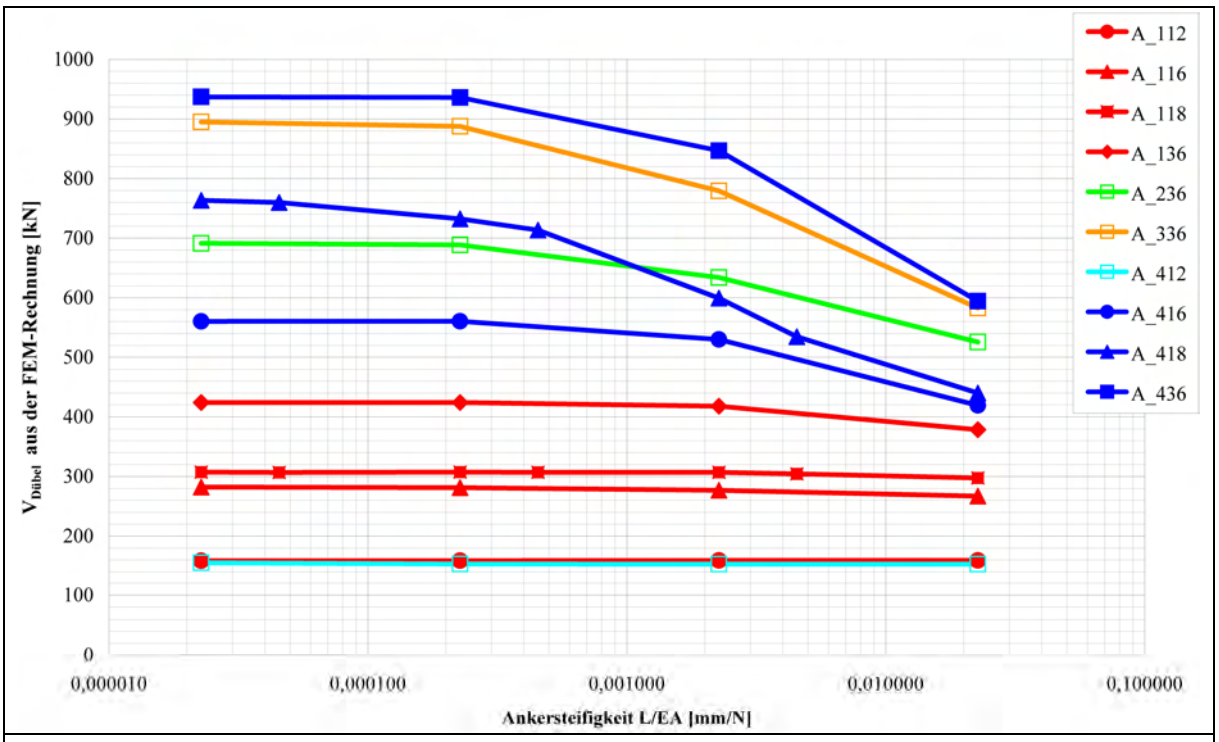
Betrachte man die Differenz V_{rech} zu V_{FEM} und definiert positiv – $V_{rech} < V_{FEM}$ – so gilt:

- im Mittel: 2,10 %
- positive im Mittel 7,95 %
- negative im Mittel -3,36 %
- maximal negativ -12,50 % bei Steifigkeit _02 (schon recht weich)



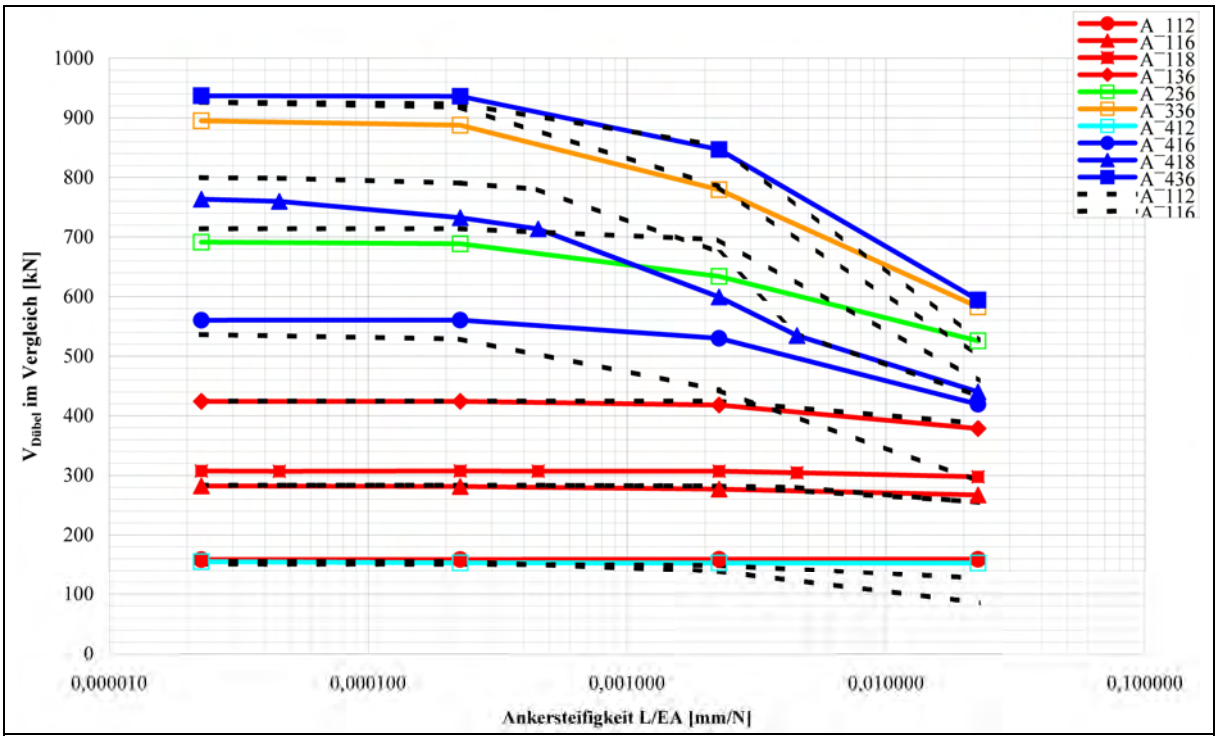
Quelle: „@Ankersteifigkeit_8.xls – Ermittlung F_A u ΔR_2" – hier Darstellung der Nachrechnung

Abbildung 80 Vergleich für rückwärtiges Anliegen, aber $v_3 \geq 0$ – nur Biegung + Schub T1



Quelle: „@Ankersteifigkeit_8.xls – Ermittlung F_A u ΔR_2" – hier Darstellung der FEM-Rechnung

Abbildung 81 Vergleich für rückwärtiges Anliegen, aber $v_3 \geq 0$ – nur Biegung + Schub T2



Quelle: „@Ankersteifigkeit_8.xls – Ermittlung F_A u ΔR_2" – hier Gegenüberstellung Nachrechnung und FEM-Rechnung

Abbildung 82 Vergleich für rückwärtiges Anliegen, aber $v_3 \geq 0$ – nur Biegung + Schub T3

Auswertung mit R Iteration FA, Schritt 1																	Wertung					Mittel
	nue=	0,2																				pos
Werte	β=	0,75		vor dem Dübel						hinter dem Dübel												neg
	u_{c2}^*	α_1	$\tan\Phi$	$u_{B,1}$	X1	X2	α_2	α_3	$u_{C,1}$	$V_{Rück,1}$	$F_{Dübel,1}$	$V_{Dübel,1}$	F_{A1}	$u_{z3,FA1}$	$u_{z2,FA0}$		$F_{A,0}$	F_A	$F_{A,soll}$	$V_{L,u}$	V_{Last}	$maxF_{x\ Last}$
	[mm]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[mm]	[N]	[N]	[N]	[N]	[mm]	[mm]		[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
A_112 _00	0,0059	0,04	0,0000	0,0896	28,5	11,5	0,5340	0,9806	0,1117	0	37396	152301	38495	0,0009	0,0005		18	37	73	155,3	151,0	158,6
_01	0,0059	0,37	0,0000	0,0890	28,1	11,8	0,5340	0,9793	0,1115	0	24533	152091	31545	0,0072	0,0039		18	27	28	155,3	150,8	158,9
_02	0,0059	1,00	0,0002	0,0834	25,3	14,7	0,5328	0,9642	0,1086	0	0	149751	18023	0,0409	0,0220		18	18	6	155,3	148,8	159,1
_03	0,0059	1,00	0,0016	0,0272	12,4	27,5	0,5033	0,7463	0,0805	0	0	115901	13424	0,3044	0,1639		18	15	1	155,3	126,7	159,1
A_116 _00	0,0108	0,04	0,0000	0,2734	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,1924	0	68226	283344	69412	0,0016	0,0008		33	68	157	283,3	283,3	282,4
_01	0,0108	0,37	0,0000	0,2724	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,1904	0	44759	283344	56776	0,0129	0,0069		33	50	65	283,3	283,3	281,3
_02	0,0108	1,00	0,0003	0,2621	36,3	3,7	0,5186	0,9984	0,1699	0	0	282901	33432	0,0758	0,0408		33	34	26	283,3	282,2	276,9
_03	0,0108	1,00	0,0028	0,1596	17,9	22,1	0,5183	0,8863	-0,0353	5796	0	251118	27658	0,6272	0,3377		33	30	10	283,3	255,4	267,0
A_118 _00	0,0108	0,04	0,0000	0,2734	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,0508	0	68226	283344	69412	0,0016	0,0008		33	68	153	283,3	283,3	307,4
_00a	0,0108	0,07	0,0000	0,2733	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,0504	0	65616	283344	68007	0,0031	0,0017		33	65	132	283,3	283,3	306,9
_01	0,0108	0,37	0,0000	0,2724	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,0469	0	44759	283344	56776	0,0129	0,0069		33	50	65	283,3	283,3	307,4
_01a	0,0108	0,74	0,0001	0,2713	39,9	0,0	0,5001	1,0000	0,0427	0	18693	283344	42744	0,0194	0,0104		33	41	54	283,3	283,3	307,0
_02	0,0108	1,00	0,0003	0,2621	36,3	3,7	0,5186	0,9984	0,0085	0	0	282901	33432	0,0758	0,0408		33	33	21	283,3	282,0	307,0
_02a	0,0108	1,00	0,0006	0,2508	32,6	7,4	0,5296	0,9930	-0,0343	853	0	281351	33199	0,1506	0,0811		33	33	40	283,3	279,8	304,5
_03	0,0108	1,00	0,0028	0,1596	17,9	22,1	0,5183	0,8863	-0,3762	9364	0	251118	23902	0,5420	0,2918		33	30	13	283,3	254,7	297,6
A_136 _00	0,0140	0,04	0,0000	0,3316	34,4	0,0	0,5000	1,0000	0,2291	0	102015	424499	99339	0,0023	0,0012		44	97	225	424,5	424,5	424,2
_01	0,0140	0,39	0,0000	0,3304	34,4	0,0	0,5000	1,0000	0,2263	0	65060	424499	79440	0,0180	0,0097		44	69	90	424,5	424,5	424,1
_02	0,0140	1,00	0,0004	0,3184	34,4	0,0	0,5000	1,0000	0,1985	0	0	424499	44408	0,1007	0,0542		44	44	53	424,5	424,5	418,0
_03	0,0140	1,00	0,0039	0,1985	16,2	18,2	0,5207	0,9010	-0,0804	13191	0	382457	36493	0,8275	0,4456		44	42	16	424,5	387,1	378,5
A_236 _00	0,0236	0,05	0,0000	0,3743	60,7	0,0	0,5000	1,0000	0,3458	0	168956	713919	195293	0,0044	0,0022		111	192	378	713,9	713,9	691,5
_01	0,0236	0,53	0,0001	0,3690	60,7	0,0	0,5000	1,0000	0,3388	0	83327	713919	152478	0,0346	0,0173		111	140	193	713,9	713,9	688,7
_02	0,0236	1,00	0,0010	0,3162	42,9	17,8	0,5341	0,9797	0,2692	0	0	699423	114134	0,2588	0,1294		111	113	135	713,9	695,6	633,9
_03	0,0236	1,00	0,0097	-0,2119	10,6	50,1	0,5354	0,5872	-0,4266	559957	0	419229	-125292	-2,8411	-1,4205		111	71	37	713,9	459,1	525,7
A_336 _00	0,0306	0,06	0,0000	0,3813	83,8	0,0	0,5000	1,0000	0,3855	0	216917	926335	285000	0,0065	0,0030		185	281	467	926,3	926,3	895,0
_01	0,0306	0,63	0,0002	0,3692	77,6	6,2	0,5156	0,9990	0,3739	0	85042	925426	228606	0,0518	0,0239		185	218	242	926,3	923,4	887,7
_02	0,0306	1,00	0,0016	0,2476	41,0	42,7	0,5228	0,9114	0,2578	0	0	844300	174713	0,3962	0,1829		185	177	181	926,3	852,7	779,5
_03	0,0306	1,00	0,0161	-0,9683	7,2	76,6	0,5922	0,5429	-0,9032	4000923	0	502891	######	######	######		185	115	45	926,3	526,9	582,7
A_412 _00	0,0059	0,07	0,0000	0,0906	120,7	0,0	0,5000	1,0000	0,1069	0	36189	155306	57339	0,0013	0,0006		42	57	65	155,3	155,3	155,2
_01	0,0059	0,68	0,0000	0,0866	120,4	0,3	0,5007	1,0000	0,1062	0	12472	155306	47355	0,0107	0,0045		42	47	24	155,3	155,3	153,2
_02	0,0059	1,00	0,0004	0,0468	50,7	70,0	0,5153	0,8666	0,0996	0	0	134581	37378	0,0848	0,0359		42	39	4	155,3	138,3	153,0
_03	0,0059	1,00	0,0037	-0,3514	7,5	113,2	0,6108	0,5309	0,0337	0	0	82459	26556	0,6022	0,2548		42	26	0	155,3	85,3	152,8
A_416 _00	0,0207	0,07	0,0000	0,2151	104,8	15,9	0,5243	0,9967	0,2380	0	125913	538557	205081	0,0047	0,0020		146	204	275	540,4	536,4	560,3
_01	0,0207	0,68	0,0001	0,2012	90,4	30,3	0,5334	0,9860	0,2288	0	43394	532775	170789	0,0387	0,0164		146	164	139	540,4	528,9	560,5
_02	0,0207	1,00	0,0013	0,0627	38,1	82,6	0,5038	0,7524	0,1370	0	0	406579	110737	0,2511	0,1062		146	122	118	540,4	442,9	530,0
_03	0,0207	1,00	0,0128	-1,3230	5,6	115,1	0,6236	0,5232	-0,7813	8203204	0	282738	######	######	######		146	92	30	540,4	290,0	419,3
A_418 _00	0,0307	0,07	0,0000	0,3550	113,2	7,5	0,5135	0,9993	0,3306	0	186743	800868	300758	0,0068	0,0029		217	301	420	801,4	799,6	763,5
_00a	0,0307	0,14	0,0000	0,3527	111,2	9,5	0,5164	0,9989	0,3278	0	173131	800526	295988	0,0134	0,0057		217	294	361	801,4	798,6	759,9
_01	0,0307	0,68	0,0002	0,3345	97,7	23,1	0,5301	0,9925	0,3051	0	64359	795395	253600	0,0575	0,0243		217	245	261	801,4	790,6	732,4
_01a	0,0307	1,00	0,0004	0,3116	84,7	36,0	0,5342	0,9789	0,2767	0	0	784506	224743	0,1019	0,0431		217	223	252	801,4	779,9	713,6
_02	0,0307	1,00	0,0019	0,1290	41,1	79,6	0,5063	0,7875	0,0497	0	0	631108	172643	0,3915	0,1656		217	186	147	801,4	674,0	599,3
_02a	0,0307	1,00	0,0038	-0,0994	25,0	95,7	0,5186	0,6037	-0,2340	372701	0	483825	-94237	-0,4274	-0,1808		217	146	112	801,4	538,1	534,7
_03	0,0307	1,00	0,0189	-1,9261	6,1	114,7	0,6205	0,5251	-2,5038	3988205	0	420829	######	######	######		217	137	31	801,4	432,6	440,1
A_436 _00	0,0306	0,07	0,0000	0,3234	103,9	1,1	0,5026	1,0000	0,3417	0	215394	926317	314713	0,0071	0,0030		223	314	472	926,3	926,2	937,1
_01	0,0306	0,70	0,0002	0,3050	88,9	16,0	0,5266	0,9954	0,3277	0	69830	922082	261071	0,0592	0,0251		223	252	242	926,3	918,0	936,2
_02	0,0306	1,00	0,0019	0,1216	36,5	68,5	0,5071	0,7961	0,1879	0	0	737421	179332	0,4067	0,1720		223	192	193	926,3	784,3	846,8
_03	0,0306	1,00	0,0194	-1,7128	5,3	99,7	0,6203	0,5252	-1,2101	#######	0	486522	######	######	######		223	140	50	926,3	500,3	594,4
A_116 _00	0,0108	0,04	0,0000	0,2734	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,1924	0	68226	283344	69412	0,0016	0,0008		33	68	157	283,3	283,3	282,4
_01	0,0108	0,37	0,0000	0,2724	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,1904	0	44759	283344	56776	0,0129	0,0069		33	50	65	283,3	283,3	281,3
_02	0,0108	1,00	0,0003	0,2621	36,3	3,7	0,5186	0,9984	0,1699	0	0	282901	33432	0,0758	0,0408		33	34	26	283,3	282,2	276,9
_03	0,0108	1,00	0,0028	0,1596	17,9	22,1	0,5183	0,8863	-0,0353	5796	0	251118	27658	0,6272	0,3377		33	30	10	283,3	255,4	267,0
A_116_ 00	0,0108	0,04	0,0000	0,2734	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,1924	0	68226	283344	69412	0,0016	0,0008		33	68	157	283,3	283,3	282,4
_01	0,0108	0,37	0,0000	0,2724	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,1904	0	44759	283344	56776	0,0129	0,0069		33	50	65	283,3	283,3	281,3
_02	0,0108	1,00	0,0003	0,2621	36,3	3,7	0,5186	0,9984	0,1699	0	0	282901	33432	0,0758	0,0408		33	34	26	283,3	282,2	276,9
_03	0,0108	1,00	0,0028	0,1596	17,9	22,1	0,5183	0,8863	-0,0353	5796	0	251118	27658	0,6272	0,3377		33	30	10	283,3	255,4	267,4
A_116_ 00	0,0108	0,04	0,0000	0,2734	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,1924	0	68226	283344	69412	0,0016	0,0008		33	68	157	283,3	283,3	282,4
_01	0,0108	0,37	0,0000	0,2724	40,0	0,0	0,5000	1,0000	0,1904	0	44759	283344	56776	0,0129	0,0069		33	50	65	283,3	283,3	281,3
_02	0,0108	1,00	0,0003	0,2621	36,3	3,7	0,5186	0,9984	0,1699	0	0	282901	33432	0,0758	0,0408		33	34	26	283,3	282,2	276,9
_03	0,0108	1,00	0,0028	0,1596	17,9	22,1	0,5183	0,8863	-0,0353	5796	0	251118	27658	0,6272	0,3377		33	30	10	283,3	255,4	267,4

Quelle: „@Ankersteifigkeit_8.xls – Ermittlung F_A u ΔR_2 (2)“

Tabelle 34 Nachrechnung mit rückwärtigem Anliegen, aber $v_3 \geq 0$ – nur Biegung + Schub

Qualität für die Nachrechnung von V nach Tabelle 34, Werte in () nach Tabelle 33: Betrachte man die Differenz V_{rech} zu V_{FEM} und definiert positiv als $V_{rech} < V_{FEM}$ so gilt:

- im Mittel: 3,07 % (2,10 %)
- positive im Mittel 9,30 % (7,95 %)
- negative im Mittel -2,3 %(-3,36 %)
- maximal negativ -9,30 % (-12,50 %) bei Steifigkeit _02

Fazit: Die Berücksichtigung der Beigeverformung verbessert die Werte der Nachrechnung. eine zusätzliche Berücksichtigung der Schubverformung erhöht das Sicherheitsniveau indem allgemein die Werte gesenkt und die kritischen Spitzenwerte signifikant reduziert werden.

A3.6 DOKUMENTATION VON "@NACHRECHNEN.XLS"

Mit den neu berechneten Werten für F_L, ΔR_2 und R_R, kann ein neues verbessertes F_A berechnet werden, und der Iterrationsvorgang kann wiederholt werden. Der Ansatz von ΔR_2 und R_R in Kombination mit R^*_{Lug} entspricht einem verbesserten Werten für R_L und e_L.

Eine neue Iteration kann beginnen. Es zeigt sich, dass das Verfahren recht rasch konvergiert, im Allgemeinen reichen 1 bis 2 Iterationen, nach 5 Iterationen ist kaum noch eine Veränderung im Ergebnis festzustellen.

Dieses Rechenschema findet sich in der Datei @Nachrechnung.xls. Die Nachrechnung erfolgt mit einer EXCEL-Tabelle. Es werden generell 10 Iterationen durchgeführt, wobei die Ergebnisse eigentlich nach der zweiten Iteration hinreichend genau sind. Siehe auch oder mehr endgültig „@Berechnung Duebel Strecke.xls“ Die Tabelle gliedert sich in

- den Eingabebereich, Spalten A bis AT – siehe Abbildung 83,
- den Auswertebereich, Spalten AV bis BD – siehe Abbildung 84,
- den Rechenbereich, Spalten BF bis CS – siehe Abbildung 85 (Iteration 1).

Für den Vergleich der Nachrechnung mit den FEM-Werten werden 2 Versionen der Berechnung verglichen die Tabellen „@Berechnung Duebel Strecke.xls“ bzw. „@Berechnung Duebel Einzel.xls“. Die Versionen unterscheiden sich bezüglich der Verformungsberechnung am Dübel mittels Ansatz von Strecken, oder Einzellasten für R_{Lug} und ΔR_2.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	**Neugestaltung der Nachrechnung für Dübel**									
2	Nachrechnung mit Ansatz e_L^* nach P-R									
3										
4	Werte		Ist-Werte aus FEM							
5			u_x Last	$maxF_{x\ Last}$	F_A Anker	u_x Dübel	u_y Dübel	u_x Anker	u_y Anker	u_x Fuss
6			[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]

	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
1												
2					Parameter Geometrie + Material + Last							
3							a1=	150			E_s=	210000
4							a2=	110			G_s=	81000
5	u_y Fuss	BM2 u_x	BM2 u_y		$h_{Dübel}$	$t_{Dübel}$	$b_{Dübel}$	a_{Lug}	a_{Anchor}	b_{Base}	$EI_{Dübel}$	$GA_{Dübel}$
6	[mm]	[mm]	[mm]		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[Nmm²]	[Nmm²]

	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH
1												
2							Grundwerte					
3	[N/mm²]									Lastangriff am Lug		
4	Ankersteifigkeit						$h_{Dübel,max}$	R_L^*			Empir	
5	L/EA	f_c	E_c	e_v	N_E	M_E	$\mathbf{h_L^*}$	$R_{L,1}$	$R_{L,2}$	$\mathbf{R_L^*}$	$e_{1,Lug}$	α
6	[mm/kN]	[N/mm²]	[N/mm²]	[mm]	[kN]	[kNm]	**[mm]**	[kN]	[kN]	**[N]**	[mm]	[-]

	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT
1												
2								nur Spannung				
3								für $u_{\varepsilon z}^*$				
4	isch 1		P/R				Wahl			v_L^*		
5	β	$e_{L,1}^*$	$e_{L,2}^*$	η	k	$e_{L,3}^*$	$\mathbf{e_L^*}$	h_2^*	$v_{L,max}$	$v_{L,xu}$	$\mathbf{v_L^*}$	$\tan \Phi_{Grenz}$
6	[-]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[mm]	**[mm]**	[mm]	[mm]	[mm]	**[mm]**	[-]
7												

Abbildung 83 Eingabebereich der EXCEL-Tabelle @Nachrechnung

	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD
1									
2	Auswertung Vorgabe/Nachrechnung								
3	hier aus FEM/Versuch zu Rechnung								
4			"E"					"D"	
5	$F_{A,0}$	$F_{A,5}$	$F_{A,FEM}$	Differenz		$V_{L,u}^*$	V_u	$V_{u,FEM}$	Differenz
6	[kN]	[kN]	[kN]	[-]		[kN]	[kN]	[kN]	[-]
7									

Abbildung 84 Auswertebereich EXCEL-Tabelle @Nachrechnung

	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO
1	|-> Anker aus Schritt i-1, also Grundwerte oder 0									
2	Iteration F_A, Schritt 1									
3	nue=	0,2	(für alle weiteren Schritte)							
4	β=	0,8	(für alle weiteren Schritte)							
5	h_L^*	R_L^*	e_L^*	v_L^*	ΔR_2	$R_{rear,i}$	V_{E0}	F_{L0}	F_{A0}	F_{F0}
6	[mm]	[N]	[mm]	[mm]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]

	BP	BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW	BX	BY	BZ	CA
1		<-|	|-> Kräfte am verformten System									
2												
3							aus AO!			$v_{3,1}$ ohne R_R		
4										hinter der	$\tan \Phi$	$R_{Lug,0}$
5	$u_{A,FA0}$	$u_{L,FA0}$	$u_{\varepsilon z}^*$	α_1	$\tan \Phi$	$v_{1,1}$	h_2	x_1	x_2	$v_{3,1}$	$v_{3,a}$	$v_{3,b}$
6	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]

	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL
1											
2											
3			$v_{2,1}$ mit Rechteck R_L^* und R_R						hilfe:	0,75	Dämpfu
4	$\Delta R_{2,i-1}$		vor dem |	$\tan \Phi$	$R_{Lug,0}$	ΔR_2	R_R				
5	$v_{3,c}$	$R_{Rear,1}$	$v_{2,1}$	$v_{2,a}$	$v_{2,b}$	$v_{2,c}$	$v_{2,d}$	X1	X2	$\Delta R_{2,i}$	α_2
6	[mm]	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[-]

	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS
1							
2							
3	g für $\Delta R_{2,i}$						
4							
5	e_L^*	α_3	$R_{Lug,1}$	$F_{Lug,1}$	V_{E1}	a_{Ro}	F_{A1}
6	[mm]	[-]	[N]	[N]	[N]	[mm]	[N]
7							

Abbildung 85 Rechenbereich der EXCEL-Tabelle @Nachrechnung

A3.7 DISKUSSION DER NACHRECHNUNG FEM-WERTE

Der Beweis der Anwendbarkeit der oben entwickelten Formel wird in einem Vergleich der so ermittelten Werte mit den zugrunde liegenden Werten der FEM-Berechnung erbracht. Einen ersten Vergleich der in der Nachrechnung erreichten Wert – X-Achse, zu den in der FEM-Analyse ermittelten Werten – Y-Achse, zeigt Abbildung 86. Die folgenden Abbildungen zeigen dann Detailvergleiche für einzelne Gruppen von Rechnungen.

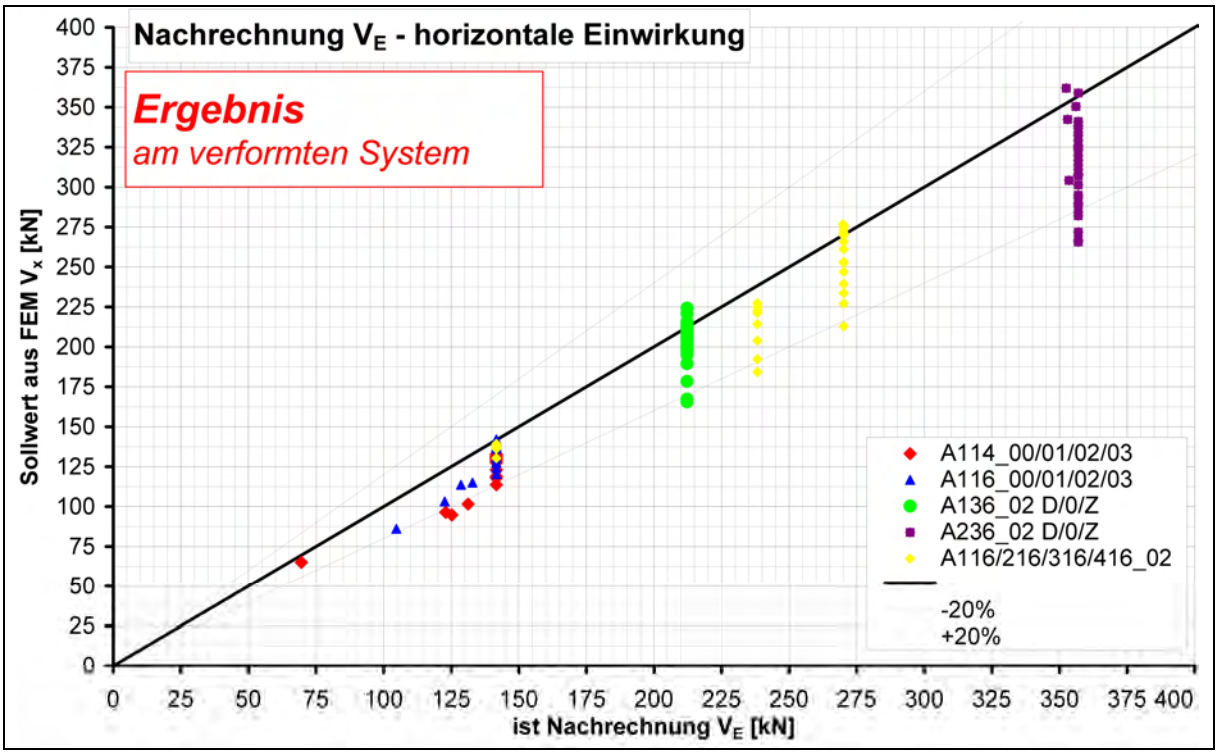


Abbildung 86 @Nachrechnung.xls für FEM – alles

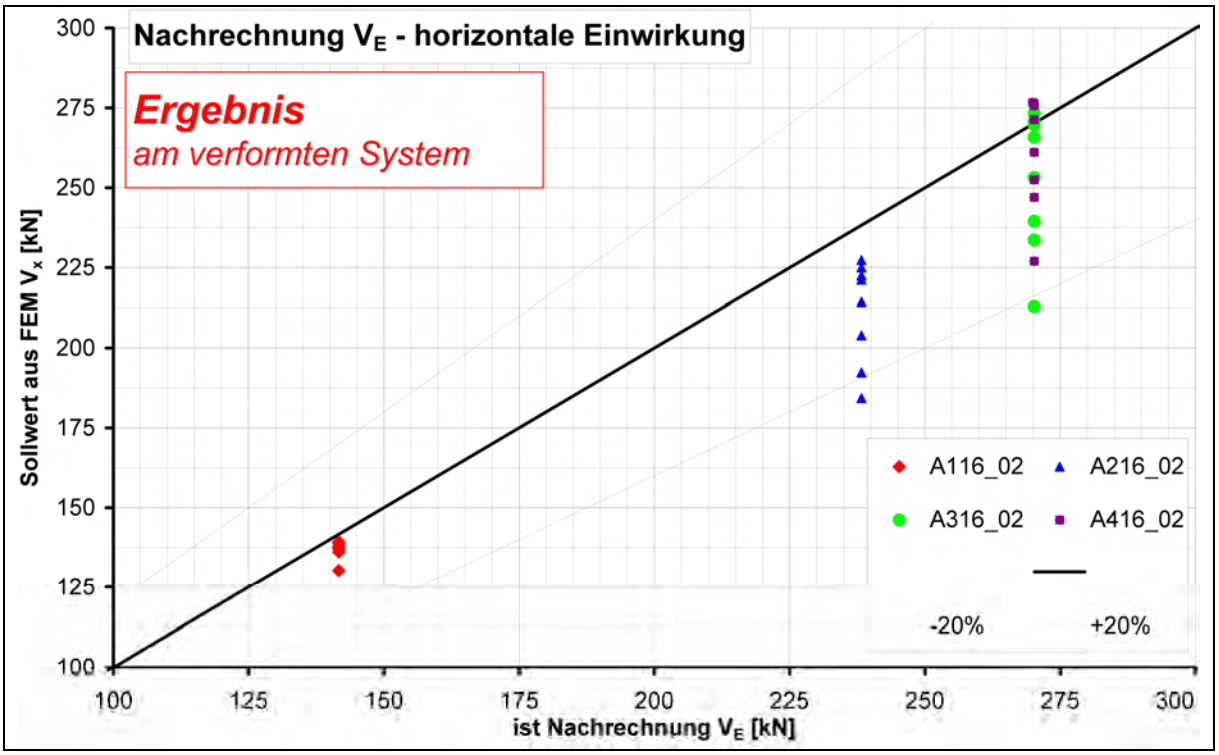


Abbildung 87 @Nachrechnung.xls für FEM – Ax16_02

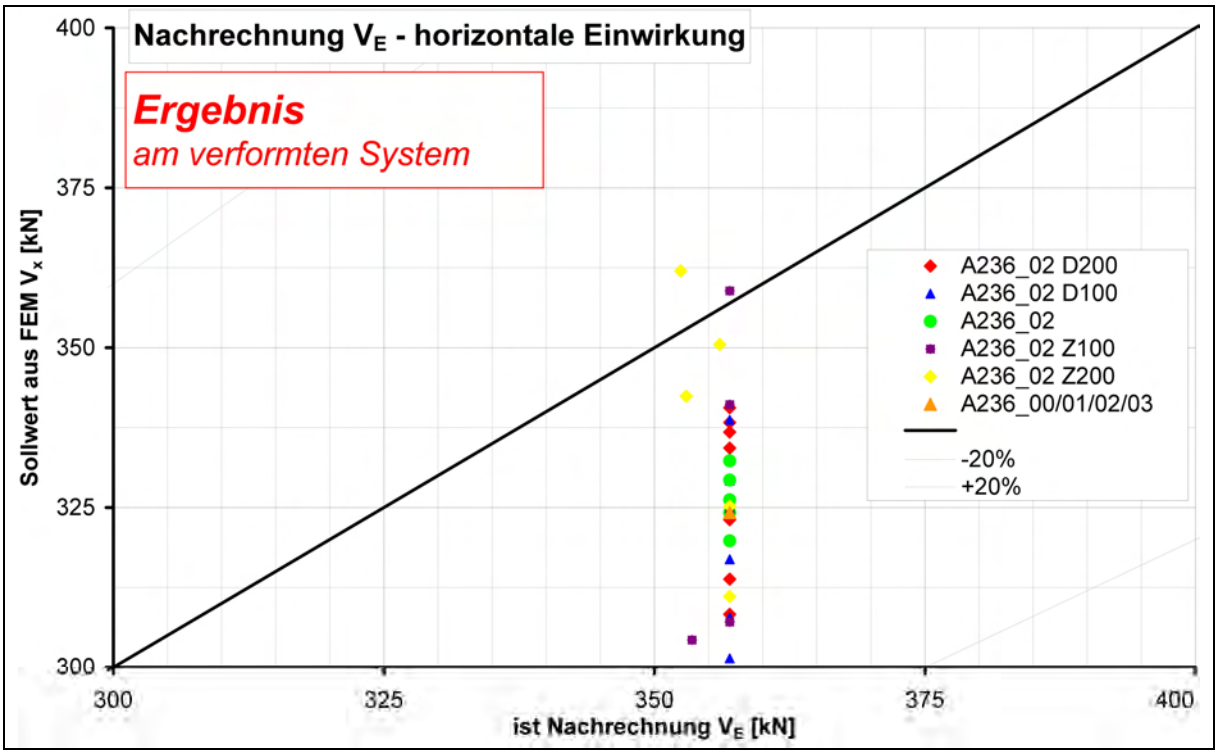


Abbildung 88 @Nachrechnung.xls für FEM – A236_02

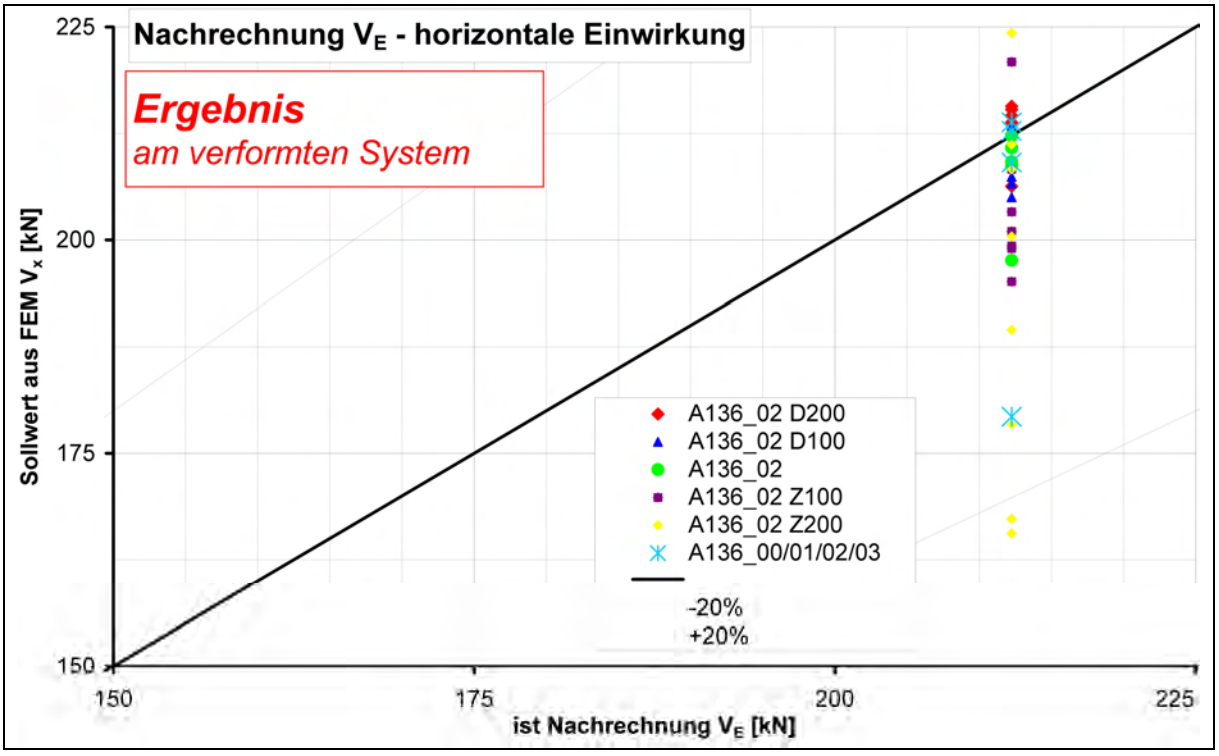


Abbildung 89 @Nachrechnung.xls für FEM – a136_02

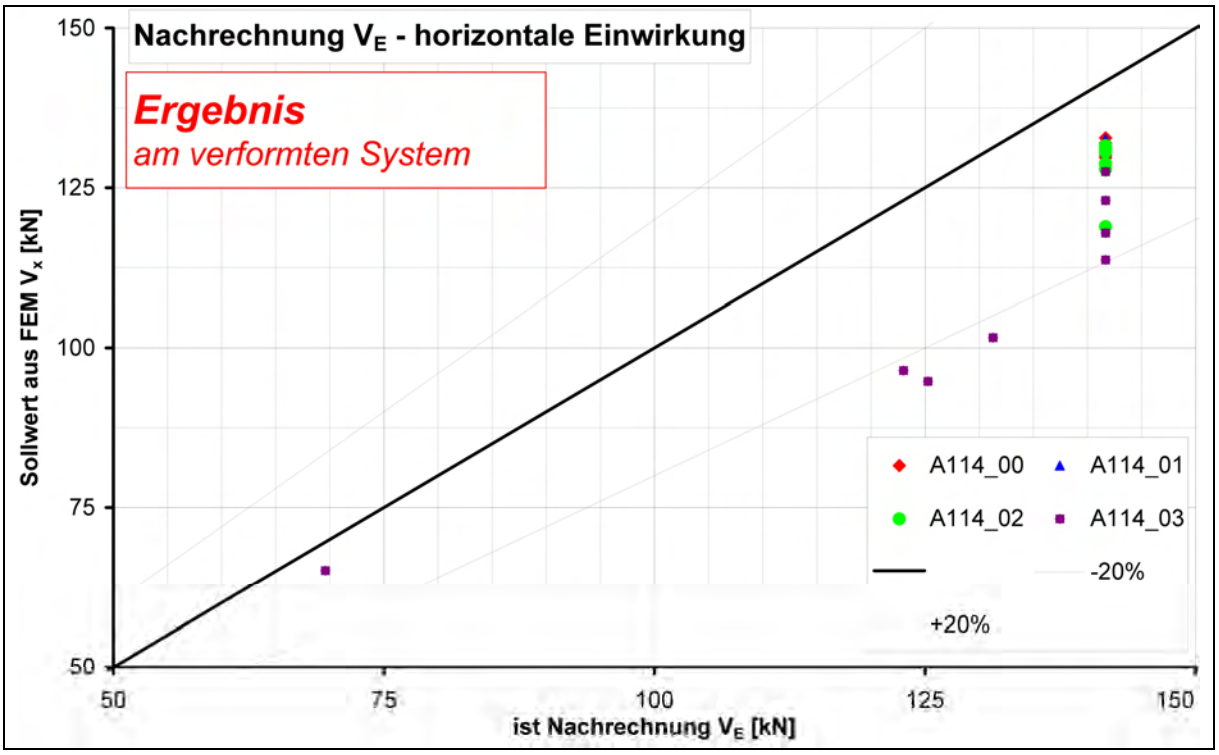


Abbildung 90 @Nachrechnung.xls für FEM – A114

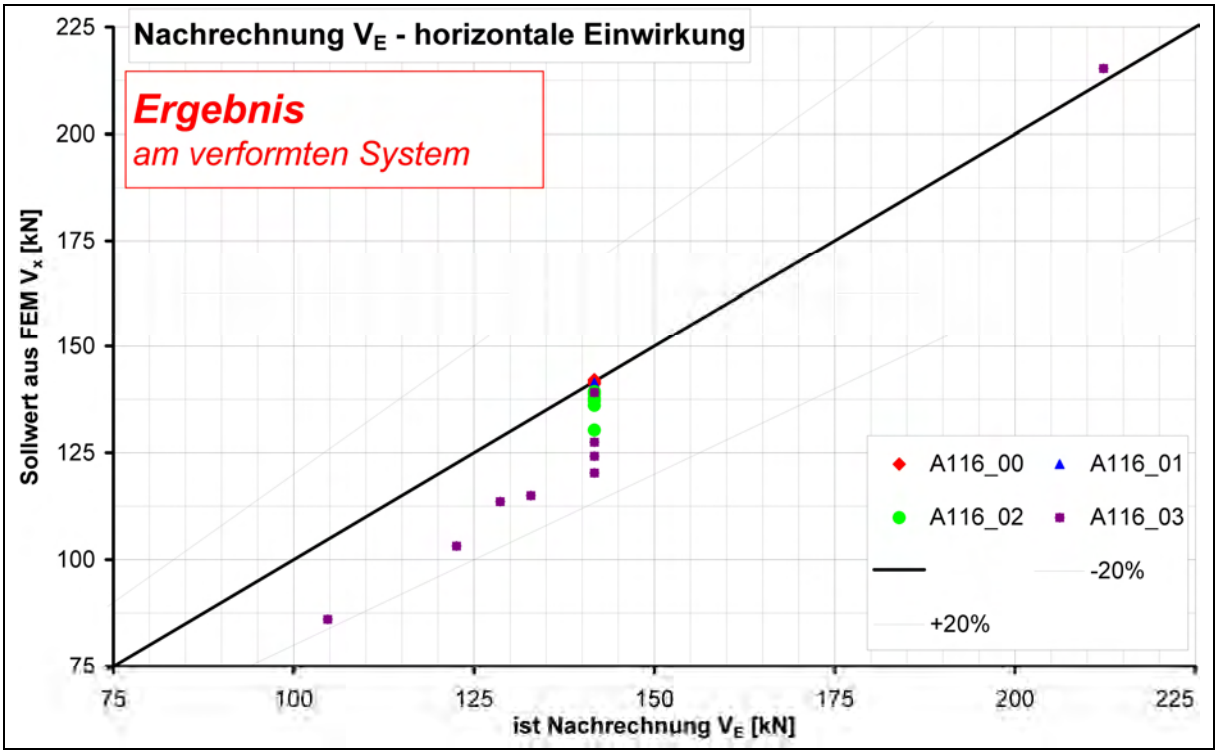


Abbildung 91 @Nachrechnung.xls für FEM – A116

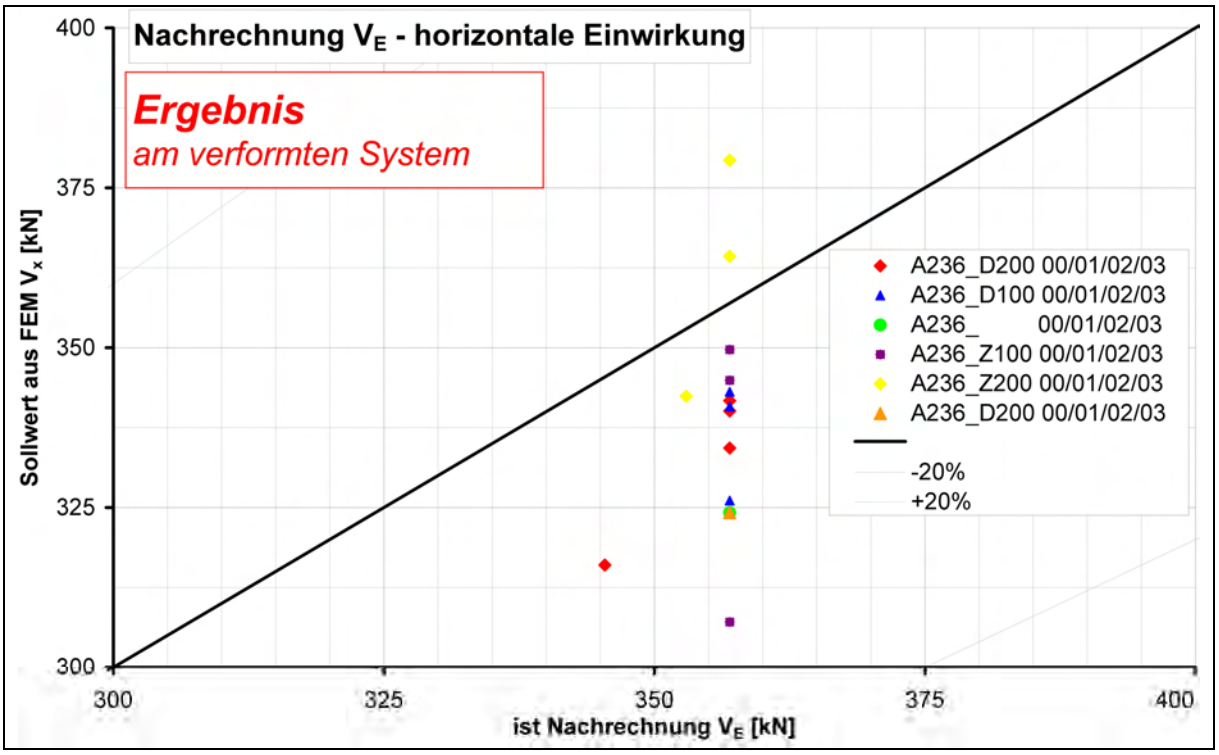


Abbildung 92 @Nachrechnung.xls für FEM – A236

A3.8 NACHRECHNUNG DER VERSUCHE

Eine Nachrechnung der Versuche nach dem gleichen Schema führt zu der in Abbildung 93 dargestellten Situation. Die Rechenwerte liegen erwartungsgemäß weit unterhalb der im Versuch ermittelten Werte. Dies ist systembedingt, da die Anpassung der 2D-Berechnung an die 3D- Versuche hier noch nicht erfolgt ist.

Nun können mit dem hier dargestellten Verfahren nur Versuch abgebildet werden, die nach dem Versagen vor der Stirn – R_s – noch eine Laststeigerung aufweisen. Nur für diese Versuche ist sichergestellt, dass ein „reines" Dübeltragverhalten vorliegt. Anmerkung: Das Vorhandensein von Reibung wird an späterer Stelle behandelt.

Entfallen müssen somit die Versuche: 6.1, 6.2, 7.1, 7.2, 8.1, 8.2, 9.1, 9.2,12.1, 12.2, 31.5, 31.6, 31.7 und 31.8.

Für alle Versuche fällt das Ergebnis der Nachrechnung geringer aus, als der im Experiment ermittelte Wert. In Abbildung 94 ist dies deutlich zu sehen. Nun war von vornherein klar, dass die auf einer 2dimensionalen Rechnung basierende Nachrechnung den 3dimensionalen Versuchen anzupassen ist. Zur Abschätzung dieser Anpassung sind in Abbildung 94 rote Hilfslinien eingetragen, für die die Sollwerte auf ½, ¼ usw. reduziert wurden. Die Ergebniswolke liegt zwar im Bereich der Linie ¼, jedoch ist die Ergebniswolke eindeutig mit einer anderen Steigung angeordnet.

Dies legt nahe, die bisher nicht angesetzte Reibung ebenfalls zu berücksichtigen.

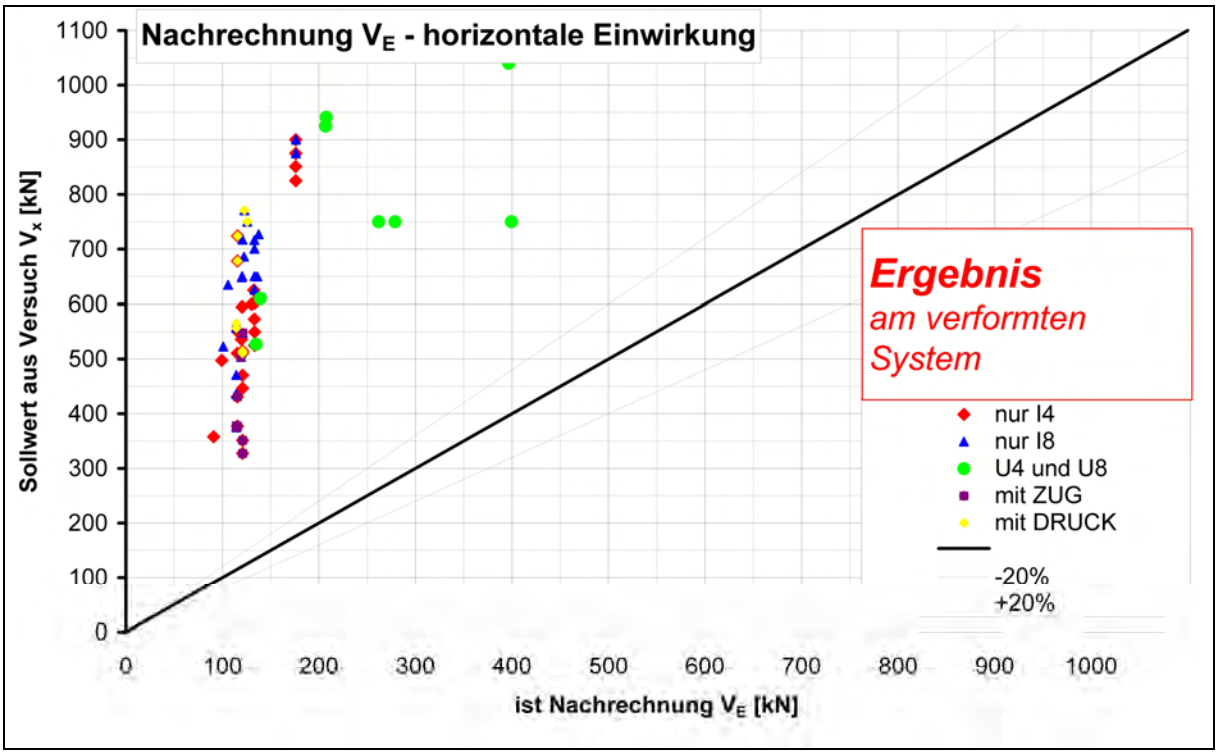


Abbildung 93 @Nachrechnung.xls für Versuche – alles

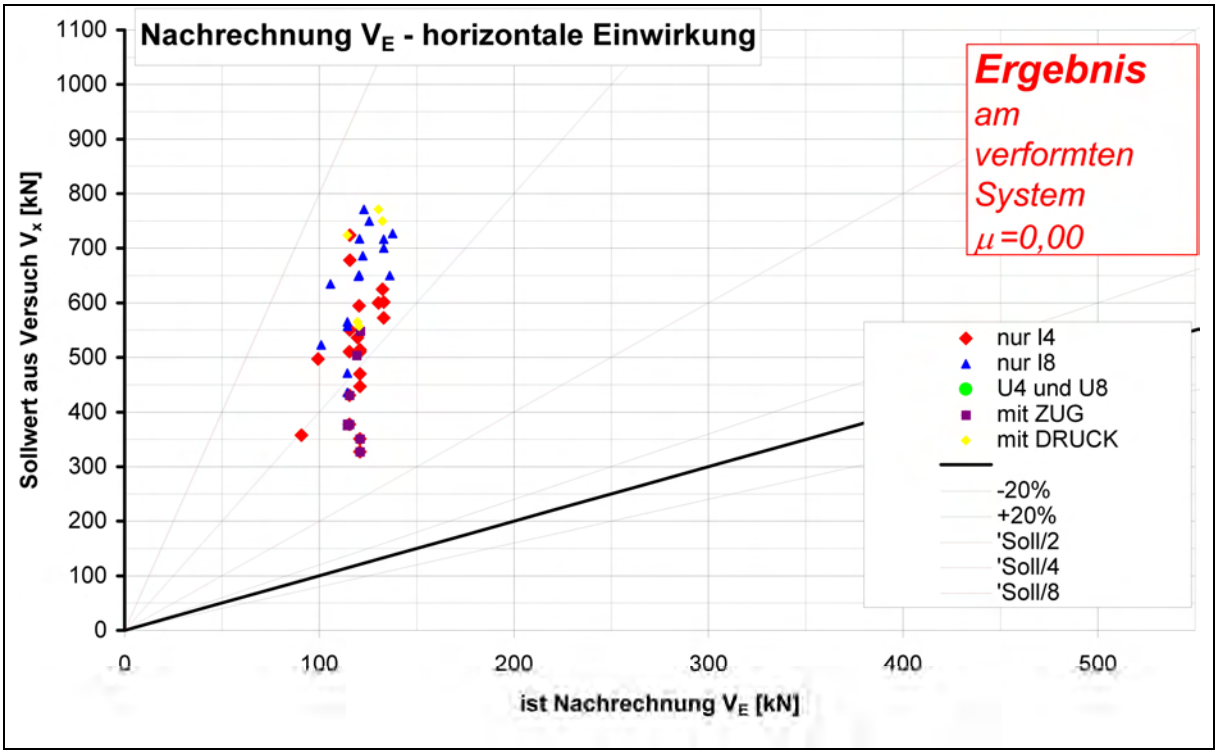


Abbildung 94 @Nachrechnung.xls für Versuche – nur gültige Versuche

A3.9 ÜBERTRAGEN AUF DIE VERSUCHE – KALIBRIERUNG AN DEN VERSUCHEN.

(Siehe 6.7)

A3.10 EIN RÜCKBLICK AUF DIE WERTE

Ausgehend von der Untersuchung der Verformungen, kann versucht werden, die Berechnung der Grundwerte nochmals zu korrigieren (neu zu fassen), um diese den Versuchswerten besser anpassen zu können. Bei der Betrachtung der Bilder (siehe Hauptarbeit 6.7 oder Abbildung 95.) fällt auf, dass die Versuche I4 deutlich näher am „Soll" liegen als die Versuche I8. Eigentlich sollten beide Versuchsgruppen in etwa die Gleiche Qualität zum Sollwert aufweisen. Es scheint somit eine systematische Unterbewertung der Versuche I8 vorzuliegen.

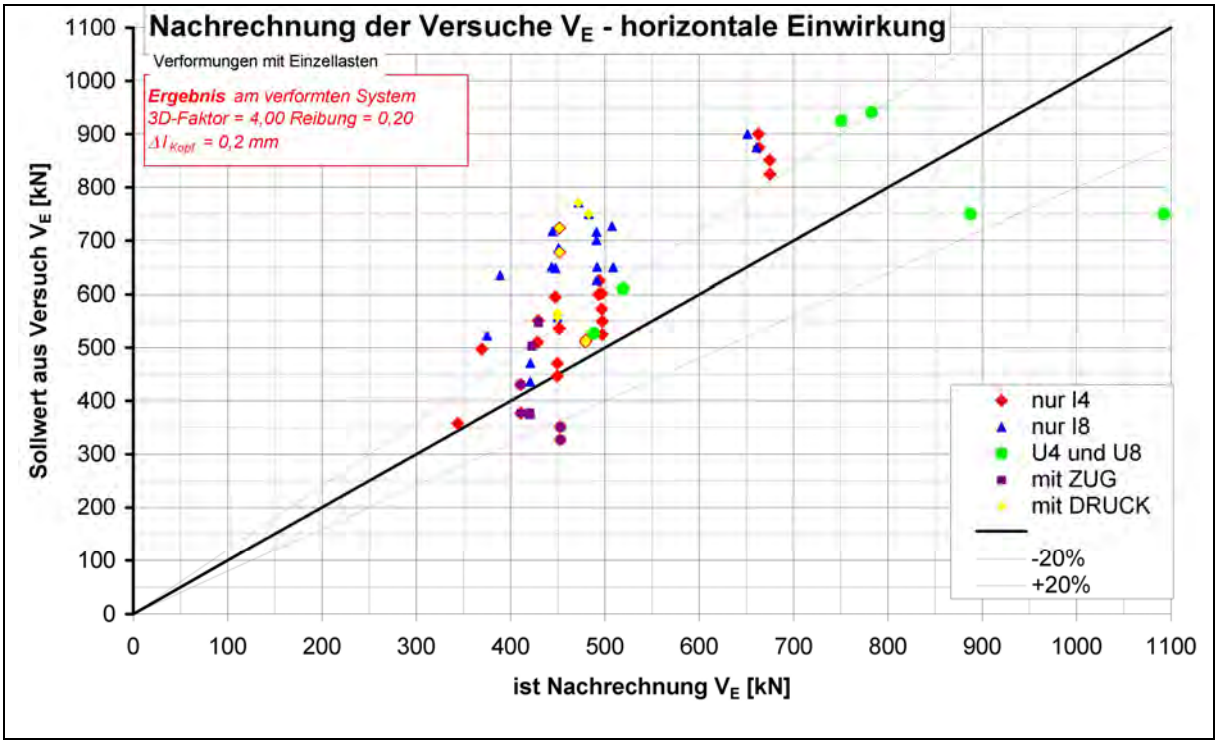


Abbildung 95: Nachrechnung für Versuche

Diese Unterbewertung kann in dem Ansatz der Steifigkeit wahrgenommen werden. Da in den Versuchen die Dübel mit einer recht groben Schweißnaht von ca. 18 bis 20 mm Nahthöhe angeschweißt sind, hat dies einen signifikanten Einfluss auf die Verformungen der relativ weichen Dübel der Bauart I8. Der in der FEM ermittelte Grenzwert der Dübelgrundtragfähigkeit kann somit korrigiert werden. Falls in der Praxis entsprechende Ausbildungen der Schweißnähte vorliegen. Besser erscheint

es allerdings eine fiktive Steifigkeit einzuführen. Prinzipiell tritt hier das Problem auf, dass die FEM-Nachrechnung nicht exakt die Geometrie der Einbauteile nachbildet. Die Ausbildung der Schweißnaht im Versuch beeinflusst die Steifigkeit des Dübels als Kragarm nicht unerheblich. Vergrößert man den Faktor 1,07 in der Gleichung für $R_{L,max}$ auf 1,4142 (also Wurzel(2)), so liegen alle Werte im 20% Bereich. Gewählt wird der auf 95% reduzierte Wert.

Grundwert R_{Lug}^{*}:

$$\boxed{R_L^* = \alpha_{3D}{}^2 \cdot 1{,}146 \cdot b_L \cdot \left(h_L + 4{,}2\right) \cdot f_c \le R_{L,\max}}$$

mit:

$$R_{L,\max} = \alpha_{3D}{}^2 \cdot 0{,}95 \cdot \sqrt{2} \cdot b_L \cdot f_c^{0,75} \cdot \left(EI_L^{'}\right)^{0,25} = \alpha_{3D}{}^2 \cdot 1{,}35 \cdot b_L \cdot f_c^{0,75} \cdot \left(EI_L^{'}\right)^{0,25}$$

$$I_L^{'} = {I_L}/{b_L} \quad \text{für Rechteck gilt: } I_L^{'} = {t_L^3}/{12}$$

Dieser abgeänderte Grundwert hat aber nur seinen Sinn, bei der Berücksichtigung von Schweißnähten, wie sie in den Versuchen eingesetzt wurden. Mit dieser Korrektur, und einer zusätzlichen Erhöhung des 3D-Faktors auf den Wert 4.5, ergibt sich ein harmonischeres Bild der Nachrechnung, siehe Abbildung 98. Eine Theoretisch denkbare Erhöhung der Ankersteifigkeit, infolge einer Verbundwirkung wirkt sich rechnerisch nicht auf das Ergebnis aus, und ist für große Ankerverformungen wohl eher unwahrscheinlich.

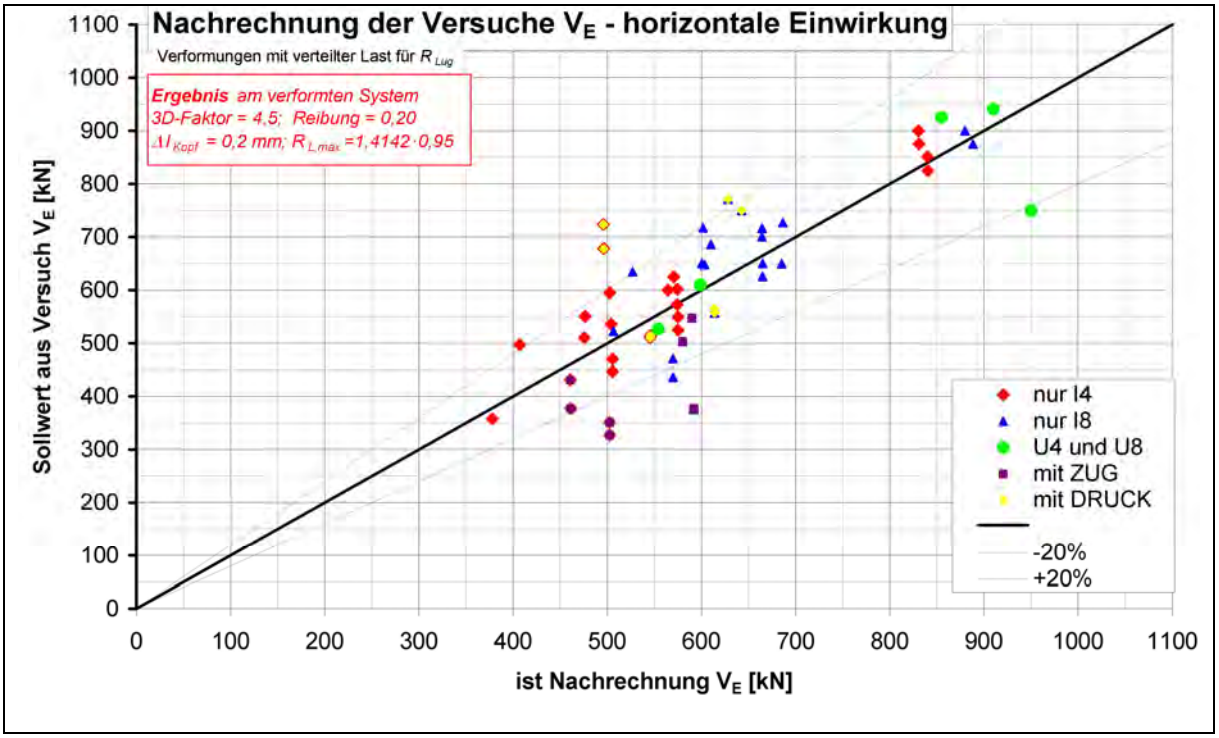


Abbildung 96: Nachrechnung für Versuche mit korrigiertem R_{Lug}^{*}.

A3.11 VERFORMUNGEN AM EINBAUTEIL - VERFORMUNGSBERECHNUNG

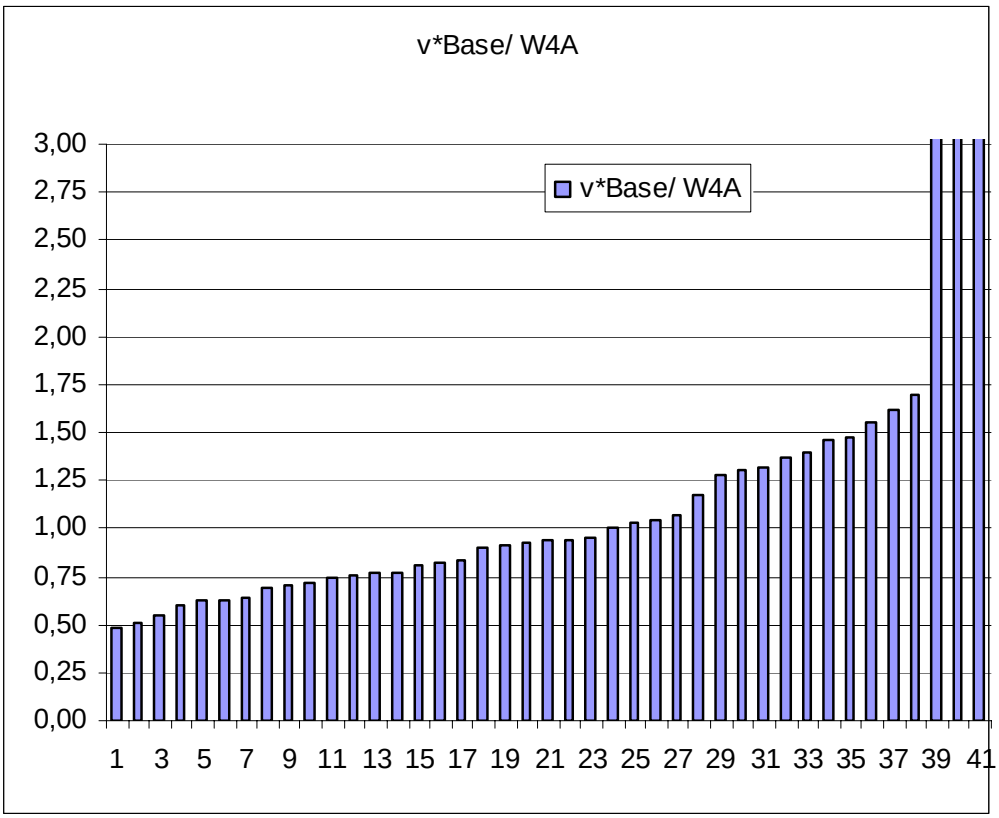
(siehe Kapitel 6.8)

		Punkt A im Versuch			**Punkt B im Versuch**		Rech-nung	Faktor	Faktor
		V_A	$W4_A$	E_0	V_B	$W4_B$	v^*_{Base}	$W4_A/v^*_{Base}$	$W4_B/v^*_{Base}$
		[kN]	[mm]	kN/mm	[kN]	[mm]	[mm]	[-]	[-]
3	2.1	598	0,416	1438	598	0,416	0,2849	0,68	0,68
4	2.2	624	0,384	1625	624	0,384	0,2849	0,74	0,74
5	3.2	648	0,429	1510	648	0,429	0,5636	1,31	1,31
6	3.3	665	0,446	1491	671	0,499	0,5689	1,28	1,14
9	5.1	482	0,309	1560	528	0,402	0,1995	0,65	0,50
10	5.2	582	0,419	1389	600	0,468	0,2039	0,49	0,44
11	6.1	626	0,455	1376	626	0,455	0,3433	0,75	0,75
12	6.2	610	0,38	1605	752	0,900	0,3581	0,94	0,40
13	7.1	836	0,615	1359	867	0,749	0,3720	0,60	0,50
14	7.2	749	0,727	1030	891	1,5	0,3720	0,51	0,25
15	8.1	682	0,517	1319	825	0,978	0,3721	0,72	0,38
16	8.2	572	0,403	1419	872	1,231	0,3722	0,92	0,30
17	9.1	382	0,144	2653	874	0,765	0,7086	4,92	0,93
18	9.2	471	0,439	1072	900	1,6	0,7087	1,61	0,44
21	11.1	744	0,420	1771	925	1,428	0,2654	0,63	0,19
22	11.2	541	0,291	1859	940	2,00	0,2659	0,91	0,13
23	12.1	778	0,323	2409	1030	1,734	0,4528	1,40	0,26
24	12.2	522	0,31	1684	751	0,87	0,4550	1,47	0,52
27	14.1	470	0,315	1492	534	0,596	0,2640	0,84	0,44
28	14.2	505	0,346	1460	594	0,512	0,2655	0,77	0,52

Tabelle 35a: Rechnerische und gemessene Verschiebungen am Modell Dübel

		Punkt A im Versuch			**Punkt B im Versuch**		Rech-nung	Faktor	Faktor
		V_A	$W4_A$	E_0	V_B	$W4_B$	v^*_{Base}	$W4_A/v^*_{Base}$	$W4_B/v^*_{Base}$
		[kN]	[mm]	kN/mm	[kN]	[mm]	[mm]	[-]	[-]
29	15.1	507	0,385	1317	570	0,691	0,5039	1,31	0,73
30	15.2	489	0,347	1409	622	0,559	0,5064	1,46	0,91
33	17.1	319	0,270	1181	355	0,376	0,2171	0,80	0,58
34	17.2	350	0,299	1171	403	0,53	0,2302	0,77	0,43
35	18.1	466	0,366	1273	504	0,467	0,4319	1,18	0,92
36	18.2	547	0,498	1098	548	0,52	0,4503	0,90	0,87
37	19.1	402	0,268	1500	402	0,268	0,2559	0,95	0,95
38	19.2	355	0,244	1455	370	0,298	0,2560	1,05	0,86
39	20.1	425	0,313	1358	499	0,442	0,2559	0,82	0,58
40	20.2	520	0,467	1113	548	0,55	0,2562	0,55	0,47
43	22.1	313	0,377	830	349	0,620	0,2666	0,71	0,43
44	22.2	230	0,26	884	326	0,576	0,2666	1,03	0,46
45	23.1	383	0,283	1353	440	0,480	0,2665	0,94	0,56
46	23.2	422	0,428	986	451	0,785	0,2666	0,62	0,34
49	25.1	326	0,101	3228	326	0,101	0,5009	4,96	4,96
50	25.2	498	0,326	1528	528	0,404	0,5081	1,56	1,26
52	26.2	170	0,067	2537	626	0,509	0,5126	7,65	1,01
55	28.1	340	0,354	960	376	0,482	0,4831	1,36	1,00
56	28.2	300	0,286	1049	373	0,541	0,4831	1,69	0,89
57	29.1	413	0,483	855	470	0,762	0,4826	1,00	0,63
58	29.2	395	0,453	872	435	0,589	0,4827	1,07	0,82

Tabelle 35b: Rechnerische und gemessene Verschiebungen am Modell Dübel



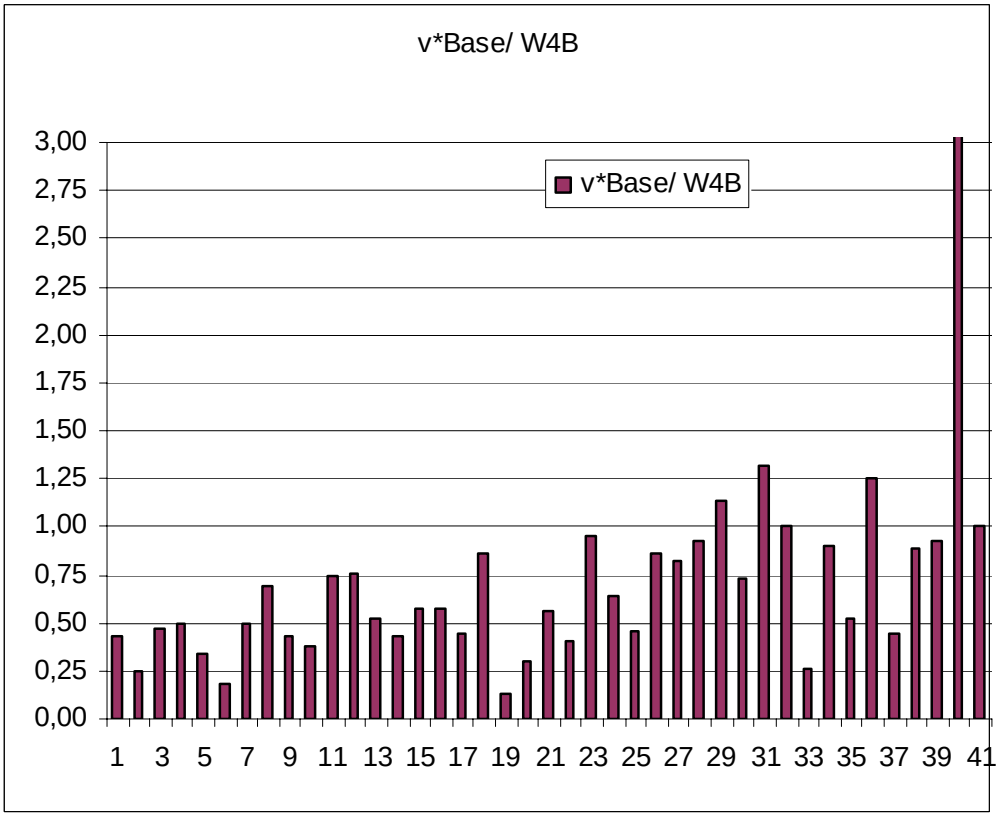
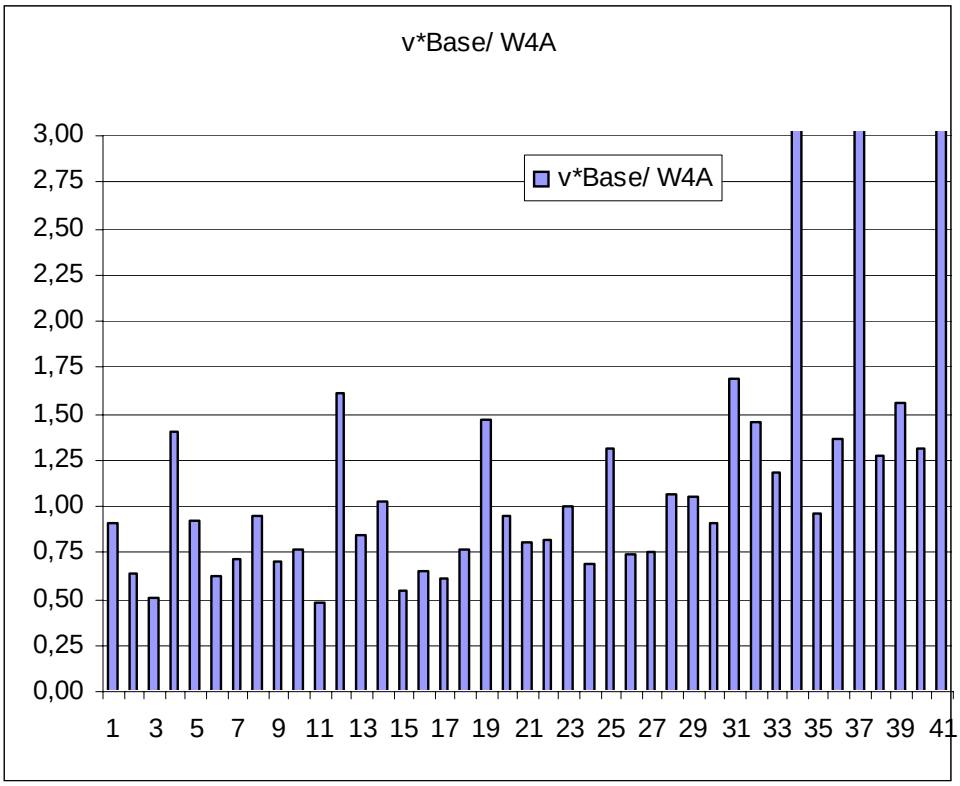


Abbildung 97: Vergleich der Verschiebungen geordnet nach Punkt A



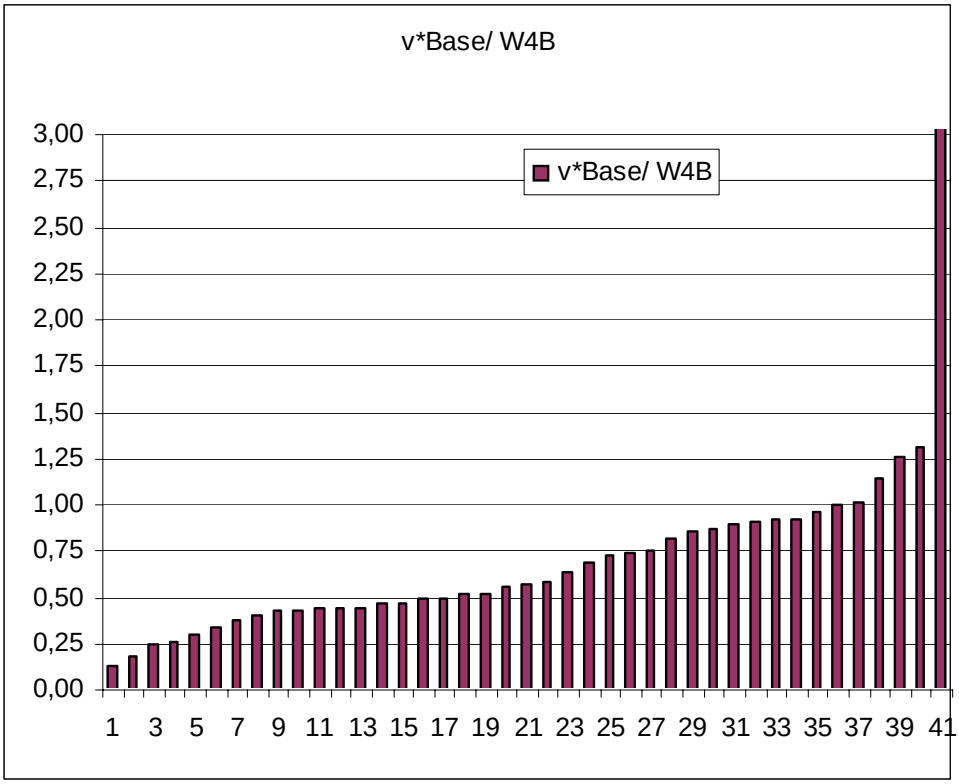


Abbildung 98: Vergleich der Verschiebungen geordnet nach Punkt B

A4 MODELL BASE – STANZE

Am Modell BASE wird die Lastübertragung vor der Stirnplatte untersucht. Als Arbeitstitel trägt dieses Modell den Namen Stanze, da im Prinzip ein Betonbereich herausgestanzt wird. Das Vorgehen ist wieder analog zum Vorgehen bei der Lastübertragung vor dem Dübel – Modell LUG.

Zuerst werden für eine horizontal geführte „Stanze" die Grundwerte ermittelt. Dies entspricht wieder dem Modell mit unendlich steifem Zuganker. In einem zweiten Schritt wird dann die horizontale Führung durch einen Anker, mit realer Ankersteifigkeit, ersetzt um den Einfluss der Ankerverformung ermitteln zu können.

Kontaktflächen sind lediglich vor der Stirn und unter der Grundplatte im vorderen Bereich angeordnet. Im hinteren Bereich findet keine Lastübertragung statt, daher wird hier auf die Modellierung von Kontaktflächen verzichtet. Alle Kontaktflächen sind nur mit einer normalen Steifigkeit versehen, tangentiale Kräfte werden nicht übertragen. Zum Einsatz kommt das Materialgesetz „2D Interface" mit k_{nn} = 2E+08 MN/m³ und k_{tt} = 10 MN/m³ alle anderen Parameter werden zu Null gesetzt.

Parameter:

- Stirneinbindetiefe h_{Base} mit 5, 10, 20, 30, 40, 50, 70 und 100 mm
- Betonfestigkeit f_c mit 18, 28, 38, 48, 58 und 68 N/mm²
- Ankersteifigkeiten *EA/L*
- Exzentrizität e_V der Last V_E mit 10, 20, 30, 40, 70, 100, 120 und 170 mm

Die Stahlfestigkeit wird im gesamten Einbauteil mit einem E-Modul von E = 210000 Mpa bzw. N/mm² angesetzt. Die Querdehnzahl wird mit μ = 0.3 und die Bruchspannung σ_Y beträgt 462 N/mm² ohne Nachverfestigung.

Beton: siehe oben.

A4.1 GRUNDWERTE AM MODELL BASE – UNENDLICH STEIFER ZUGANKER

Im ersten Schritt wird ein horizontal verschiebliches System untersucht. Das System dient der Ermittlung der Grundwerte am Modell ohne Verdrehungen der Grundplatte. Es kann keine Verkantung des Stahlblocks geben, da dieser an der Oberseite horizontal geführt wird. Eine Verbiegung im Stahlblock selber ist aufgrund der Steifigkeitsverhältnisse vernachlässigbar.

Eine Übersicht über die durchgeführten Rechnungen zeigt Tabelle 36. Die Berechnungen werden mit dem Buchstaben „S“ für Stanze bezeichnet und dann durchnummeriert. Die Berechnungen mit unendlichsteifen Anker – kurz horizontal – genannt, da nur eine horizontale Bewegung im Einbauteil zugelassen wird. Die Benennung kommt mit 3 Stellen aus, das Schema ist immer Sxy.

- S steht für Stanze
- x steht für die Betonfestigkeit
  - 0 für f_c = 18 N/mm² 1 für f_c = 28 N/mm²
  - 2 für f_c = 38 N/mm² 3 für f_c = 48 N/mm²
  - 4 für f_c = 58 N/mm² 5 für f_c = 68 N/mm²
- y bezeichnet die Einbindetiefe, also Dicke der Grundplatte
  - 1 für h_{Base} = 5 mm 2 für h_{Base} = 10 mm
  - 3 für h_{Base} = 20 mm 4 für h_{Base} = 30 mm
  - 5 für h_{Base} = 40 mm 6 für h_{Base} = 50 mm
  - 7 für h_{Base} = 70 mm 8 für h_{Base} = 100 mm

	f_c [N/mm²]					
h [mm]	18	28	38	48	58	68
5		S11	S21	S31		
10		S12	S22	S32		
20	**S03**	**S13**	**S23**	**S33**	**S43**	**S53**
30		S14	S24	S34		
40		S15	S25	S35		
50	**S06**	**S16**	**S26**	**S36**	**S46**	**S56**
70		S17	S27	S37		
100		S18	S28	S38		

Tabelle 36: Benennung der Rechnungen Stanze horizontal

A4.1.1 LAGERUNG

Das Betonsystem ist an der unteren Betonkante in Y-Richtung gelagert, die linke Kante ist in X-Richtung gelagert. Die Beanspruchung wird verformungsgesteuert an der rechten Stahlkante in negativer X-Richtung punktweise aufgebracht. Die Schubbeanspruchung greift auf der Höhe Oberkante Grundplatte an, belastet wird der Punkt (-15 cm/-0 cm). In diesem Punkt wird dann auch die belastende Kraft als „Compact Reaction“ beobachtet. Generell wird an dieser Stelle ein steiferer Stahl mit 50 cm Breite angeordnet, um die Spitzenwerte der beobachteten Spannungen an diesem Punkt optisch zu verstecken.

Für das ganze übrige System wird eine Dicke von 10 cm angesetzt. Prinzipiell ist das Modell wie das Modell Dübel aufgebaut. Für die Berechnung „horizontal“ ist der Block mit 2 Lagerpunkten A10 und A11 horizontal geführt. Kontaktflächen werden an der Stirnseite und unter der Grundplatte bis X=0 angeordnet. Der hintere Teil der Grundplatte hat keinen Kontakt zum Beton.

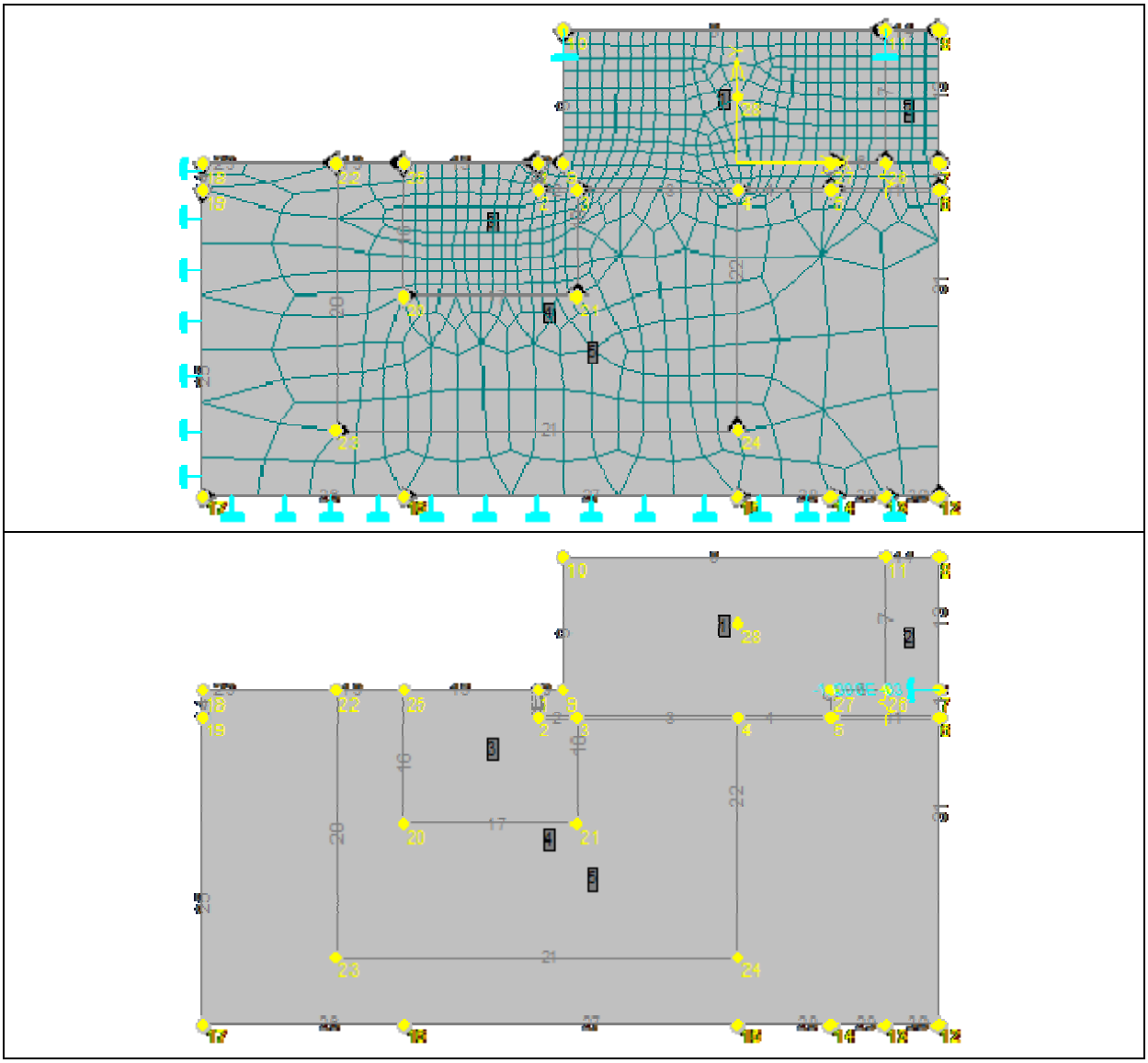


Abbildung 99: System, Geometrie, Lagerung und Belastung

A4.1.2 AUSWERTUNG STANZE HORIZONTAL

(siehe 6.10.2.1)

A4.2 HERLEITUNG DER FORMELN

A4.2.1 LAST VOR DER STIRNSEITE – R*BASE

Die Bruchlasten und Verschiebungen für das System Stanze horizontal werden in Tabelle 37 zusammengestellt. In Abbildung 100 ist dies grafisch dargestellt. Die lineare Entwicklung der Bruchlast über die Einbindetiefe der genauer untersuchten Betonfestigkeiten f_c = 28, 38 und 48 N/mm², wird lediglich für die Systeme mit 30 und 40 mm Einbindetiefe negiert. Dies scheint auf einen systematischen Fehler zu verweisen, ein Ändern der Netzgeometrie variiert die Ergebnisse für diese Systeme ohne jedoch die erforderlichen Werte für die lineare Entwicklung ganz zu erreichen. Im Weiteren wird dann doch von der Gültigkeit der linearen Entwicklung ausgegangen.

Damit ist lediglich die Steigung der Geraden zu definieren. Die Schnittpunkte mit der x-Achse können hinreichend genau mit einem einzigen Wert (-4,1) definiert werden. Für die Definition des Systems Dübel wurde hier ein Wert von –4,2 ermittelt, der hinreichend genau auch hier übernommen werden kann.

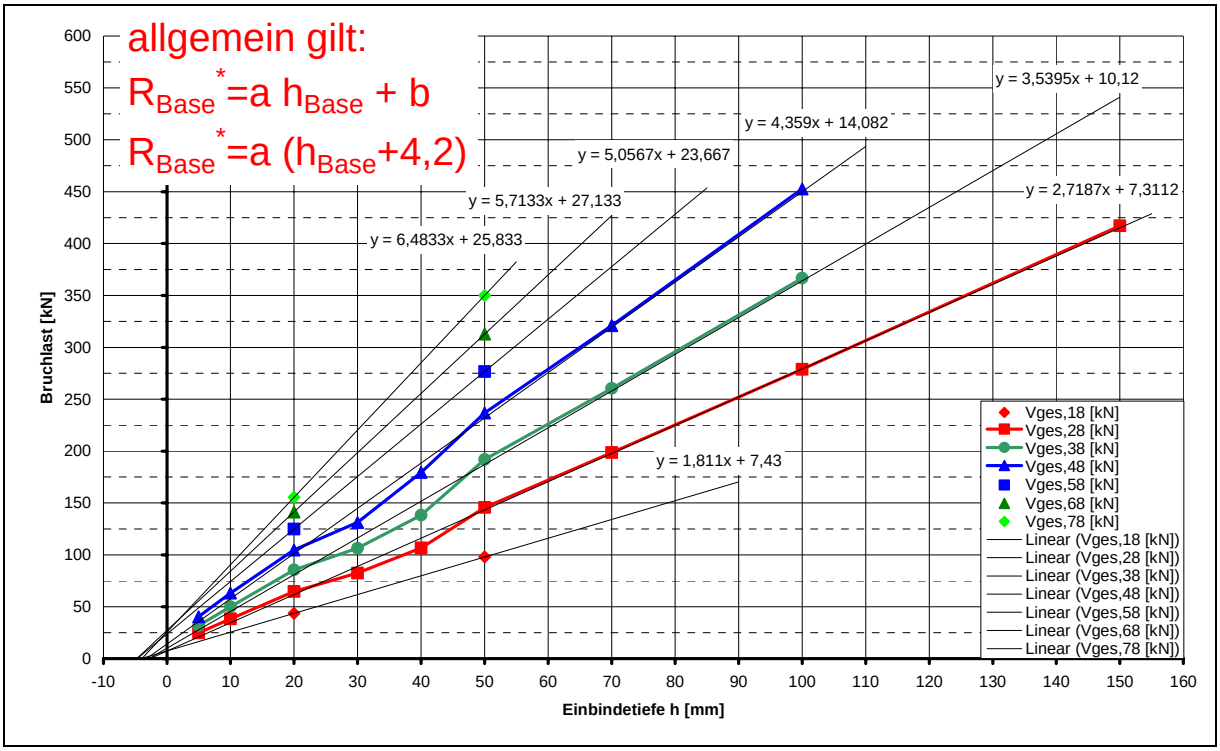


Abbildung 100: Bruchlasten für "Stanze horizontal" mit Geradengleichungen

Es gilt somit:

$$R^*_{Base} = a_i \cdot \left(h_{Base} + 4{,}2\right) \text{ oder } R^*_{Base} = a_i \cdot h_{Base} + b_i$$
$$\text{mit} \quad a_i = f_{(f_c)} \quad \text{und} \quad b_i = f_{(f_c)} \qquad (4.1)$$

Auswertung "Stanze H"										Geradengleichung			
Versuch	f_c [N/mm²]	b [mm]	h [mm]	ux Last [mm]	maxFx Last [kN]	ux Anker [mm]	uy Anker [mm]	ux Stirn [mm]	uy Stirn [mm]	f_c	a	b	X-Achse
							$V_{ges,18}$ [kN]	$\sigma_{u,18}$ [N/mm²]					
Stanze 03	18	100	20	0,14000	43,7	0,13920	-0,00015	0,12680	0,00304	18	1,811	7,430	-4,103
Stanze 06	18	100	50	0,22000	98,0	0,21830	-0,00005	0,20690	-0,00115				
							$V_{ges,28}$ [kN]	$\sigma_{u,28}$ [N/mm²]					
Stanze 11	28	100	5	0,08000	24,8	0,07951	-0,00012	0,06380	0,01519				
Stanze 12	28	100	10	0,10000	38,3	0,09925	-0,00018	0,08133	0,01419				
Stanze 13	28	100	20	0,18000	64,8	0,17880	-0,00022	0,16050	0,00422	28	2,695	10,867	-4,033
Stanze 14	28	100	30	0,22000	82,5	0,21850	-0,00017	0,20300	-0,00236				
Stanze 15	28	100	40	0,22000	106,7	0,21810	-0,00010	0,20310	-0,00349				
Stanze 16	28	100	50	0,28000	145,6	0,27750	0,00000	0,26060	-0,00176				
Stanze 17	28	100	70	0,28000	198,6	0,27660	0,00059	0,25960	-0,00555				
Stanze 18	28	100	100	0,32000	278,8	0,00000	0,00196	0,29710	-0,01232				
Stanze 19	28	100	150	0,36000	417,1	0,00000	0,00567	0,33210	-0,02597				
							$V_{ges,38}$ [kN]	$\sigma_{u,38}$ [N/mm²]					
Stanze 21	38	100	5	0,08000	31,8	0,07937	-0,00016	0,05926	0,01748				
Stanze 22	38	100	10	0,10000	50,2	0,09902	-0,00024	0,07690	0,01432				
Stanze 23	38	100	20	0,22000	85,6	0,21840	-0,00027	0,19420	0,00529	38	3,546	14,683	-4,140
Stanze 24	38	100	30	0,22000	106,5	0,21800	-0,00020	0,19880	-0,00392				
Stanze 25	38	100	40	0,28000	138,2	0,27750	-0,00014	0,25770	-0,00392				
Stanze 26	38	100	50	0,32000	192,0	0,31670	0,00001	0,29460	-0,00276				
Stanze 27	38	100	70	0,34000	260,4	0,33560	0,00076	0,31310	-0,00732				
Stanze 28	38	100	100	0,38000	366,6	0,37380	0,00257	0,34990	-0,01600				
							$V_{ges,48}$ [kN]	$\sigma_{u,48}$ [N/mm²]					
Stanze 31	48	100	5	0,10000	40,3	0,09920	-0,00019	0,07342	0,02455				
Stanze 32	48	100	10	0,12000	63,2	0,11880	-0,00029	0,09089	0,01830				
Stanze 33	48	100	20	0,26000	104,8	0,25800	-0,00032	0,22840	0,00624	48	4,400	16,800	-3,818
Stanze 34	48	100	30	0,32000	131,2	0,31760	-0,00026	0,29220	-0,00319				
Stanze 35	48	100	40	0,32000	179,5	0,31680	-0,00017	0,29060	-0,00380				
Stanze 36	48	100	50	0,36000	236,8	0,35590	0,00001	0,32840	-0,00308				
Stanze 37	48	100	70	0,38000	320,9	0,37450	0,00096	0,34700	-0,00949				
Stanze 38	48	100	100	0,44000	452,6	0,00000	0,00314	0,40260	-0,01942				
							$V_{ges,58}$ [kN]	$\sigma_{u,58}$ [N/mm²]					
Stanze 43	58	100	20	0,28000	124,8	0,00000	-0,00038	0,24310	0,00621	58	5,057	23,667	-4,680
Stanze 46	58	100	50	0,42000	276,5	0,00000	-0,00007	0,38360	-0,00387				
							$V_{ges,68}$ [kN]	$\sigma_{u,68}$ [N/mm²]					
Stanze 53	68	100	20	0,30000	141,4	0,29730	-0,00043	0,25860	0,00708	68	5,713	27,133	-4,749
Stanze 56	68	100	50	0,40000	312,8	0,39450	0,00000	0,35930	-0,00492				

Tabelle 37: Zusammenstellung der Werte „horizontal“

Im Weiteren werden a_i und bi ermittelt und diskutiert. Die Umrechnung [kN] auf [N] ist für die Werte a_i und b_i nicht enthalten.

Geradengleichung

fc	a	b	X-Achse
18	1,811	7,430	-4,103
28	2,695	10,867	-4,033
38	3,546	14,683	-4,140
48	4,400	16,800	-3,818
58	5,057	23,667	-4,680
68	5,713	27,133	-4,749

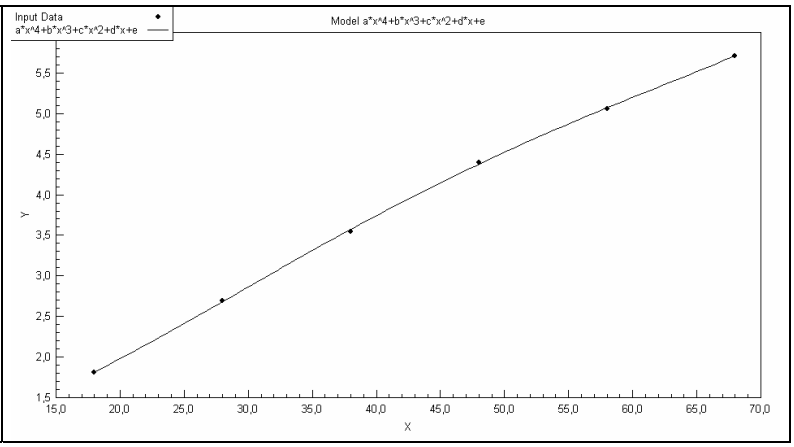


Abbildung 101: Geradensteigung a über f_c

Rank	Model	StdError	Residual Sum	Residual Avg.	RSS	R^2	Ra^2
1	**a*x^4+b*x^3+c*x^2+d*x+e**	**0,039812258**	**8,08242E-14**	**1,34707E-14**	**0,001585016**	**0,999853397**	**0,999266984**
2	Fourth order inverse logarithm	0,04353114	-3,49054E-13	-5,81757E-14	0,00189496	0,999824729	0,999123645
3	Fourth order inverse polynomial	0,044931732	-1,33227E-14	-2,22045E-15	0,002018861	0,999813269	0,999066345
4	Third order inverse logarithm	0,031861872	1,68754E-14	2,81256E-15	0,002030358	0,999812206	0,999530514
5	Fourth order logarithm	0,045315068	-8,88178E-16	-1,4803E-16	0,002053455	0,999810069	0,999050346
6	Third order logarithm	0,032393791	-1,06581E-14	-1,77636E-15	0,002098715	0,999805883	0,999514707
7	Third order inverse polynomial	0,033102216	-1,64313E-14	-2,73855E-15	0,002191513	0,9997973	0,999493249
8	**a*x^3+b*x^2+c*x+d**	**0,0353504**	**-1,40332E-13**	**-2,33887E-14**	**0,002499302**	**0,999768831**	**0,999422079**
9	x/(a+b*x-c*x^2)	0,0331587	0,003427207	0,000571201	0,003298498	0,999694911	0,999491519
10	Second order logarithm	0,033497487	-3,55271E-15	-5,92119E-16	0,003366245	0,999688645	0,999481075
11	a*x^2+b*x+c	0,034519836	1,9984E-15	3,33067E-16	0,003574857	0,99966935	0,999448916
12	x^a*exp(b-c*x)	0,035111455	0,00173089	0,000288482	0,003698443	0,999657919	0,999429865
13	a*b^x*x^c	0,035111455	0,00173089	0,000288482	0,003698443	0,999657919	0,999429865
14	a*x^b*exp(-c*x)	0,035111455	0,00173089	0,000288482	0,003698443	0,999657919	0,999429865
15	x/(a+b*x+c*sqr(x))	0,035696053	0,002547841	0,00042464	0,003822625	0,999646433	0,999410722
16	**a*x/(b+x)**	**0,037475291**	**-0,009440375**	**-0,001573396**	**0,00561759**	**0,999480411**	**0,999350514**
17	x/(a*x+b)	0,037475291	-0,009440375	-0,001573396	0,00561759	0,999480411	0,999350514
18	a*b*x/(1+b*x)	0,037475291	-0,009440375	-0,001573396	0,00561759	0,999480411	0,999350514
19	exp(a+b/x+c*log(x))	0,046975221	0,000543049	9,05081E-05	0,006620014	0,999387693	0,998979489
20	a*b^(1/x)*x^c	0,046975221	0,000543049	9,05082E-05	0,006620014	0,999387693	0,998979489
21	Second order inverse logarithm	0,049281467	-1,86517E-14	-3,10862E-15	0,007285989	0,999326095	0,998876825
22	a+b*x+c/x^2	0,074127894	-2,66454E-15	-4,44089E-16	0,016484834	0,998475264	0,997458773
23	exp(a+b*x+c*x^2)	0,074734359	-0,007999608	-0,001333268	0,016755673	0,998450213	0,997417022
24	a*exp((-(x-b)^2)/(2*c^2))	0,074734359	-0,007999608	-0,001333268	0,016755673	0,998450213	0,997417022
25	a*x^b	0,068935862	-0,016607171	-0,002767862	0,019008612	0,998241832	0,99780229
26	a*(1+x)^b	0,075499873	-0,018879977	-0,003146663	0,022800923	0,997891068	0,997363836
27	Second order inverse polynomial	0,124525191	2,08722E-14	3,4787E-15	0,04651957	0,995697254	0,992828756
28	**a*x+b**	**0,108717414**	**2,04281E-14**	**3,40468E-15**	**0,047277905**	**0,995627113**	**0,994533891**
29	**a*(x-b)**	**0,108717414**	**4,44089E-16**	**7,40149E-17**	**0,047277905**	**0,995627113**	**0,994533891**
30	a*x^(b/x)	0,127757404	0,043742213	0,007290369	0,065287817	0,993961317	0,992451647
31	a/(1+b*x+c*x^2)	0,18828638	-0,044194532	-0,007365755	0,106355282	0,990162854	0,983604756
32	1/(a+b*x+c*x^2)	0,18828638	-0,04419452	-0,007365753	0,106355282	0,990162854	0,983604756
33	First order logarithm	0,221619119	6,21725E-15	1,03621E-15	0,196460135	0,981828763	0,977285954
34	a+b*log(x)	0,221619119	6,21725E-15	1,03621E-15	0,196460135	0,981828763	0,977285954
35	a*exp(b/x)	0,243816132	0,092666509	0,015444418	0,237785225	0,978006471	0,972508089
36	1/(a+b*log(x))	0,286661342	-0,124344401	-0,020724067	0,328698901	0,969597569	0,961996961
37	a*exp(b*x)	0,338752443	-0,075587713	-0,012597952	0,459012871	0,957544406	0,946930508
38	a*b^x	0,338752443	-0,075587712	-0,012597952	0,459012871	0,957544406	0,946930508
39	exp(a+b*x)	0,338752443	-0,075587716	-0,012597953	0,459012871	0,957544406	0,946930508
40	a*x^(b*x)	0,39176519	-0,082111907	-0,013685318	0,613919857	0,943216555	0,929020694
41	First order inverse logarithm	0,400492072	-3,9968E-14	-6,66134E-15	0,641575601	0,940658585	0,925823232
42	1/(a+b*x)	0,521197558	-0,171864655	-0,028644109	1,086587577	0,89949798	0,874372474
43	a/(1+b*x)	0,521197558	-0,171864712	-0,028644119	1,086587577	0,89949798	0,874372474
44	First order inverse polynomial	0,52533205	4,44089E-16	7,40149E-17	1,103895049	0,897897155	0,872371444
45	a+b/x	0,52533205	4,44089E-16	7,40149E-17	1,103895049	0,897897155	0,872371444
46	x^a	0,777314824	-1,114796006	-0,185799334	3,021091677	0,720569401	0,664683281

Tabelle 38: Gleichungen für Geradensteigung mit $R^2 > 0{,}5$

In Abbildung 101 sind die oben ermittelten Geradensteigungen *a* über der Betonfestigkeit aufgetragen. Zur Orientierung wird der y-Achsenabschnitt b und die Umrechnung auf den x-Achsenschnitt ebenfalls gelistet. Mögliche Gleichungen zur Beschreibung dieser Werte sind in Tabelle 38 gelistet. Die beste Übereinstimmung liefert ein Polynom 4ten Grades (f_c^4), die erforderlichen 5 Koeffizienten *a, b, c, d,* und *e* machen die Handhabung aber unnötig kompliziert. Somit wird der Vorzug einem Polynom 3ten Grades (f_c^3) gegeben, das bei den Qualitätskriterien R^2 und RSS kaum zurückbleibt. Ein noch erheblich einfacherer Funktionsansatz findet sich auf Rang 16, der ebenfalls genau genug ist. Lineare Ansätze landen dann auf Rang 28 und 29, und weisen dann schon einen erheblichen Standardfehler (StdError) auf. Die Qualität der Ansätze macht sich hauptsächlich bei der Untersuchung höherer Betonfestigkeiten bemerkbar.

Somit werden für die Beschreibung der Geradensteigung *a* die Ansätze a_1, a_2 und a_3 angeboten. Wobei der Ansatz a_3 maximal bis zu einer Betonfestigkeit $f_c = 48$ /mm² angewandt werden sollte. Ein grafischer Vergleich dieser Ansätze mit den Werten aus der FEM-Berechnung ist in Abbildung 102 dargestellt. Der zusätzliche ermittelte Wert für $f_c = 78$ /mm² bestätigt die Gültigkeit des Ansatzes a_2, wobei die Unterschätzung der Werte für hohe Betonfestigkeiten aus Ansatz a_1 durchaus begrüßt

werden kann. Der Ansatz a_1 sollte und wird auch im Weiteren favorisiert, womit im Bereich der mittleren Einbindetiefen die beste Annäherung erreicht wird, und auch für große Betondruckfestigkeiten ein deutliches Abflachen erzielt werden kann.

$$
\begin{aligned}
a_1 &= -4{,}07 \cdot 10^{-3} \cdot f_c^{\,3} + 0{,}183 \cdot 10^{-1} \cdot f_c^{\,2} + 87{,}3 \cdot f_c + 200 \\
a_2 &= \frac{25500 \cdot f_c}{234 + f_c} \\
a_3 &= 78{,}5 \cdot f_c + 500
\end{aligned}
\qquad (4.2)
$$

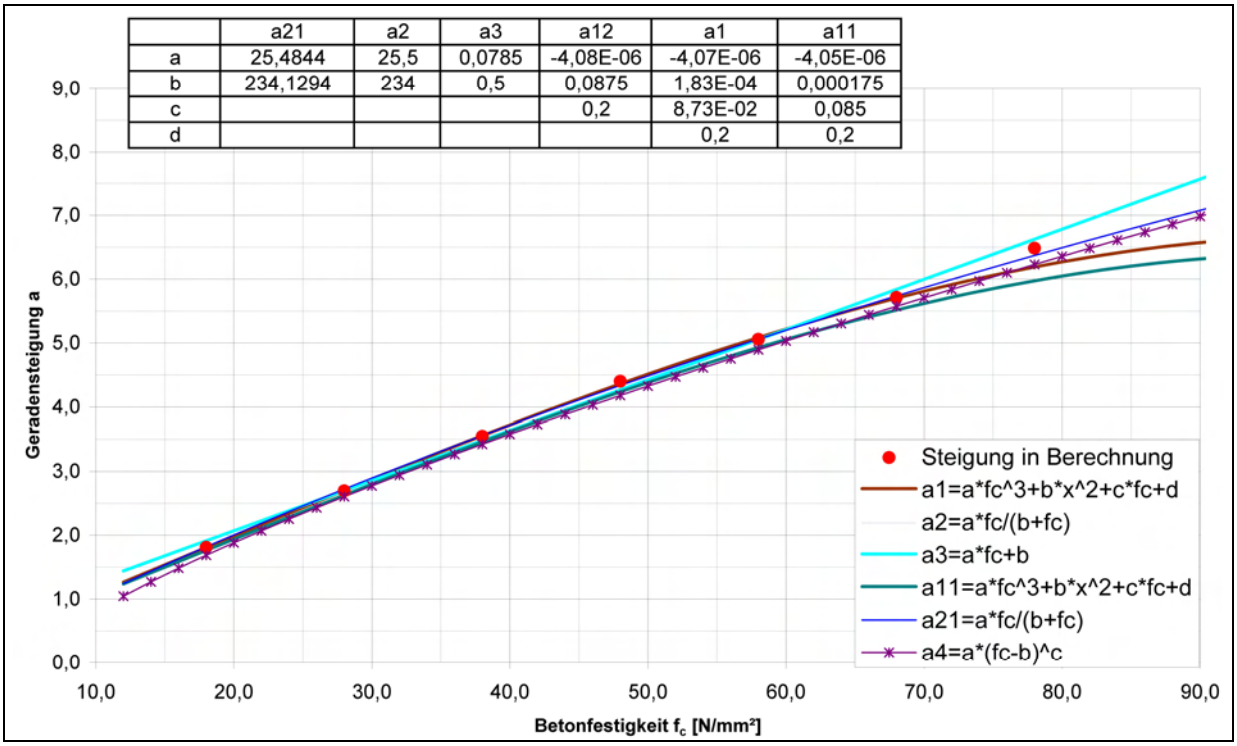


Abbildung 102: Diskussion und Vergleich der Geradensteigung a_i.

Analog zur Bestimmung der Geradensteigung a_i lässt sich der Abschnitt b_i über eine quasi lineare Beziehung über f_c definieren. Zur Diskussion werden 3 Ansätze nach Gleichung (4.3) gestellt, und im Abbildung 103 ausgewertet.

$$
\begin{aligned}
b_1 &= 397{,}2 \cdot f_c - 317{,}7 \\
b_2 &= 400 \cdot f_c - 300 \\
b_3 &= 400 \cdot f_c - 350
\end{aligned}
\qquad (4.3)
$$

Für die 100 mm breiten Versuchskörper kann die Bruchlast hiermit angegeben werden. Berücksichtigt man die Breite der Stirnplatte mit 100 mm, so müssen die Faktoren *a* und *b* noch entsprechend korrigiert werden. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass das Verhältnis Breite zu Höhe verloren geht, und somit sowohl für die Breite als auch für die Einbindetiefe– also die Höhe– die gleiche Einflussweise vorausgesetzt wird. Dies spielt aber keine Rolle, da ja auch für die Höhe eine lineare Abhängigkeit gefunden wurde und eben eine solche für die Breite vorausgesetzt wird.

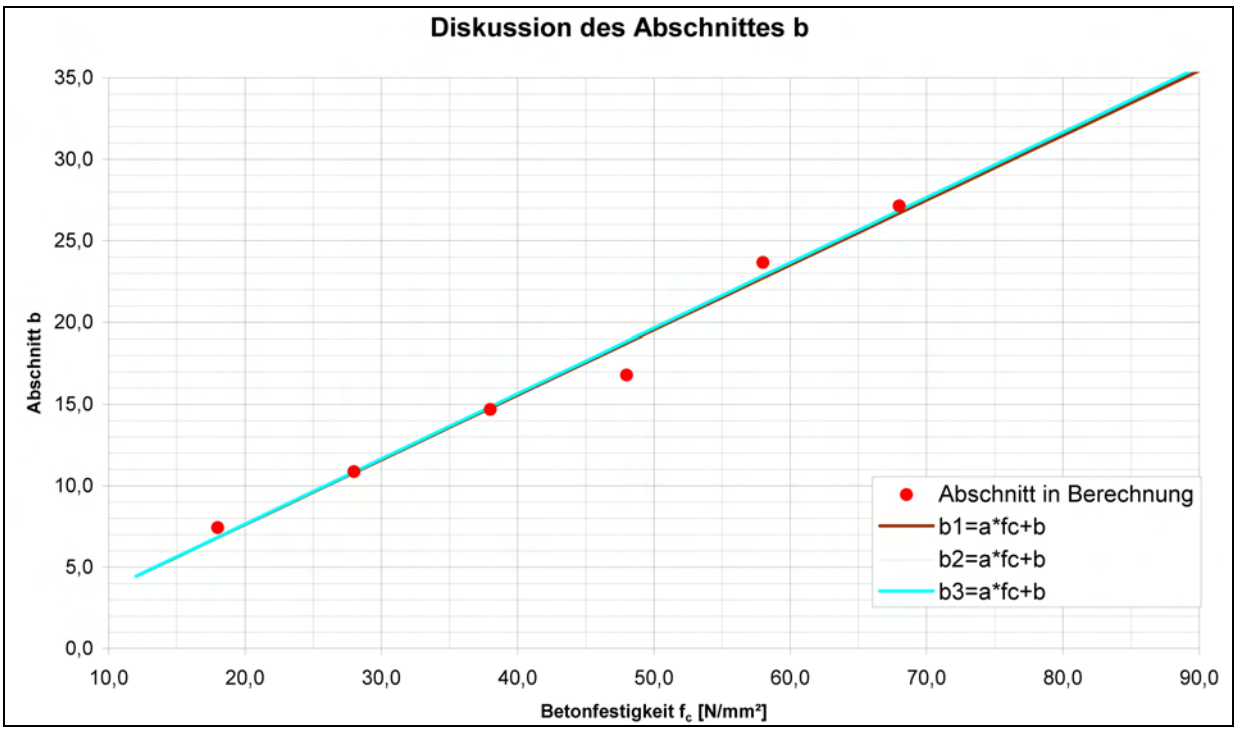


Abbildung 103: Diskussion der Geradenabschnitt b_i über f_c.

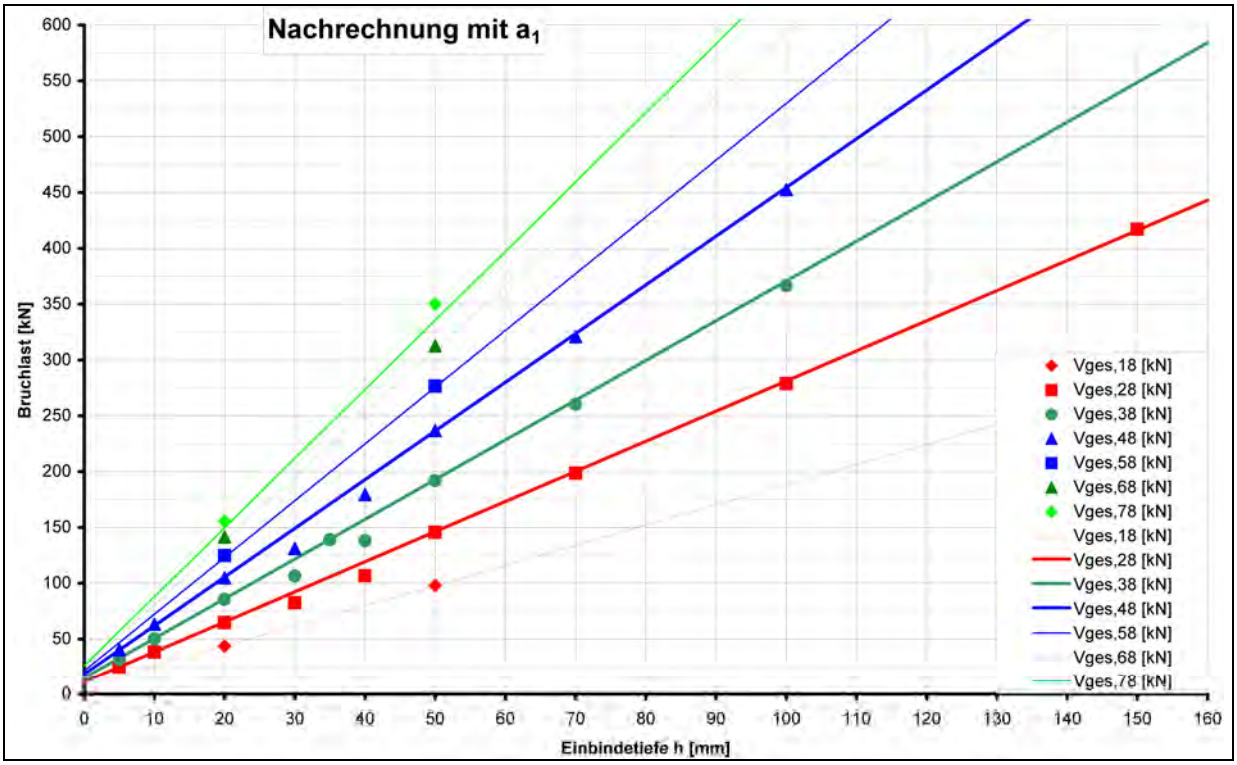


Abbildung 104: Nachrechnung R_{Base}^{*} mit den Ansatz nach Gleichung ,und hier a_1.

Einbindetiefe: h_{Base} *[mm]*
Stirnbreite: b_{Base} *[mm]*
Grundwert R^*_{Base} [N]

$$R^*_{Base} = a_{iB} \cdot (h_{Base} + 4{,}2) \cdot b_{Base} = a_{iB} \cdot (A_{Base} + 4{,}2 \cdot b_{Base})$$

oder

$$R^*_{Base} = \left(a_{iB} \cdot h_{Base} + b_{iB}\right) \cdot b_{Base} = a_{iB} \cdot A_{Base} + b_{iB} \cdot b_{Base} \qquad (4.4)$$

mit

$$a_{iB} = f_{(f_c)} \quad \text{und} \quad b_{iB} = f_{(f_c)}$$

mit:

$$a_{iB} = \begin{cases} a_{1B} = -4{,}07 \cdot 10^{-5} \cdot f_c^3 + 1{,}83 \cdot 10^{-3} \cdot f_c^2 + 0{,}873 \cdot f_c + 2 \\ a_{2B} = \dfrac{255 \cdot f_c}{234 + f_c} \\ a_{3B} = 0{,}785 \cdot f_c + 5 \quad \text{mit } f_c \le 50 \text{ N/mm}^2 \end{cases}$$

$$b_{iB} = \begin{cases} b_{1B} = 3{,}972 \cdot f_c - 3{,}177 \\ b_{2B} = 4{,}0 \cdot f_c - 3{,}2 \end{cases}$$

Die Gleichung (4.4) kann auch über σ^*_{Base}, also der übertragbaren Spannung vor der Stirnseite ausgedrückt werden. Diese Umformung ist notwendig, um den Herleitung dieses Abschnittes mit derjenigen des Folgeabschnittes vergleichen zu können.

Einbindetiefe: h_{Base} *[mm]*
Stirnbreite: b_{Base} *[mm]*
Grundwert R^*_{Base} [N]

$$\sigma^*_{Base} = \frac{R^*_{Base}}{A_{Base}} \quad R^*_{Base} \textit{ nach Gleichung (4.4)}$$

$$\sigma^*_{Base} = \frac{a_{iB}}{A_{Base}} \cdot \left(A_{Base} + 4{,}2 \cdot b_{Base}\right)$$

$$= a_{iB} \cdot \left(\frac{A_{Base}}{A_{Base}} + 4{,}2 \cdot \frac{b_{Base}}{h_{Base} \cdot b_{Base}}\right) = a_{iB} \cdot \left(1 + \frac{4{,}2}{h_{Base}}\right) \qquad (4.5)$$

oder

$$\sigma^*_{Base} = \frac{a_{iB}}{A_{Base}} \cdot A_{Base} + \frac{b_{iB}}{A_{Base}} \cdot b_{Base} = a_{iB} + \frac{b_{iB}}{h_{Base}}$$

mit:

$$a_{iB} = \begin{cases} a_{1B} = -4{,}07 \cdot 10^{-5} \cdot f_c^3 + 1{,}83 \cdot 10^{-3} \cdot f_c^2 + 0{,}873 \cdot f_c + 2 \\ a_{2B} = \dfrac{255 \cdot f_c}{234 + f_c} \\ a_{3B} = 0{,}785 \cdot f_c + 5 \quad \text{mit } f_c \le 50 \text{ N/mm}^2 \end{cases}$$

$$b_{iB} = \begin{cases} b_{1B} = 3{,}972 \cdot f_c - 3{,}177 \\ b_{2B} = 4{,}0 \cdot f_c - 3{,}2 \end{cases}$$

A4.2.2 ÜBERTRAGBARE SPANNUNG VOR DER STIRN – σ*BASE

Da in obiger Gleichung die Bruchlast in Abhängigkeit zu der vorhandenen Stirnfläche ausgedrückt wird, liegt es nahe einen alternativen Ansatz für eine Grundspannung direkt auf Basis der einaxialen Festigkeit zu suchen.

Betrachtet man die zugrunde liegenden Bruchspannungen vor der lastübertragenden Fläche A_{Base}, und vergleicht diese mit der einaxialen Betonruckfestigkeit f_c, so ergibt sich eine Darstellung nach Abbildung 105. Die Betrachtungsweise ist zulässig, da der Probekörper horizontal geführt wird, also keine Schiefstellung auftreten kann. Die gesamte lastübertragende Fläche A_{Base} sollte somit theoretisch gleichmäßig beansprucht sein. Lediglich die Randeffekte, aus dem freien Bauteilrand, auf die aufnehmbare Betonfestigkeit sind von Bedeutung, sowie Effekte aus großer Einbindetiefe, Sichwort mehraxiale Betondruckfestigkeit.

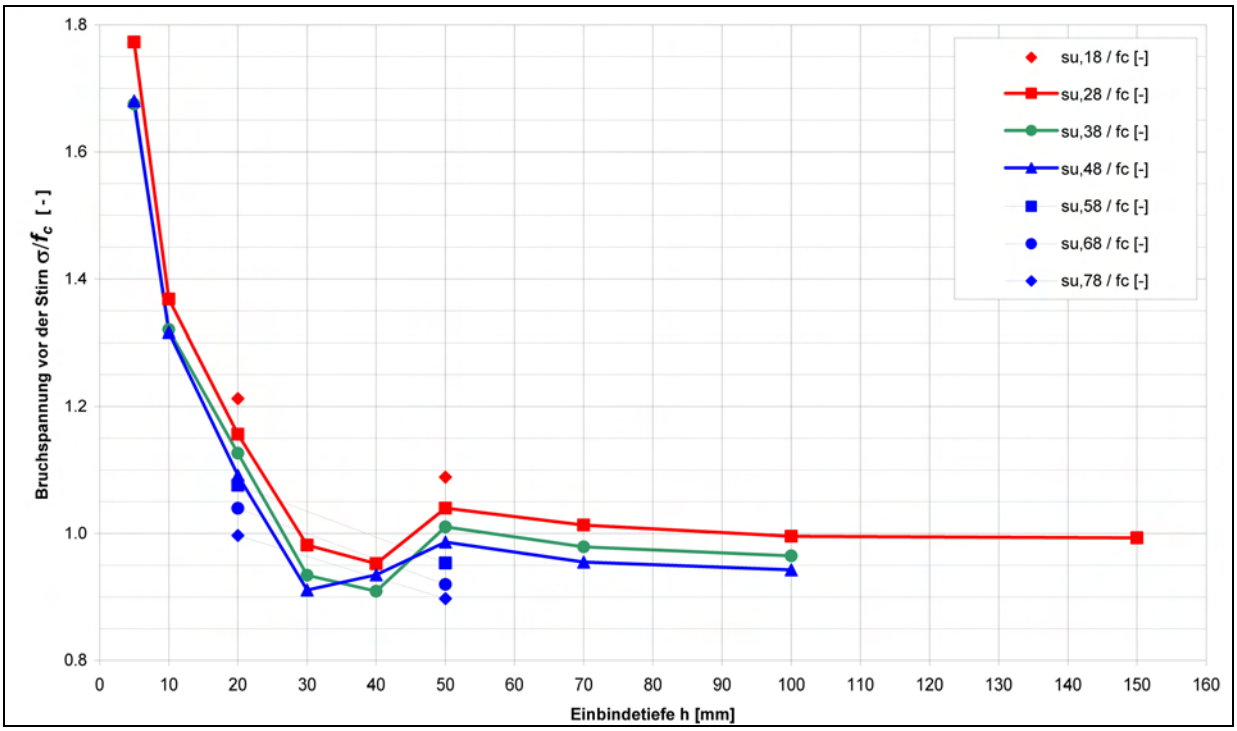


Abbildung 105: Stirnbruchspannung bezogen auf f_c.

Für kleine Einbindetiefen wird ein Versagenswert deutlich über f_c ermittelt, der aber hauptsächlich auf die Vernetzung mit zu steifen Elementen zurückzuführen ist. Für hohe Betondruckfestigkeiten wird der Wert von f_c dann nicht mehr erreicht. Die rote Linie für f_c = 28 N/mm² liegt auch für große Einbindetiefen nahe 1.

Ein einfacherer Ansatz findet sich, wenn die Erhöhung der Bruchspannung, gegenüber f_c – für kleine Einbindetiefen vernachlässigt wird. Es ist lediglich zu überlegen für höhere Betonfestigkeiten die Bruchspannung zu reduzieren. Der Anstieg der scheinbaren Festigkeit für kleine Einbindetiefen ist wohl eher auf Unzulänglichkeiten des Modells, zu steife Elemente, zurückzuführen, und sollte nicht in die Formel übernommen werden.

$$\sigma^*_{Base} = a \cdot f_c \quad \text{bzw.} \quad \frac{\sigma^*_{Base}}{f_c} = a$$

und (4.6)

$$R^*_{Base} = \sigma^*_{Base} \cdot A_{Base} = a \cdot f_c \cdot A_{Base}$$

mit:

$$a = -0{,}0025 \cdot f_c + 1{,}07 \leq 1{,}0 \quad [-]; \quad f_c \ [\text{N/mm}^2]$$

Mit dem Umstand, dass für einen Beton mit einer Druckfestigkeit f_c > 28 N/mm² die einaxiale Betondruckfestigkeit vor der Stirnfläche nicht mehr erreicht wird, unterschätzt eine Nachrechnung der Versuche die Kapazität der Lastübertragung für kleine Einbindetiefen und niedrige Betonfestigkeiten zum Teil erheblich. Dies kann aber akzeptiert werden.

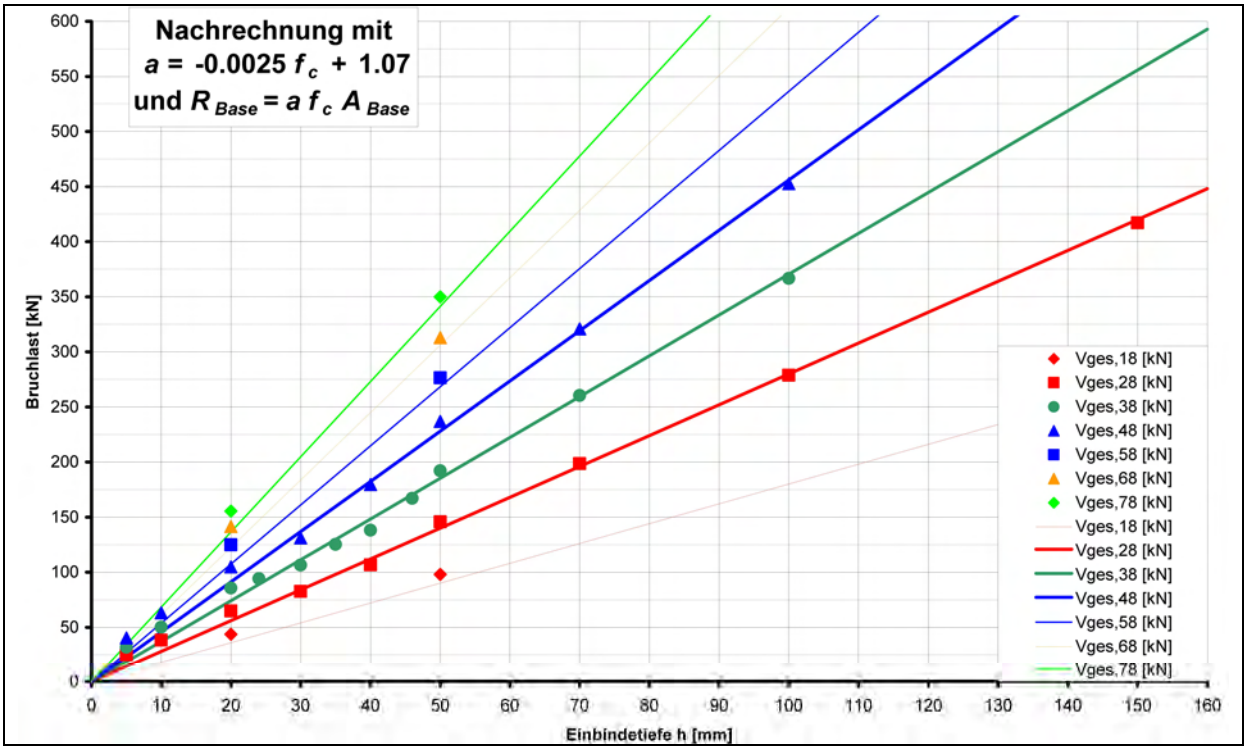


Abbildung 106: Nachrechnung R_{Base}^* mit $a = -0{,}0025 \cdot f_c + 1{,}07 \leq 1{,}0 \quad [-]$

A4.2.3 VERGLEICH R*BASE UND σ*BASE

Um die Entscheidung zugunsten einer Berechnungsvariante zu treffen, sollen die Formeln (4.4) bzw. (4.5) und (4.6) verglichen werden.

Für verschiedene Einbindetiefen h_{Base} werden die Bruchspannungen vor der Stirn nach Gleichung (4.4) bzw. (4.5) und Gleichung (4.6) in den folgenden Bildern vergli-

chen. Es zeigt sich, dass Gleichung (4.4) bzw. (4.5) für kleine Einbindetiefen sehr viel größere Bruchspannungen und damit Versagenslasten liefern.

- Diese Gleichungen sollten also nur für Einbindetiefen > 20 mm angewandt werden.
- Gleichung (4.6) hingegen liefert immer auf der sicheren Seite liegende befriedigende Werte, Aufgrund der hineingesteckten Restriktionen

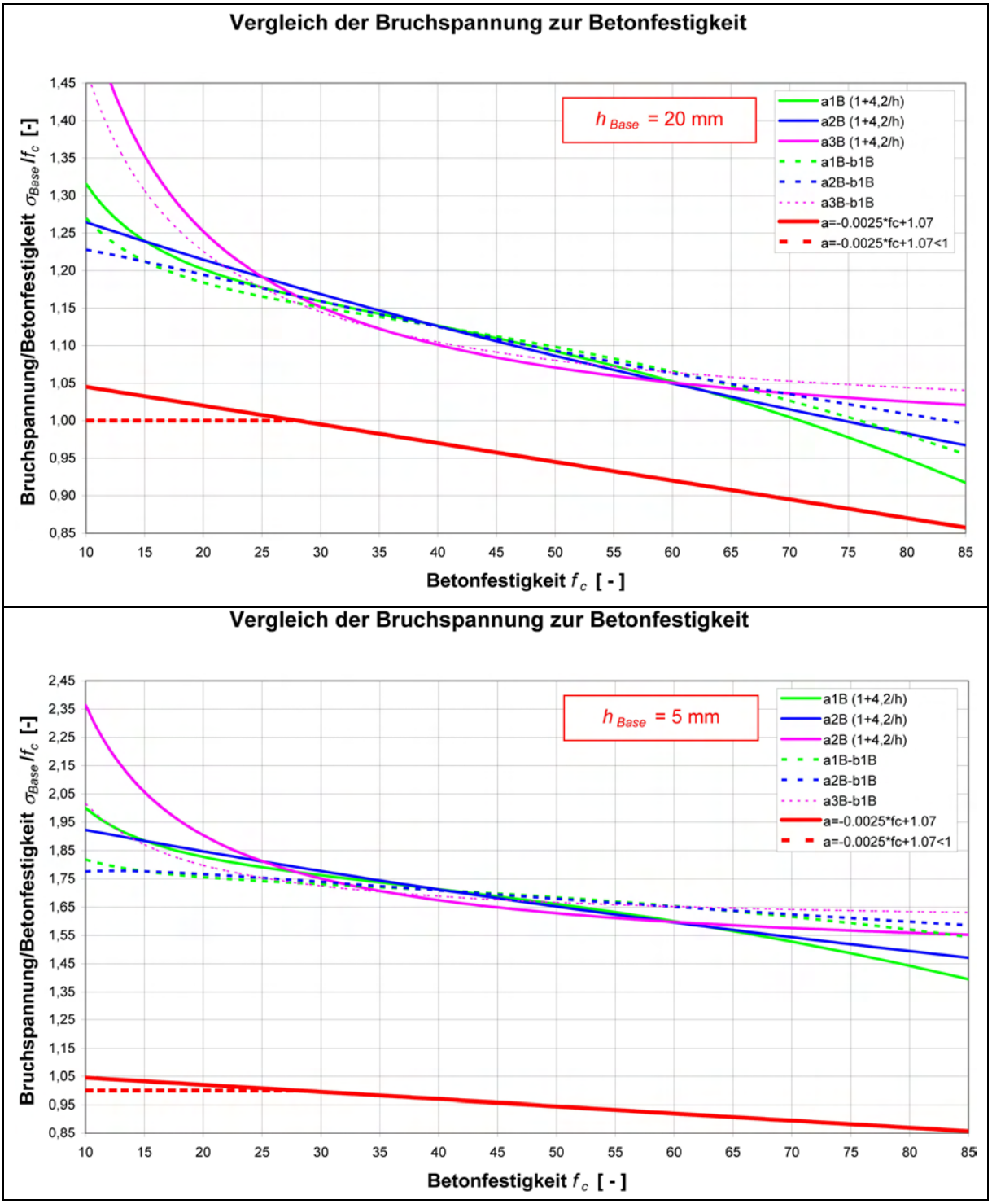
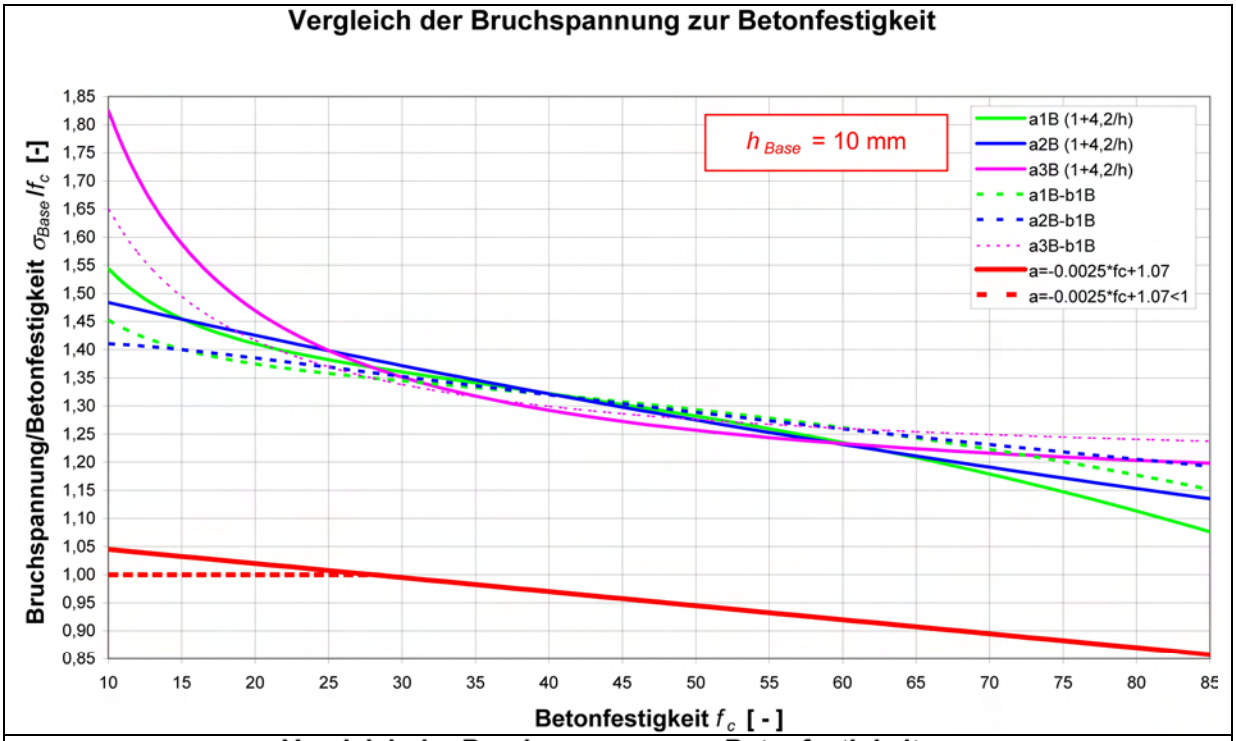


Abbildung 107: Vergleich für h_{Base} = 20 mm und h_{Base} = 50 mm



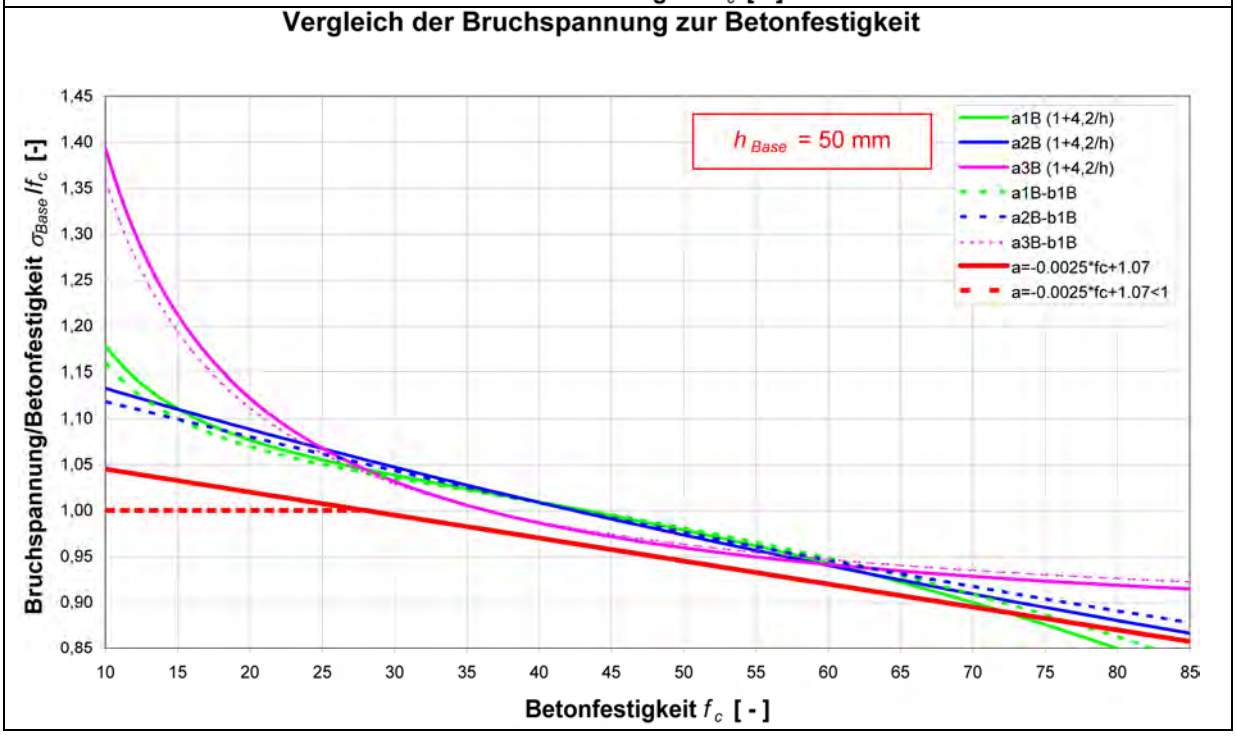


Abbildung 108: Vergleich für h_{Base} = 10 mm und h_{Base} = 50 mm

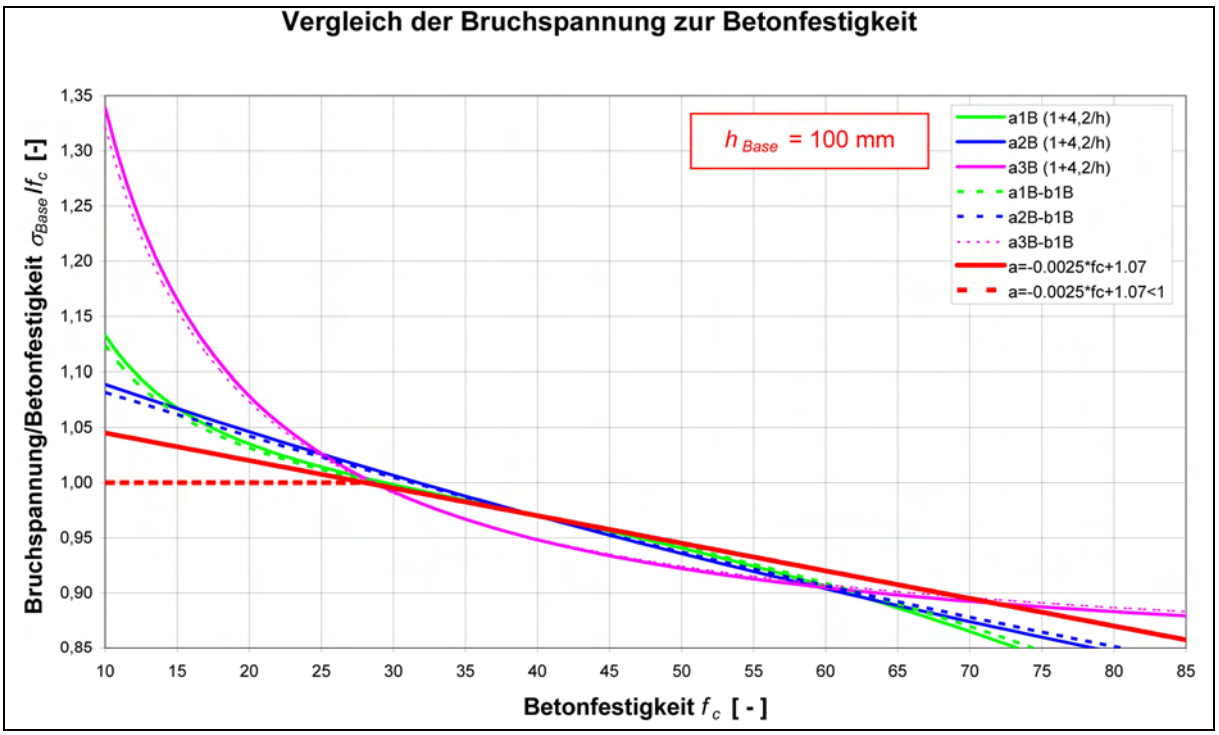


Abbildung 109: Vergleich für h_{Base} = 100 mm

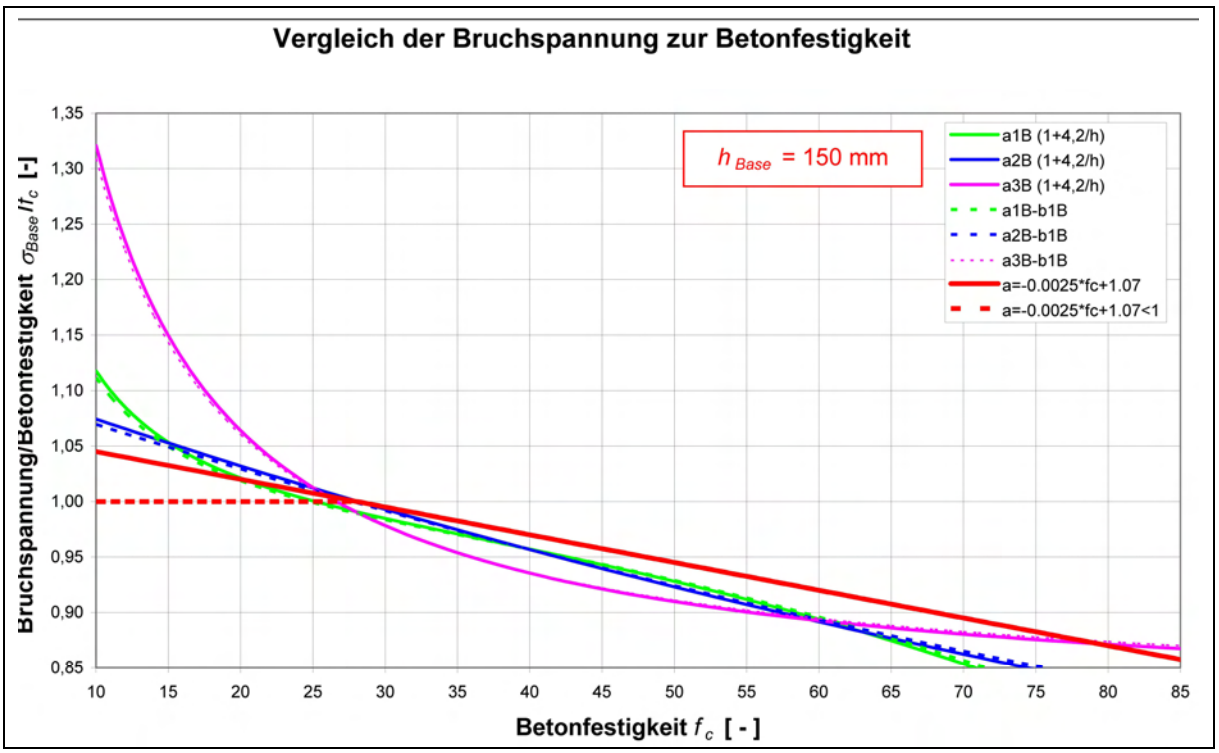


Abbildung 110: Vergleich für h_{Base} = 150 mm

A4.2.4 LASTANGRIFF VOR DER STIRN – E*BASE

Der Lastangriff liegt in der Stirnseite theoretisch nahe an der Mitte, also dem Schwerpunkt der Stirnfläche. Die Beobachtung der mittleren übertragbaren Spannung – festgestellt zu f_c – passt zu dieser Festlegung.

Betrachtet man den tatsächlichen Spannungszustand im Versagensfall vor der Stirnfläche, so weicht dieser aber erheblich von dieser Annahme ab. In Abbildung 111 sind Hauptspannungsverläufe für Modelle mit 30 und 100 mm Plattendicke und Festigkeiten f_c = 28 N/mm² (oben), sowie f_c = 48 N/mm² (unten) dargestellt. Bei höheren Festigkeiten und größeren Einbindetiefen verschiebt sich der Schwerpunkt somit merklich nach unten.

Es zeigt sich, dass dieser Effekt aber einfacher bei der Berücksichtigung der Verformung integriert werden kann, sodass die Annahme des Lastangriffpunktes im Schwerpunkt der Stirnseite in diesem Schritt hinreichend genau ist. Hierbei sollte man auch bedenken, dass das Einbauteil in diesem Stadium horizontal geführt ist.

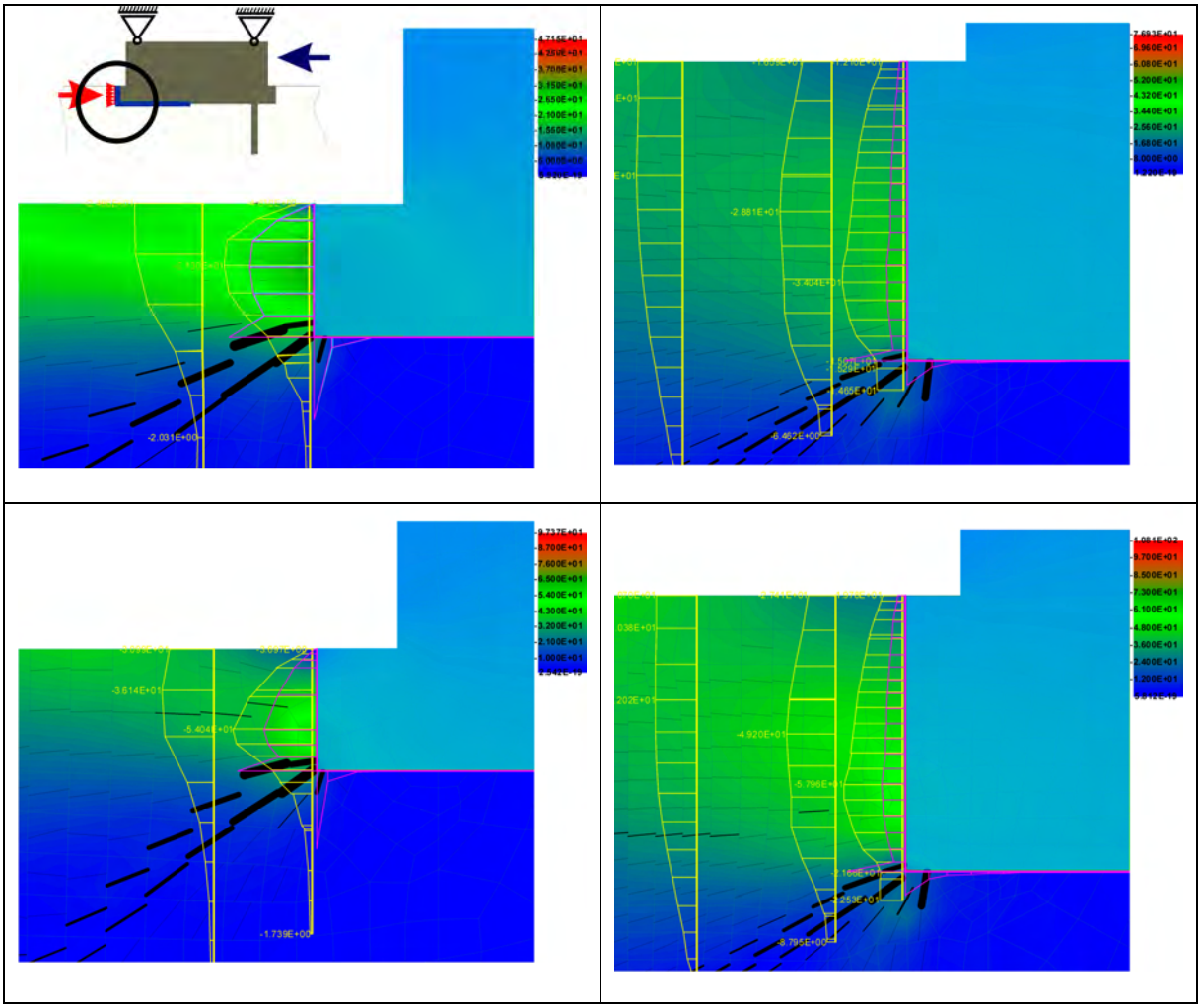


Abbildung 111: Spannungsverteilungen vor der Stirnfläche.

A4.2.5 VERSCHIEBUNGEN – V*BASE

Die Verschiebungen der Grundplatte sind in Abbildung 112 aufgetragen. Hierbei handelt es sich um rechnerische Verschiebungen mit dem zugrunde liegenden Materialmodell.

Es liegt nahe, die Einzelwerte mit logarithmischen Funktionen nach Gleichung (4.7) abzubilden. Der Parameter *b* kann für alle Kurven mit dem Wert *b* = -0,135 abgeschätzt werden. Der Faktor *a* beinhaltet dann die Betonfestigkeit als Scharparameter.

$$v^*_{Base} = a \cdot \ln\left(h_{Base}\right) - b \qquad (4.7)$$

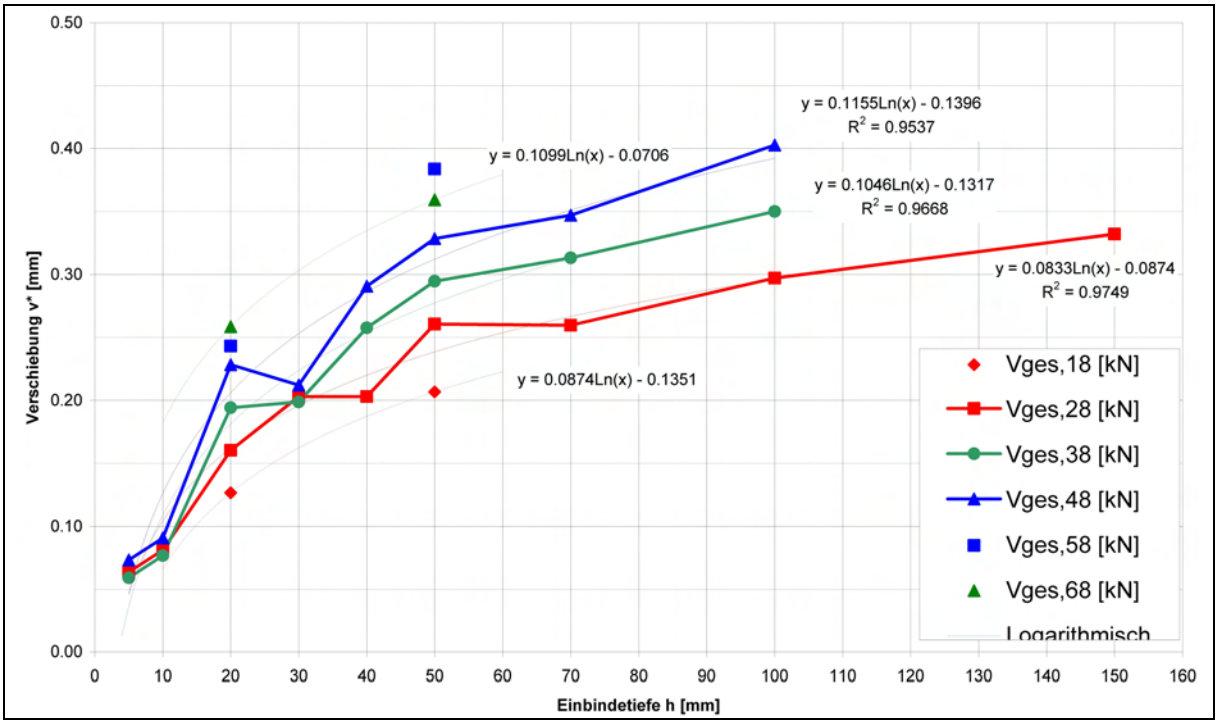


Abbildung 112: Verschiebungen der Grundplatte nach FEM

Für die einzelnen Betonfestigkeiten wird der optimale Parameter *a* mittels Regressionsanalyse bestimmt und ist in Tabelle 39 angegeben. Eine weitere Regression über diesen Parameter führt dann auf die Gleichung(4.8), um die Verschiebung der Grundplatte für verschiedene Betonfestigkeiten und Einbindetiefen zu bestimmen. Gültig ist diese Gleichung in einem Bereich der Betonfestigkeiten 15 N/mm² < f_c < 75 N/mm². Für größere Betonfestigkeiten scheint der Parameter *a* überschätzt zu werden, womit das Gesamtbemessungssystem aber auf der sicheren Seite liegt.

$$v^*_{Base} = a \cdot \ln\left(h_{Base}\right) - 0{,}135 \quad mit: a = \frac{0{,}86 \cdot f_c + 73}{1000} \qquad (4.8)$$

Eine Nachrechnung der FEM-Werte mit der Gleichung (4.8) zeigt dann Abbildung 113, einzelne Ausreißer können als solches abgetan und ignoriert werden.

f_c = 18 N/mm²	a = 0.08739582		f_c = 28 N/mm²	a = 0.09575640
f_c = 38 N/mm²	a = 0.10546280		f_c = 48 N/mm²	a = 0.11418916
f_c = 58 N/mm²	a = 0.13112530		f_c = 68 N/mm²	a = 0.13138690
f_c = 78 N/mm²	a = 0.13514767			

Tabelle 39: Werte a für verschiedene Betonfestigkeiten

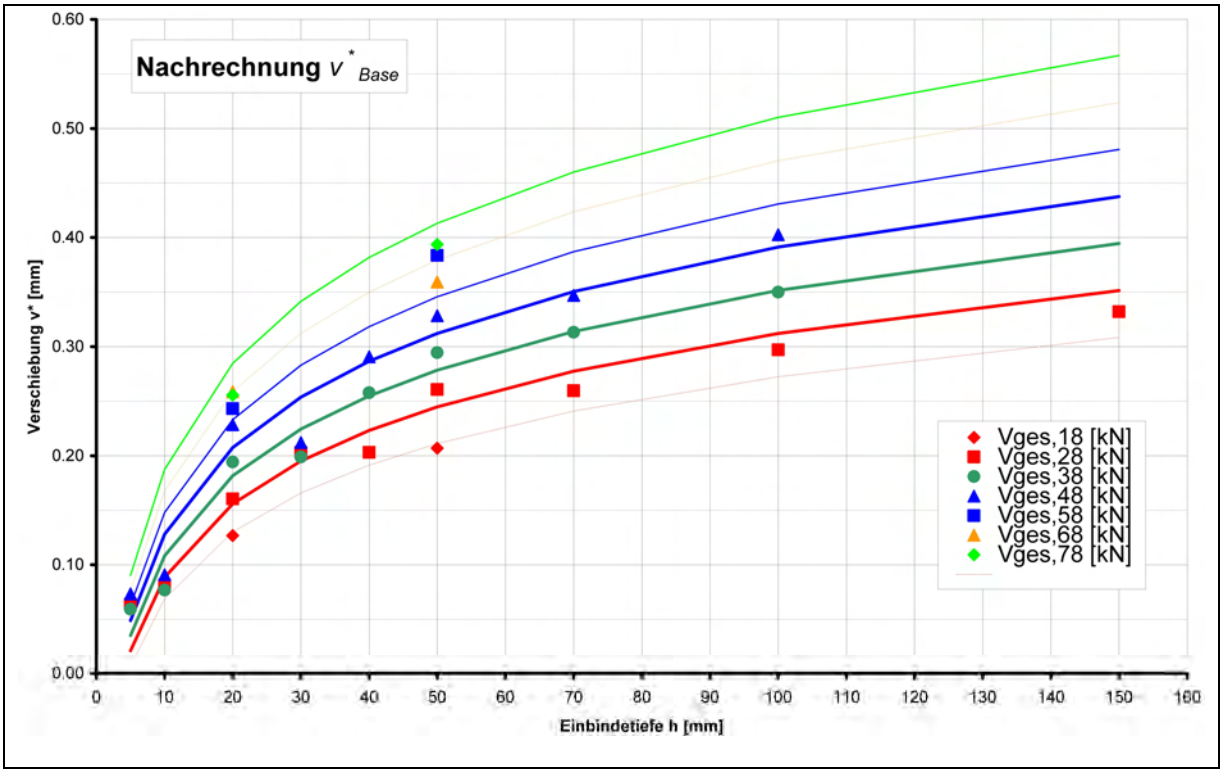


Abbildung 113: Nachrechnung – Verschiebung der Grundplatte.

Eine weiterhin untersuchte alternative Gleichung lautet:

$$v^*_{Base} = \left(0{,}0006 \cdot h_{Base} + 0{,}04\right) \cdot f_c^{1/3} \qquad (4.9)$$

wird aber nicht weiter berücksichtigt.

A4.2.6 QUALITÄT DER NACHRECHNUNG

Abschließen sollen noch mal alle Berechnungsvarianten für den Grundwert der vor der Stirn übertragenen Last R^*_{Base} gegenübergestellt werden, siehe hierzu die Bilder, Abbildung 114, Abbildung 116, Abbildung 118 und Abbildung 120.

Gleichung (4.4) liefert insgesamt näher am Ziele liegende Ergebnisse, wobei Gleichung (4.6) mehr auf der sicheren Seite bleibt, und auch für große Einbindetiefen und große Betonfestigkeiten den Sollwert besser abbildet.

So ergibt sich nach (4.6) für eine Einbindetiefe von 50 mm bei einer Betonfestigkeit von 58 N/mm² eine Überschätzung des Sollwertes um 7 %. Die maximale Über-

schätzung von 22 % soll hier nicht betrachtet werden, da hier der Lastabfall infolge großer Exzentrizität eine Rolle spielt. Dies wird jedoch im folgenden Kapitel „Stanze mit Anker“ untersucht und berücksichtigt werden.

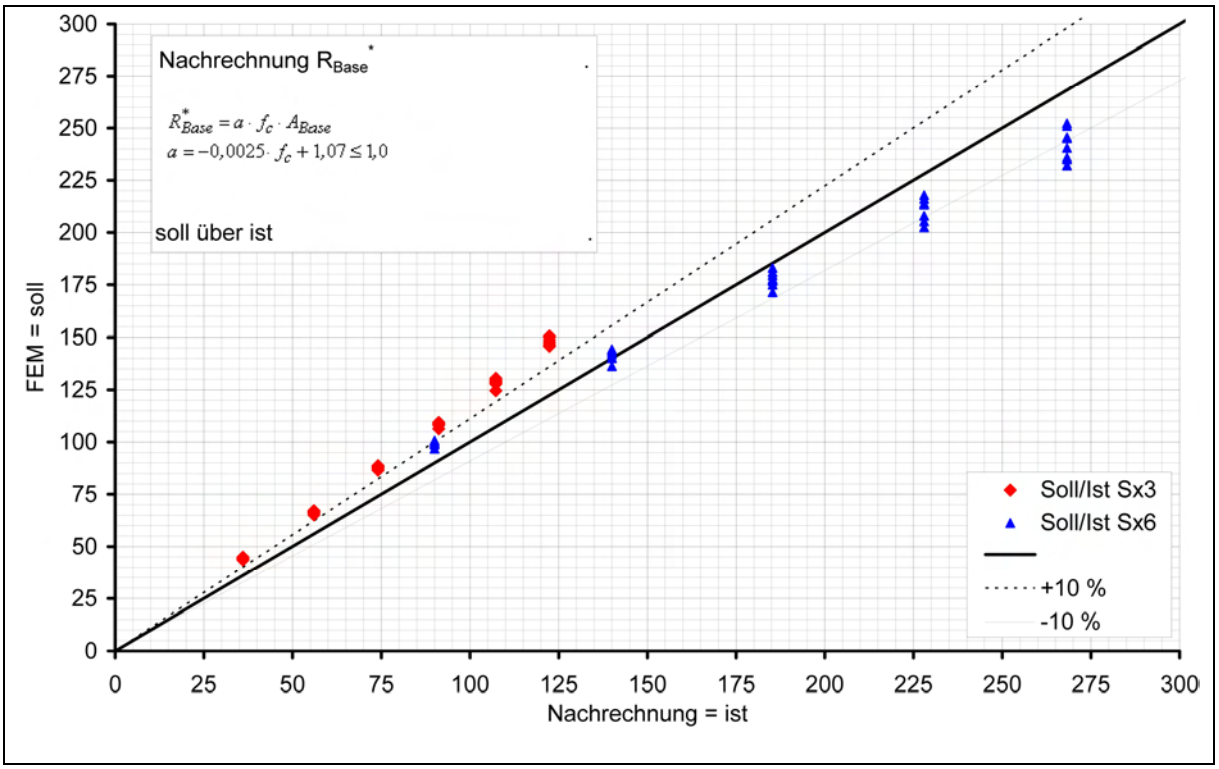


Abbildung 114: Qualität der Nachrechnung R^*_{Base} nach Gleichung (4.6)

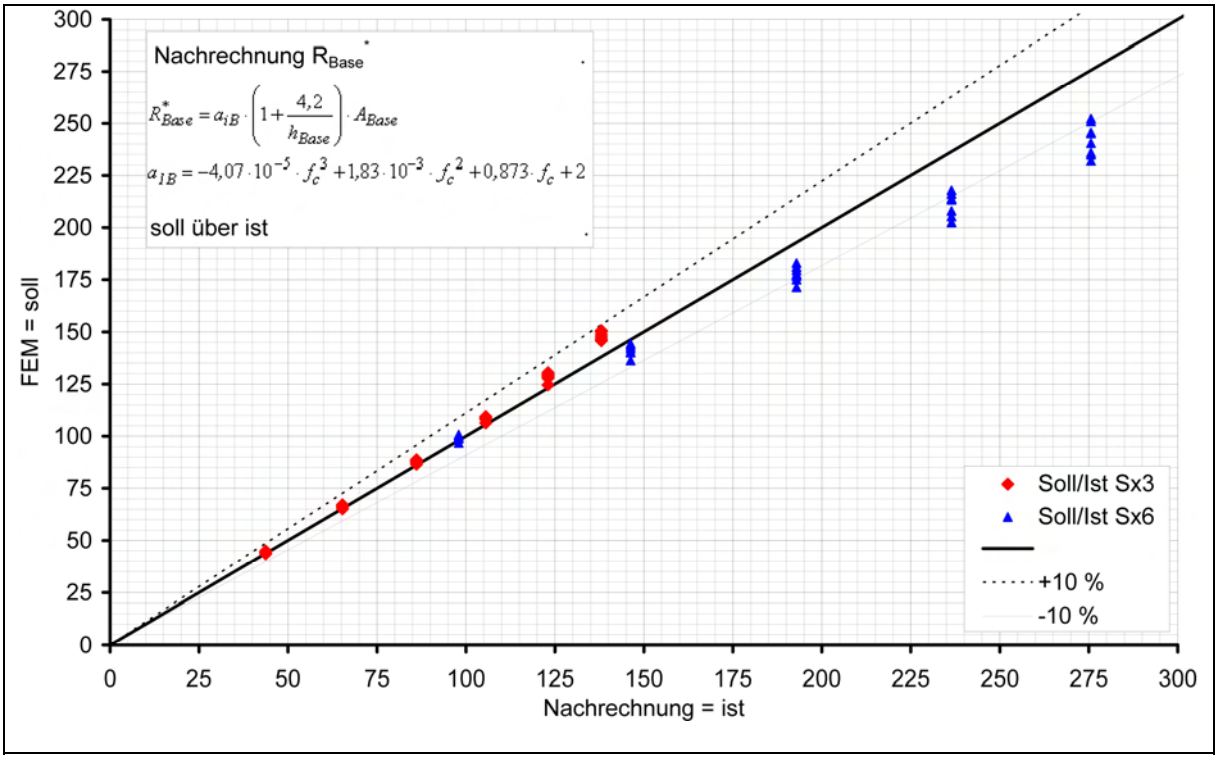


Abbildung 115: Qualität der Nachrechnung R^*_{Base} nach Gleichung (4.4)

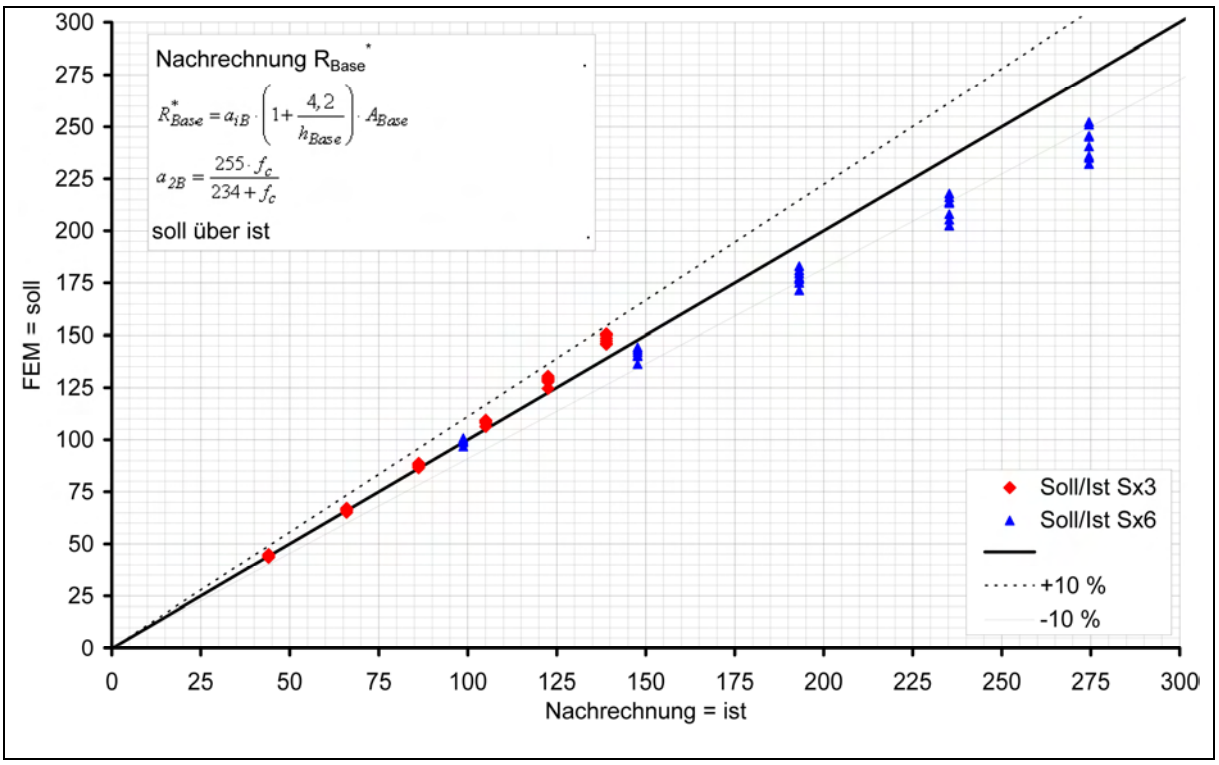


Abbildung 116: Qualität der Nachrechnung R^*_{Base} nach Gleichung (4.5)

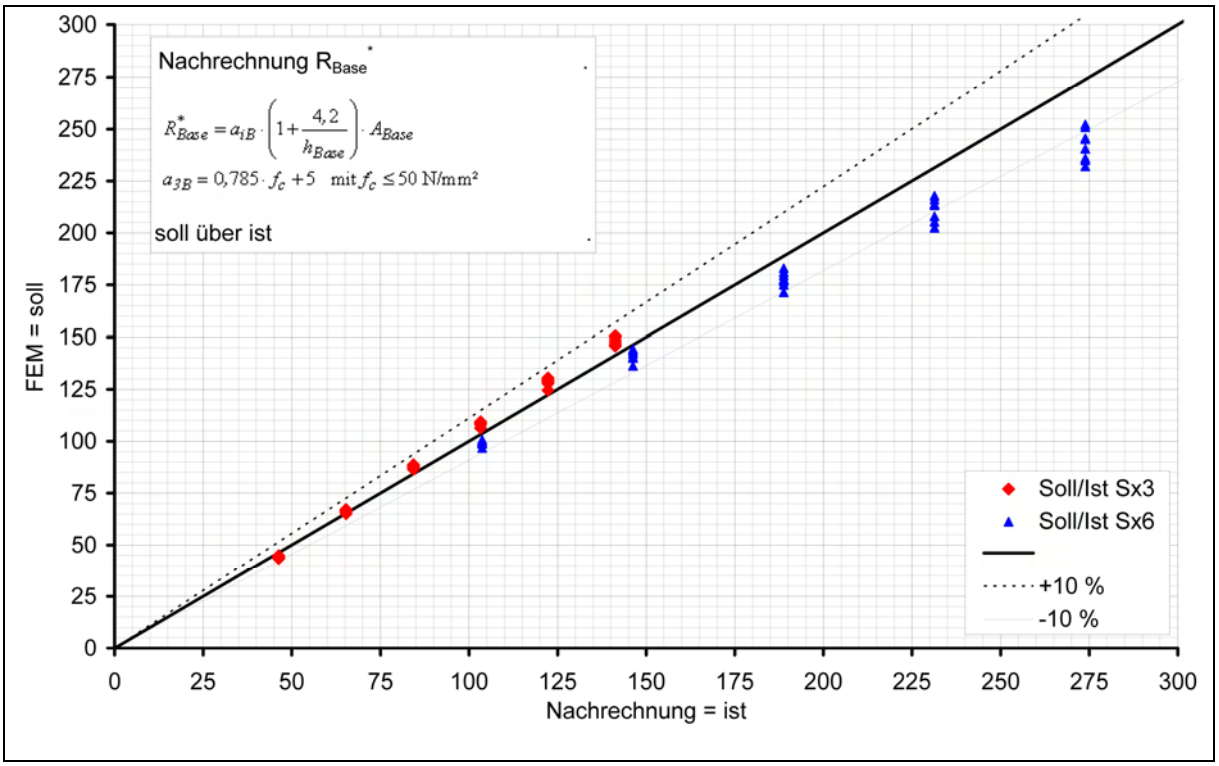


Abbildung 117: Qualität der Nachrechnung R^*_{Base} nach Gleichung ...

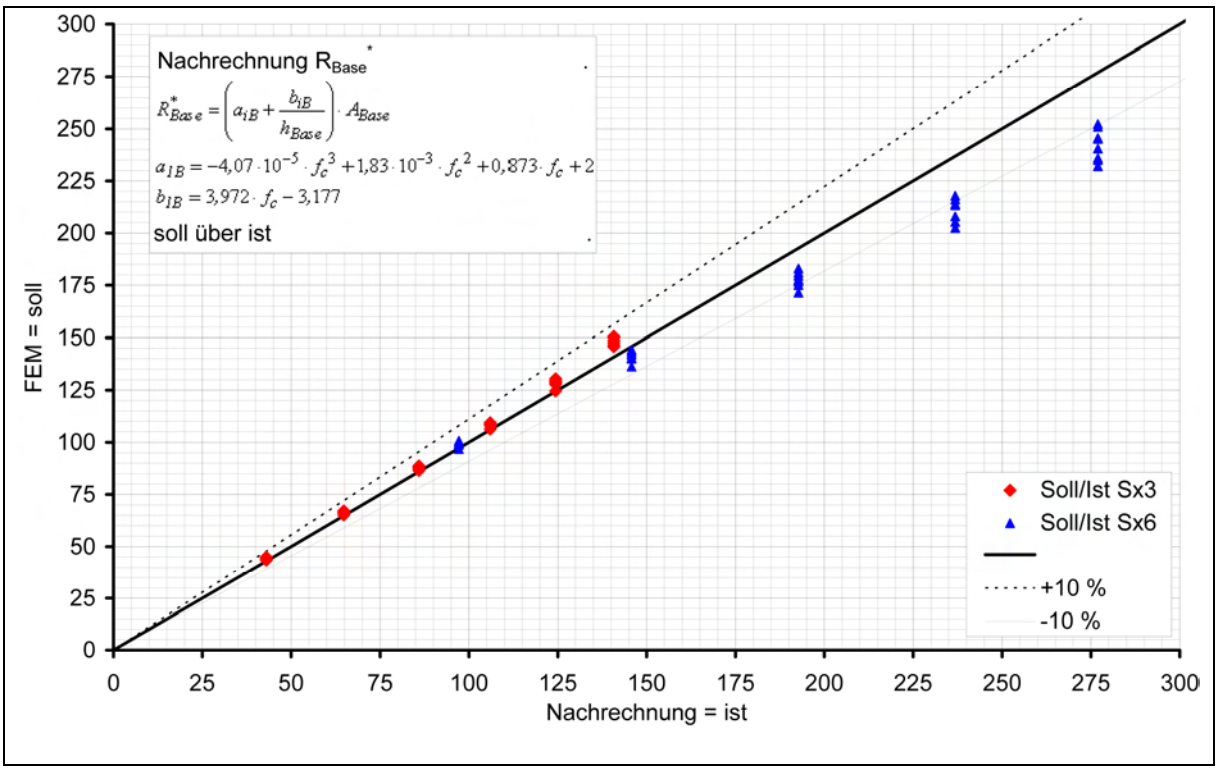


Abbildung 118: Qualität der Nachrechnung R^*_{Base} nach Gleichung ...

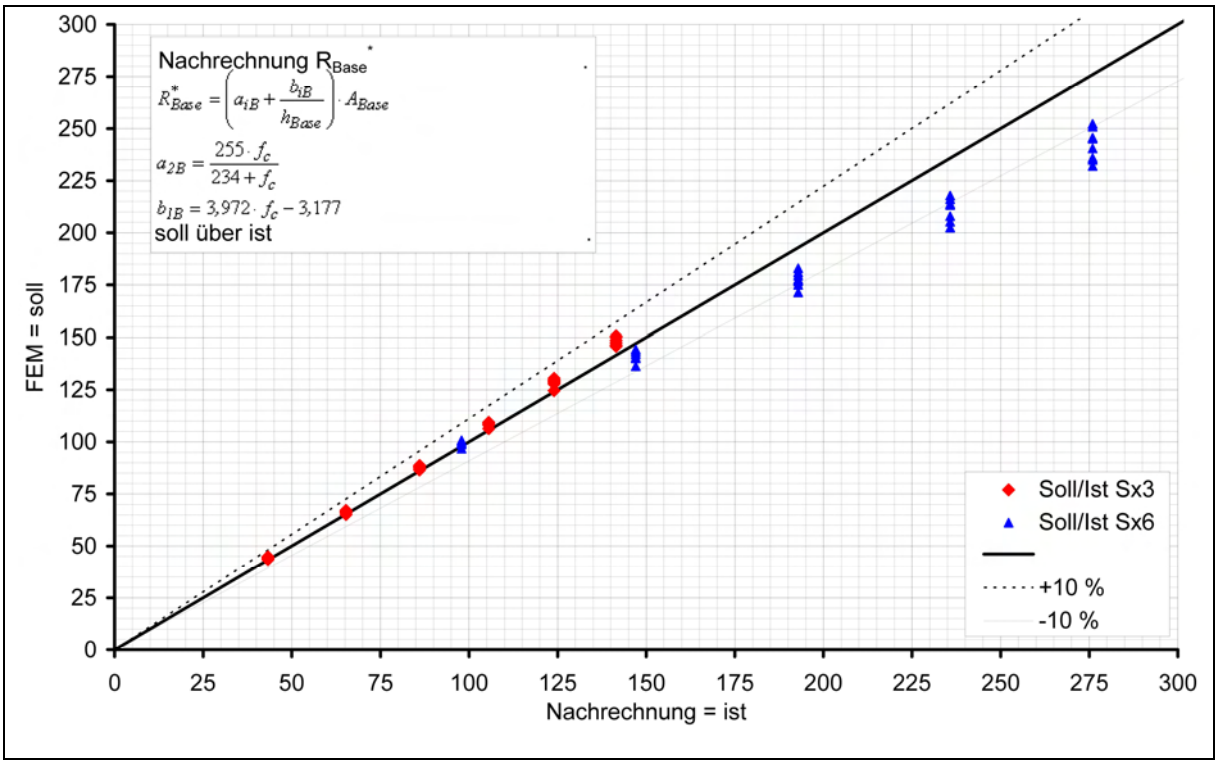


Abbildung 119: Qualität der Nachrechnung R^*_{Base} nach Gleichung ...

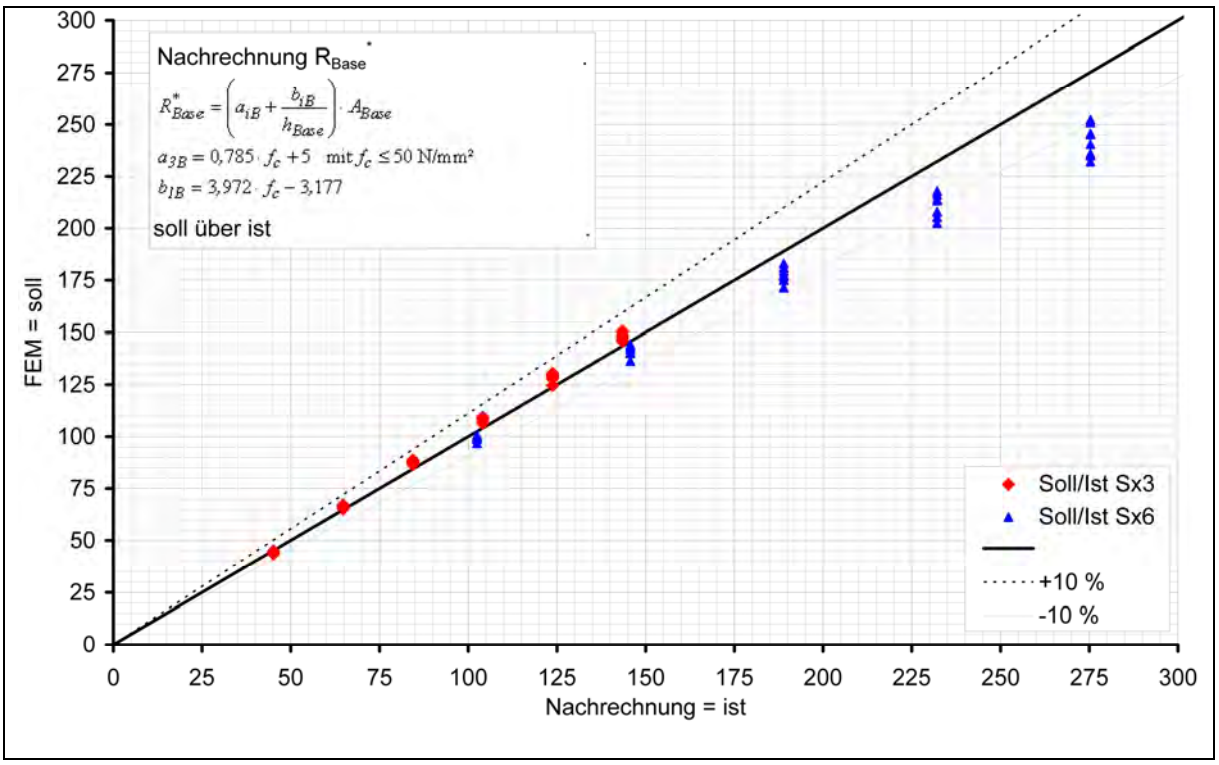


Abbildung 120: Qualität der Nachrechnung R^*_{Base} nach Gleichung ...

Einem speziellen Ansatz kann hier kein eindeutiger Vorzug gegeben werden, da alle ein ähnlich gutes Ergebnis liefern. Im Weiteren wird der Ansatz nach Gleichung (4.5) mit dem Parametern a_{2B} und b_{2B} favorisiert.

Die Grundwerte am Modell STANZE bzw. BASE werden somit wie folgt zusammengestellt:

Einheiten:

R^*_{Base}	[N]
f_c	[N/mm²]
σ^*_{Base}	[N/mm²]
h_{Base}	[mm]
b_{Base}	[mm]
A_{Base}	[mm²]

$$R^*_{Base} = \sigma^*_{Base} \cdot A_{Base}$$

$$\sigma^*_{Base} = a_{iB} + \frac{b_{iB}}{h_{Base}}$$

mit

$$a_{2B} = \frac{255 \cdot f_c}{234 + f_c}$$

$$b_{2B} = 4{,}0 \cdot f_c - 3{,}2$$

$$R^*_{Base} = \left(\frac{255 \cdot f_c}{234 + f_c} + \frac{4{,}0 \cdot f_c - 3{,}2}{h_{Base}} \right) \cdot A_{Base} \qquad (4.10)$$

$$e^*_{Base} = h_{Base} / 2 \qquad (4.11)$$

$$v^*_{Base} = a \cdot \ln(h_{Base}) - 0{,}135$$

$$mit: \qquad (4.12)$$

$$a = \frac{0{,}86 \cdot f_c + 73}{1000}$$

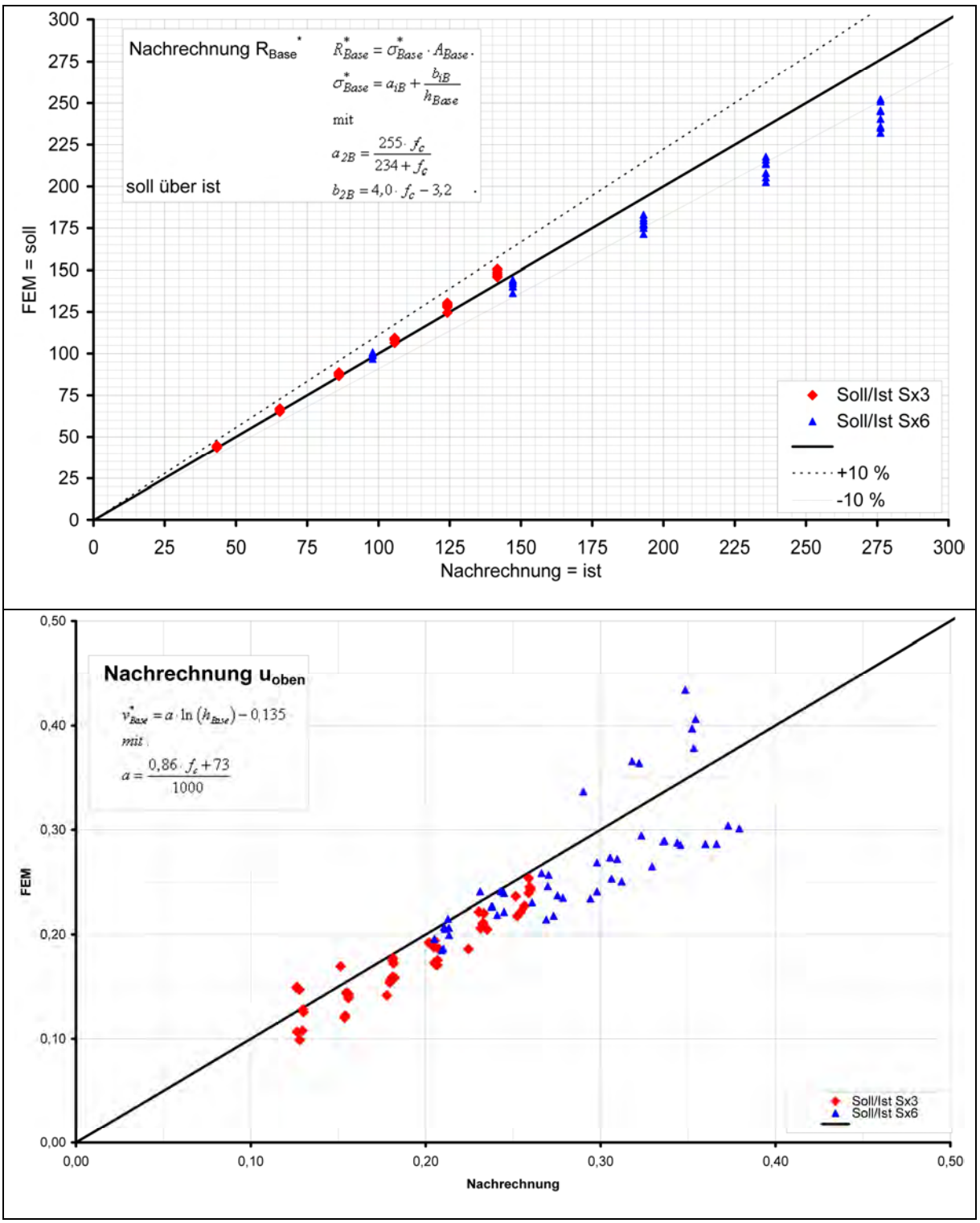


Abbildung 121: Qualität der Nachrechnung nach Gleichung (4.10)

A4.3 EINFLUSS DER ZUGANKERSTEIFIGKEIT – STANZE MIT ANKER

Für die Systeme mit h_B = 20 mm Einbindetiefe (Sx3_xx_x) und h_B = 50 mm Einbindetiefe (Sx6_xx_x) wird der Einfluss der Ankersteifigkeit, bzw. der Einfluss der Exzentrizität untersucht.

A4.3.1 MODELL UND PARAMETER

Zur Berücksichtigung der Zugankersteifigkeit muss das Modell wieder entsprechend geändert werden. Untersucht wird weiterhin die Lastübertragung vor der Stirnseite der Grundplatte (BASE). Im Modell „Stanze A" wird hierzu die horizontale Führung des Stahlblocks aufgegeben. Den Ausgleich der exzentrisch wirkenden Beanspruchung V stellt jetzt ein Zuganker, wie im Versuch verwendet, dar. Dieser Zuganker wird durch eine Feder simuliert, da lediglich die Längsdehnung des Zugankers untersucht werden soll. Die Federkraft und damit die Ankerkraft werden nicht in den Beton eingeleitet, da dies in dem verwendeten 2D-Modell zu größeren Abweichungen von der tatsächlichen Lastabtragung führt.

A4.3.2 ZUGANKERSTEIFIGKEIT

Siehe die Ausführungen in A3.4.1.1.

A4.3.3 ERGEBNISSE DER BERECHNUNG – DOKUMENTATION DER BERECHNUNGEN

Im Weiteren sind die erreichten Horizontallasten F_x sowie die zugehörenden Ankerlasten F_A jeweils über der Horizontalverschiebung u_{x_Base} also u_{x_unten} aufgetragen.

Die Abbildungen zeigen die Entwicklung für die untersuchten Ankersteifigkeitsklassen. In den Abbildungen selber werden die untersuchten Betonfestigkeiten gegenübergestellt:

- S0x -> f_c = 18 N/mm²
- S1x -> f_c = 28 N/mm²
- S2x -> f_c = 38 N/mm²
- S3x -> f_c = 48 N/mm²
- S4x -> f_c = 58 N/mm²
- S5x -> f_c = 68 N/mm²

Systeme Sx3 mit 20 mm Einbindetiefe

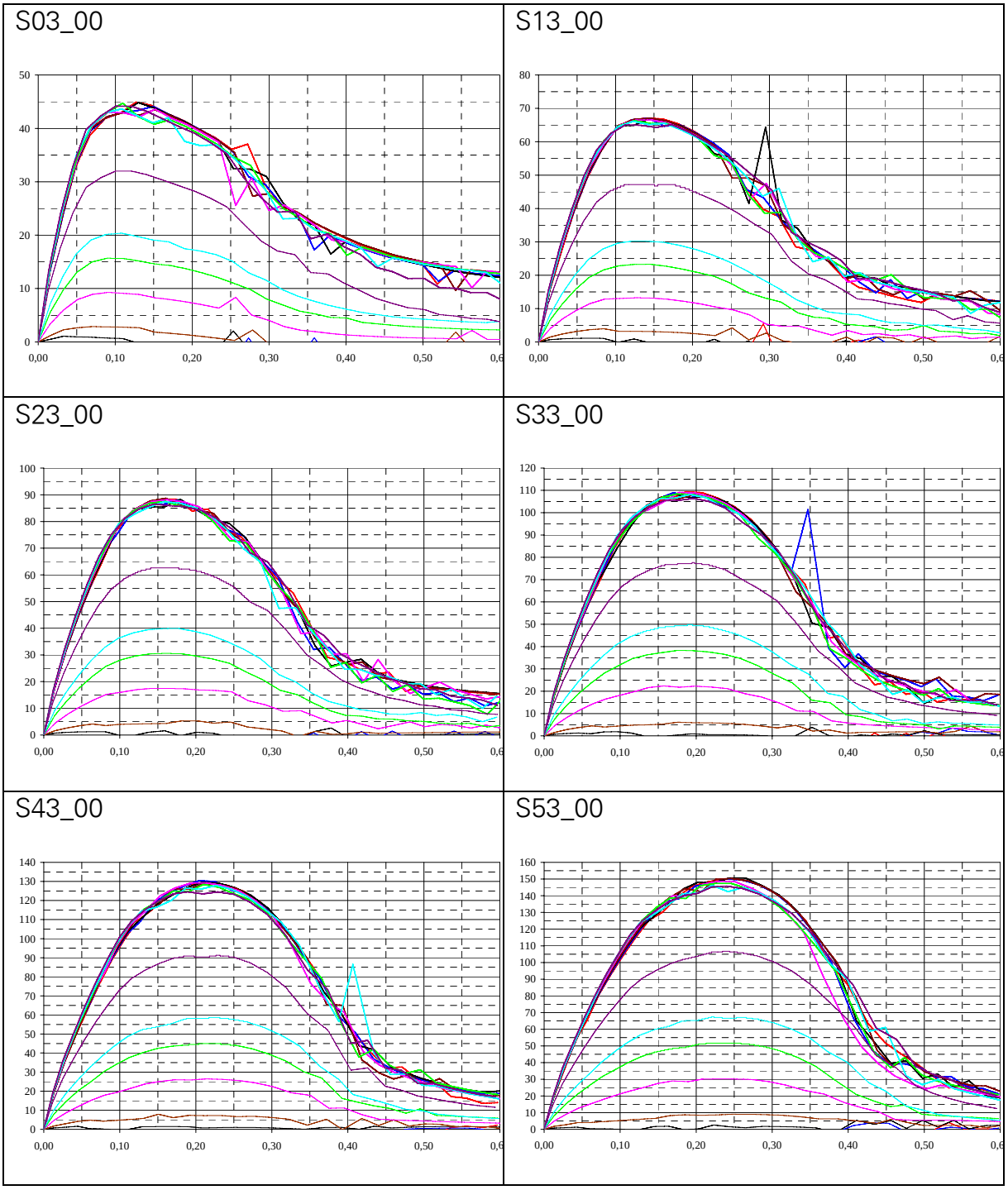


Abbildung 122: Grafik Sx3_00

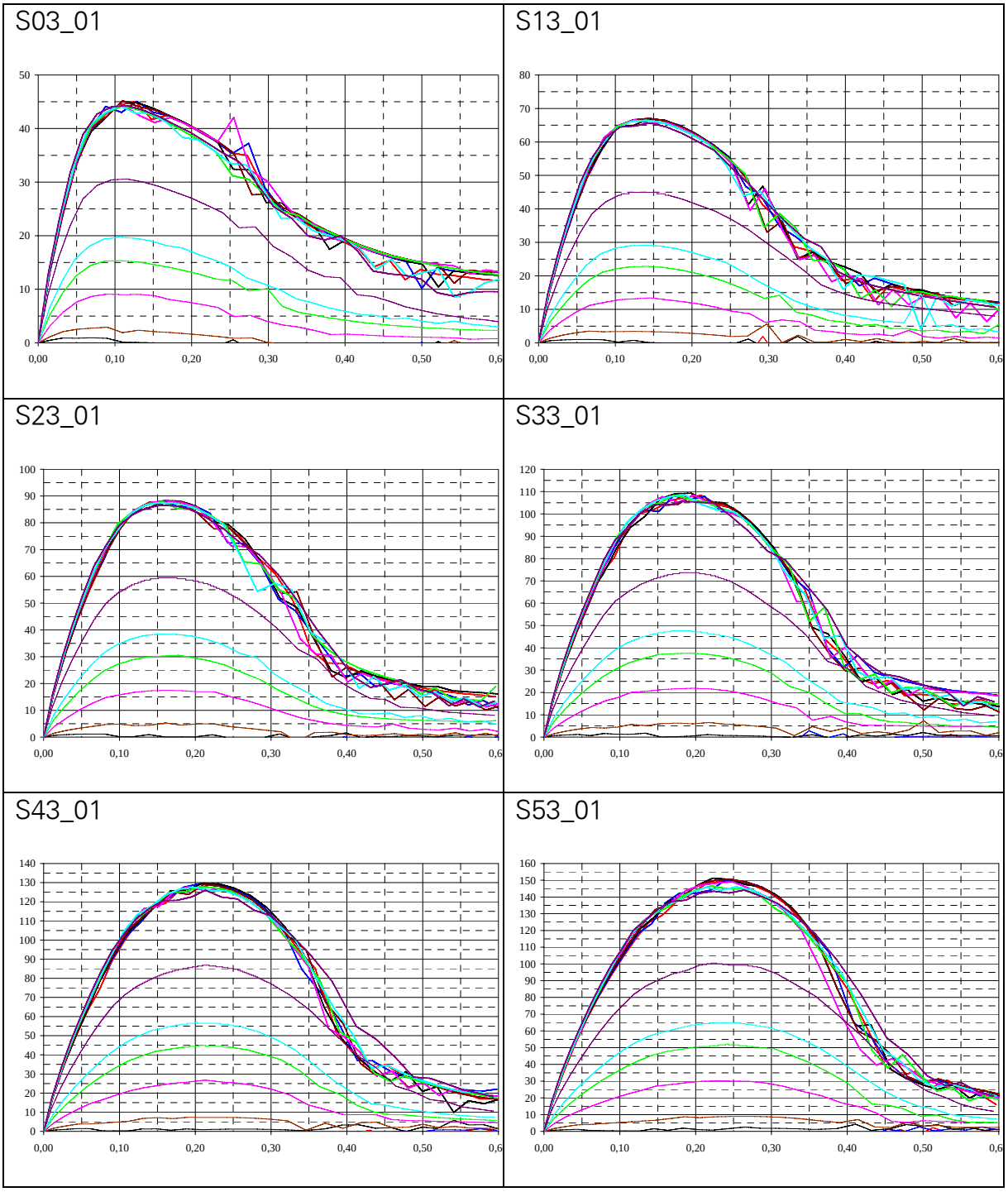


Abbildung 123: Grafik Sx3_01

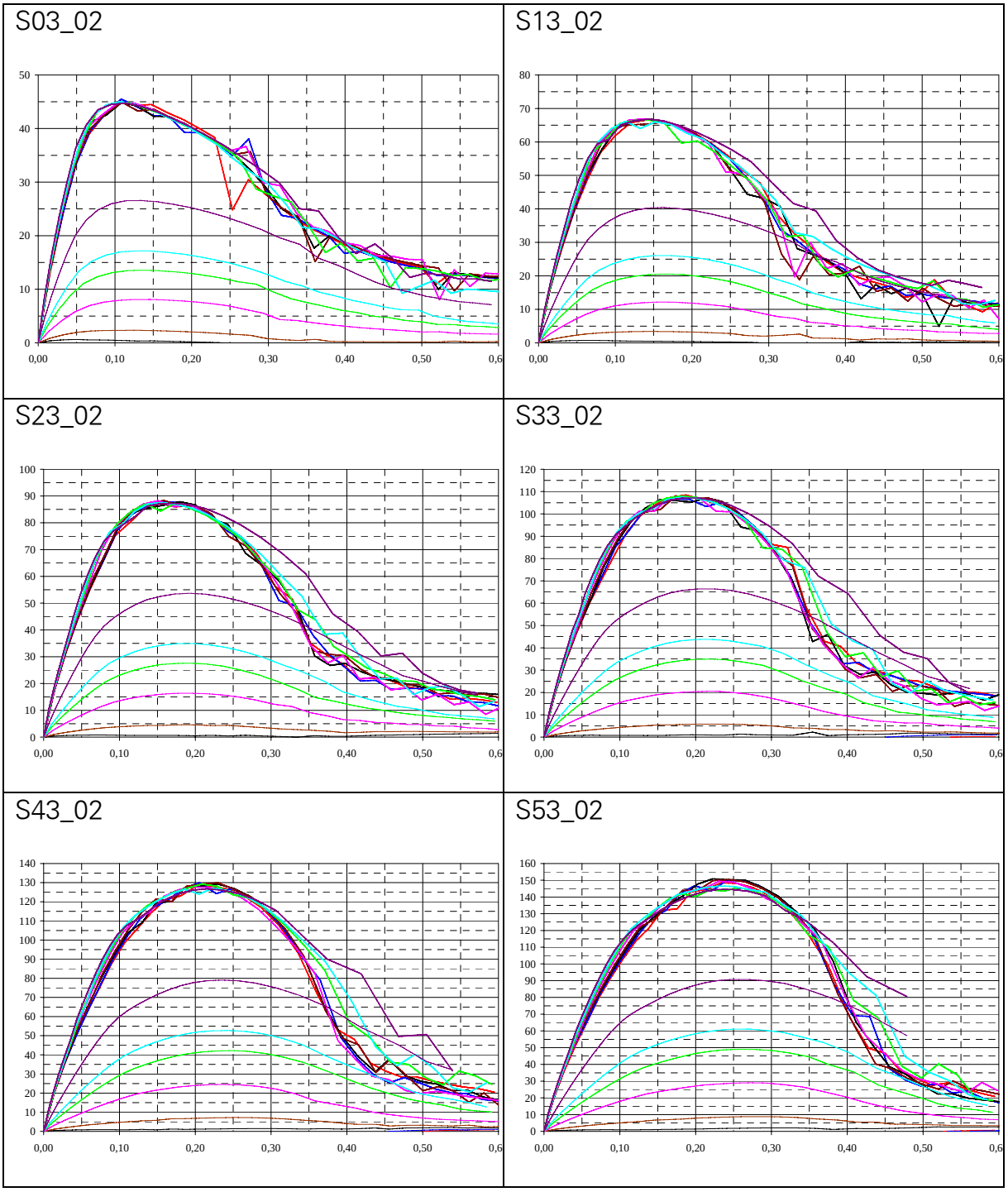


Abbildung 124: Grafik Sx3_02

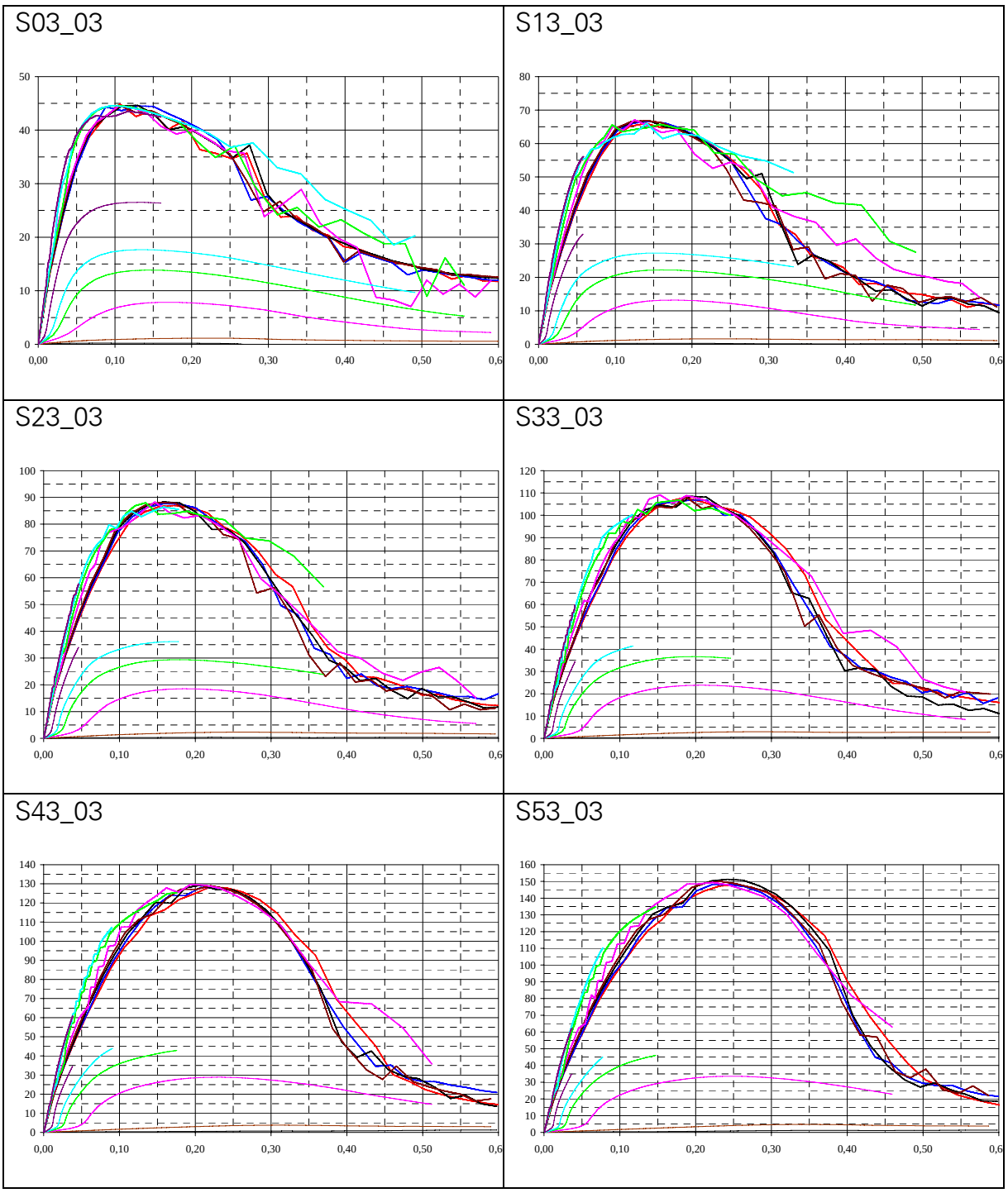


Abbildung 125: Grafik Sx3_03

Systeme Sx6 mit 50 mm Einbindetiefe

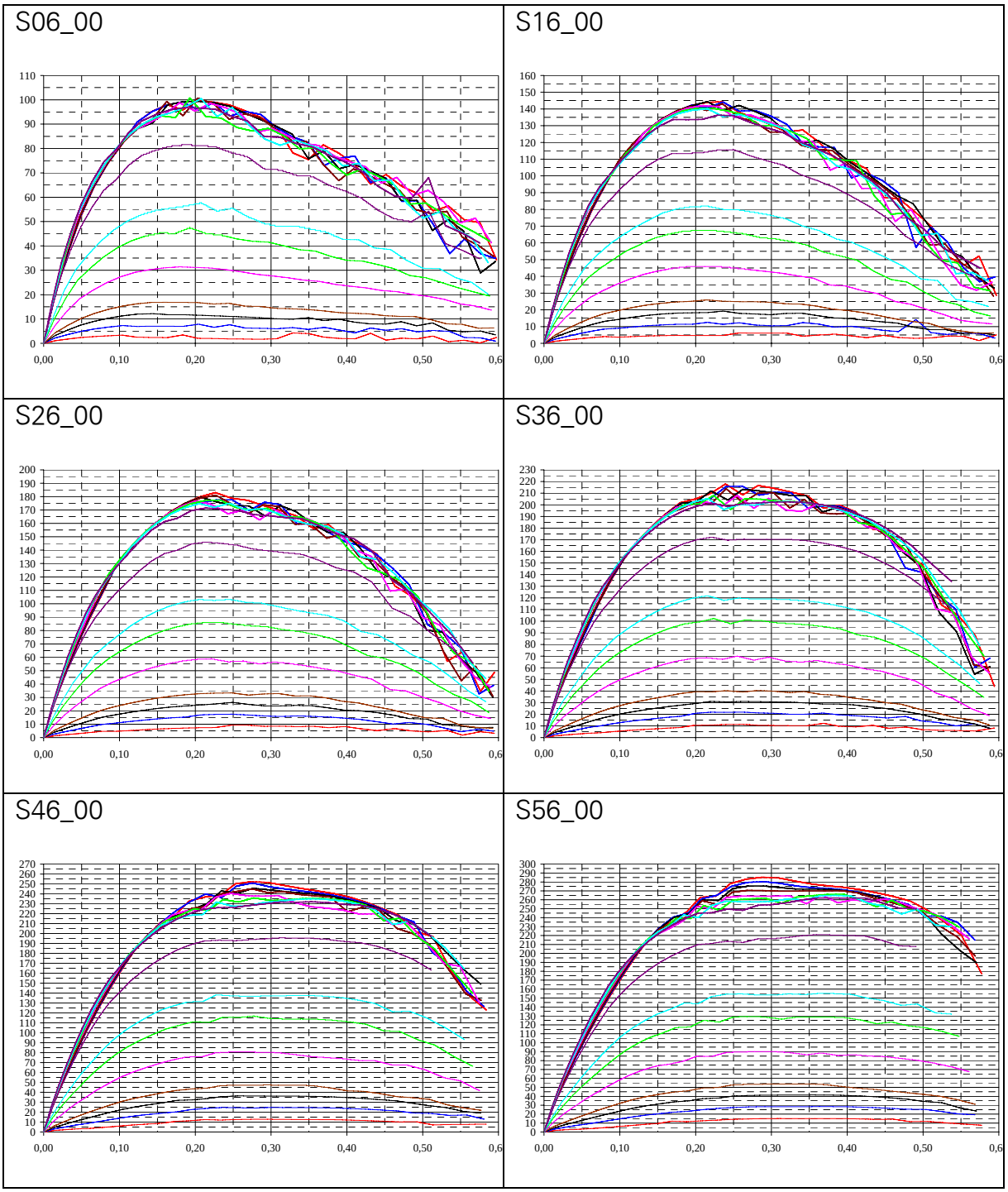


Abbildung 126: Grafik Sx6_00

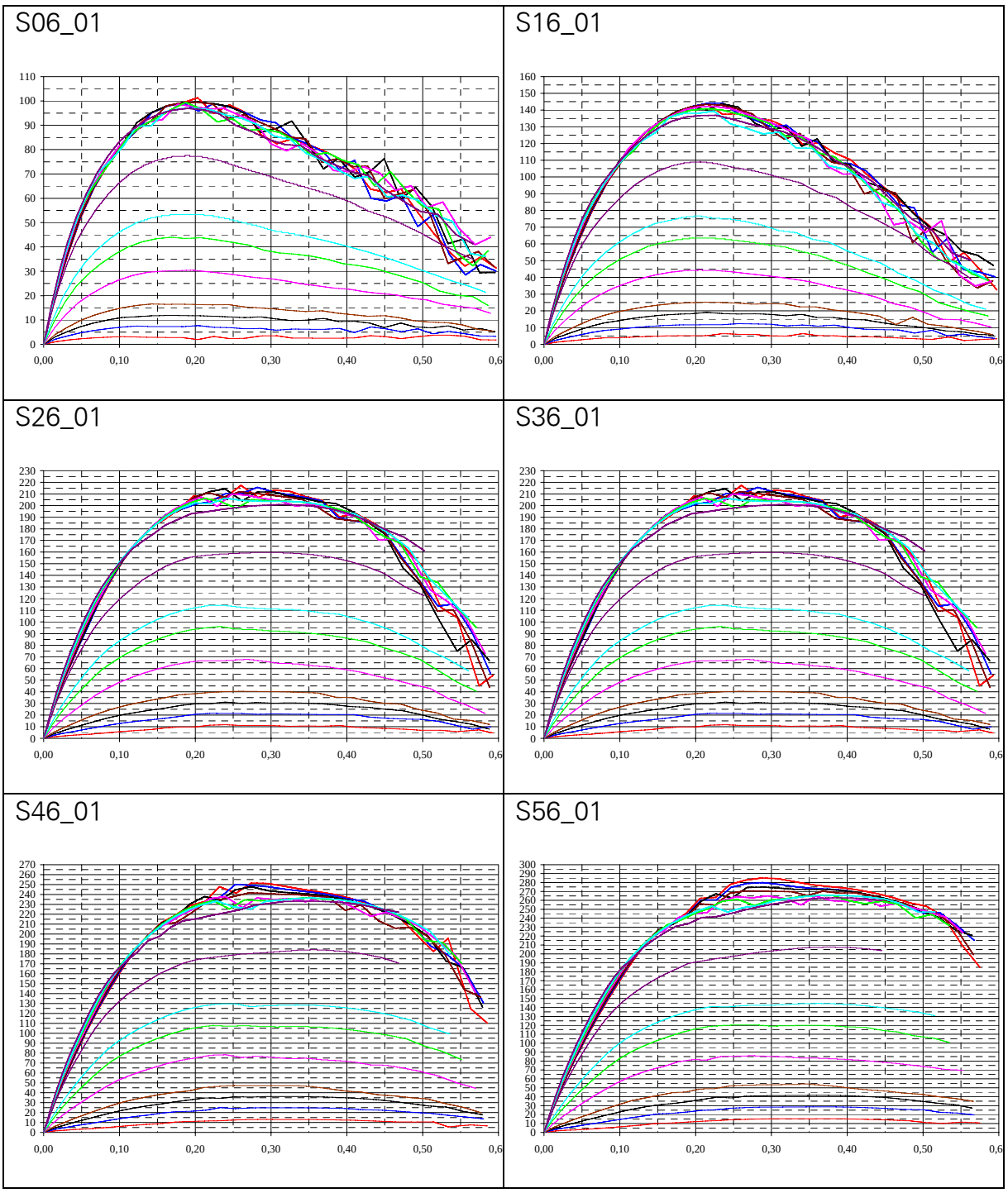


Abbildung 127: Grafik Sx6_01

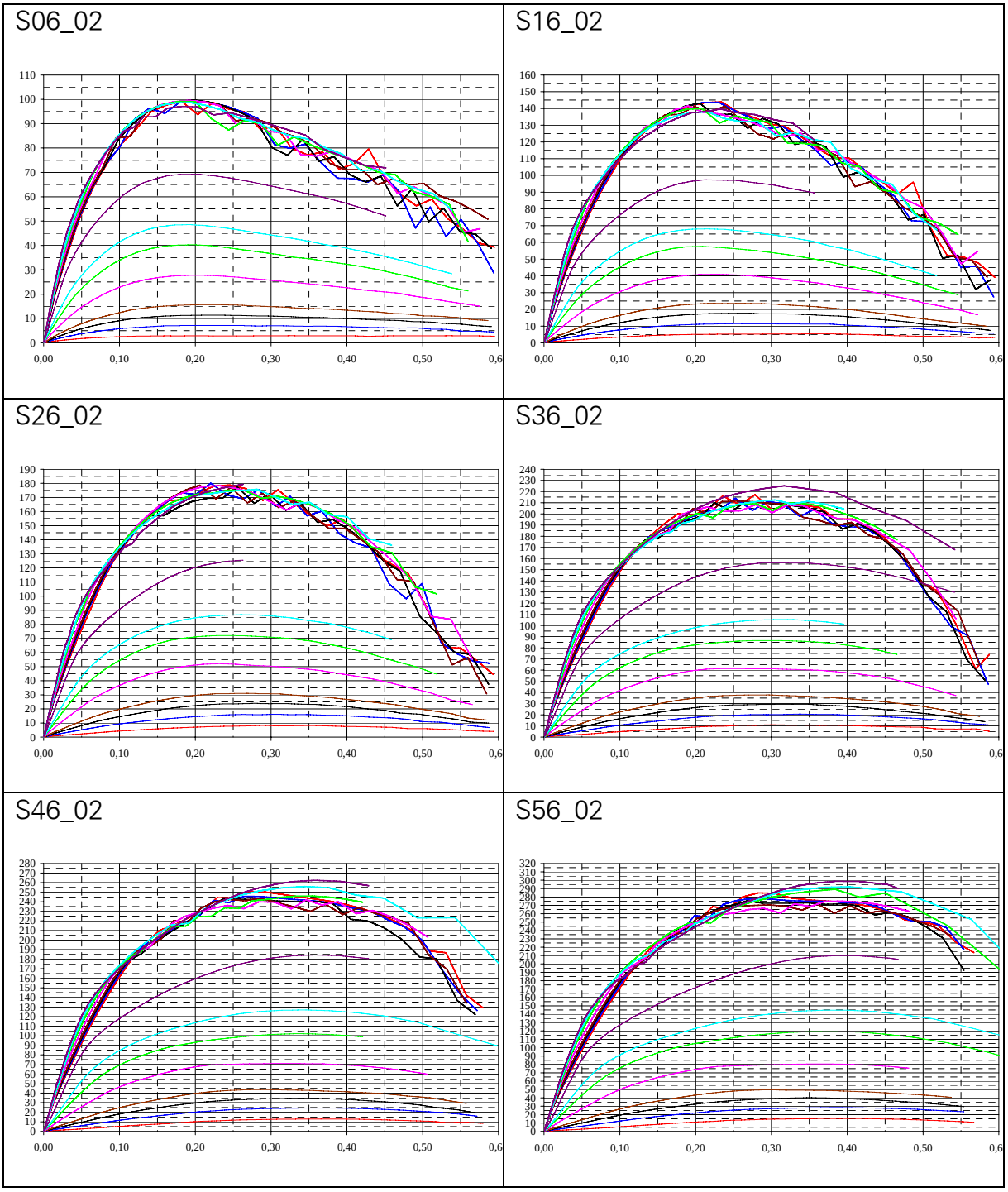


Abbildung 128: Grafik Sx6_02

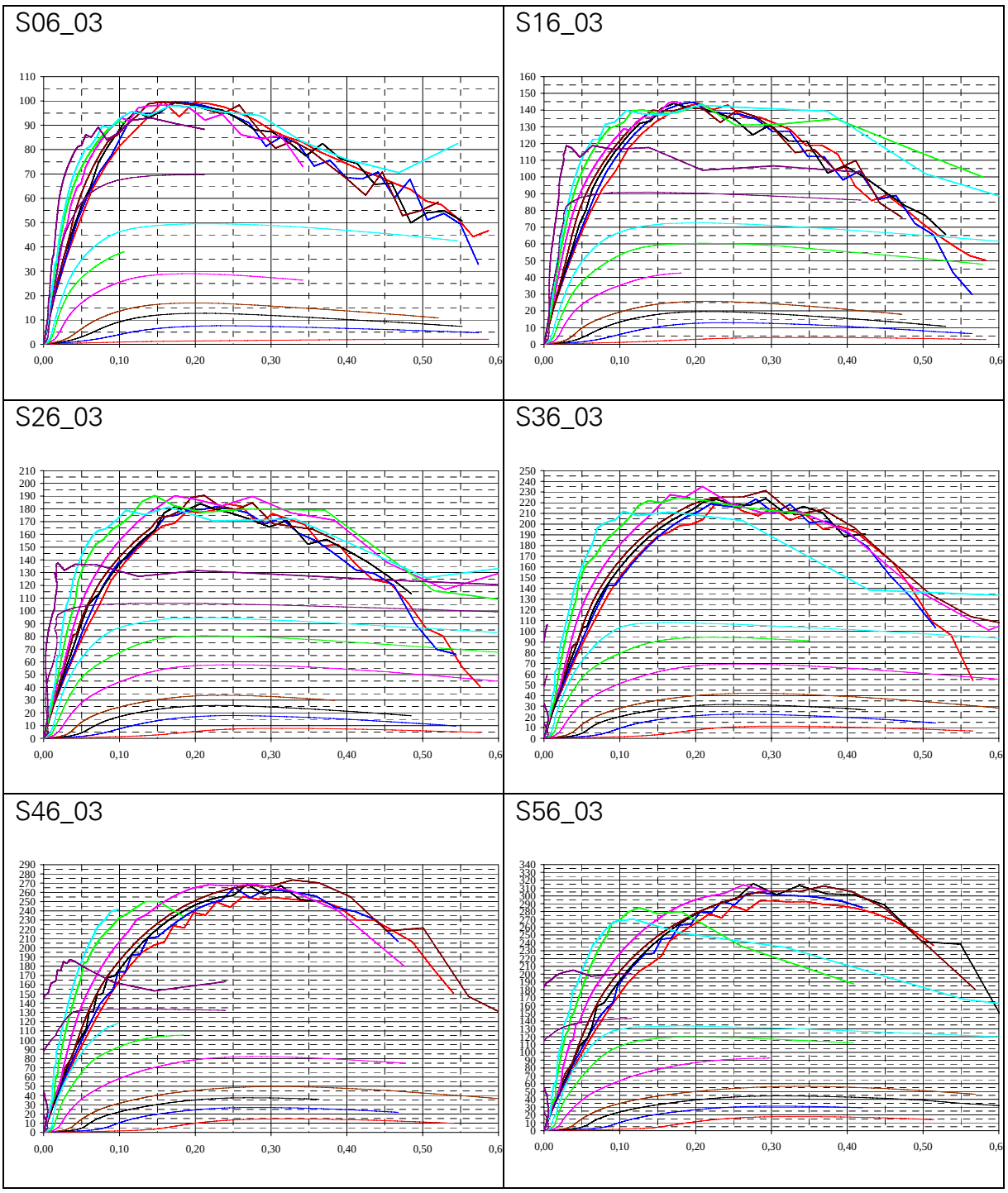


Abbildung 129: Grafik Sx6_03

A4.4 HERLEITUNG DER FORMELN

A4.4.1 ÜBERTRAGBARE LAST VOR DER STIRNSEITE – R_{BASE} UND Φ_{GRENZ}

Als erstes Ergebnis kann festgehalten werden, dass die Versagenslast scheinbar nicht von der Lastexzentrizität abhängig ist. Diese Aussagen kann voll für das System Sx3, also die Systeme mit geringer Einbindetiefe übernommen werden. Lediglich für die geringste Ankersteifigkeitsklasse fällt die Versagenslast mit großen Lastexzentrizitäten ab. Betrachtet man die in Abbildung 130 dargestellten zugehörenden Ankerlasten, so liegt dies nicht daran dass die Ankerlasten unverhältnismäßig groß werden, sondern daran, dass die Verdrehung des Einbauteiles zu groß wird und somit die Last nicht mehr auf die gesamte Stirnfläche verteilt, oder zumindest aufgeteilt werden kann. Diese Vermutung wird auch durch Abbildung 132 unterstützt. Hier kann deutlich abgelesen werden, dass für niedere Betonfestigkeiten ein größerer Drehwinkel zulässig ist. Die zunehmende sprödere Reaktion des höherfesten Betons kann somit als Versagensursache ausgemacht werden.

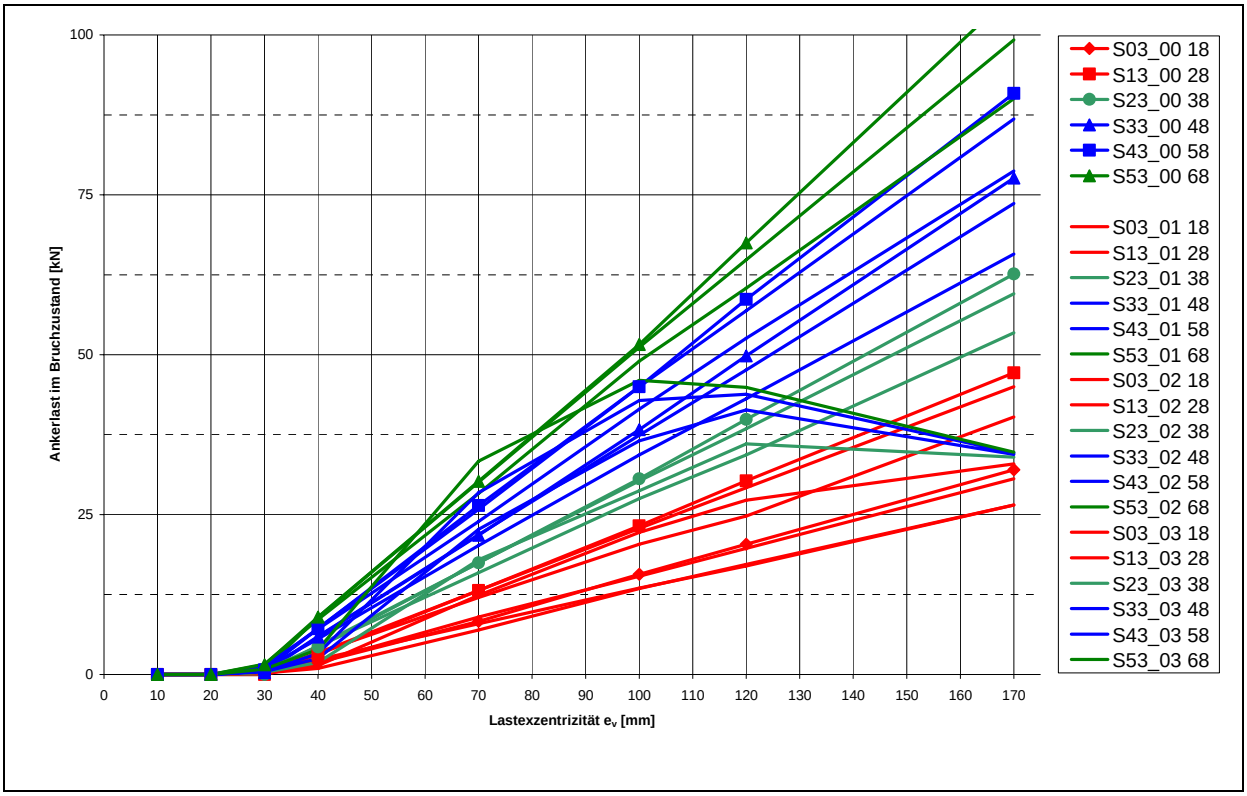


Abbildung 130: Ankerlasten für das System Sx3

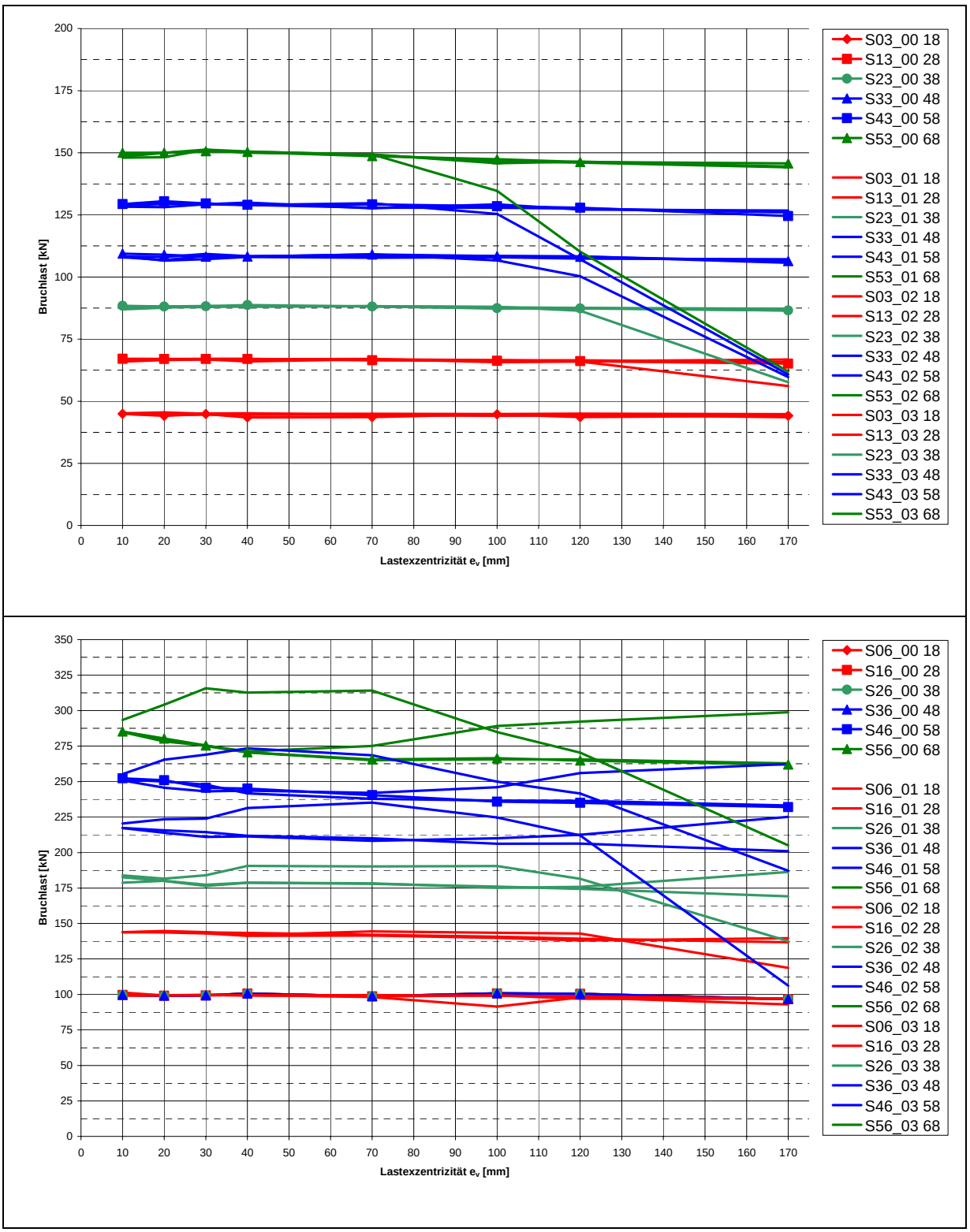


Abbildung 131: Versagenslasten für die Systeme Sx3 und Sx6

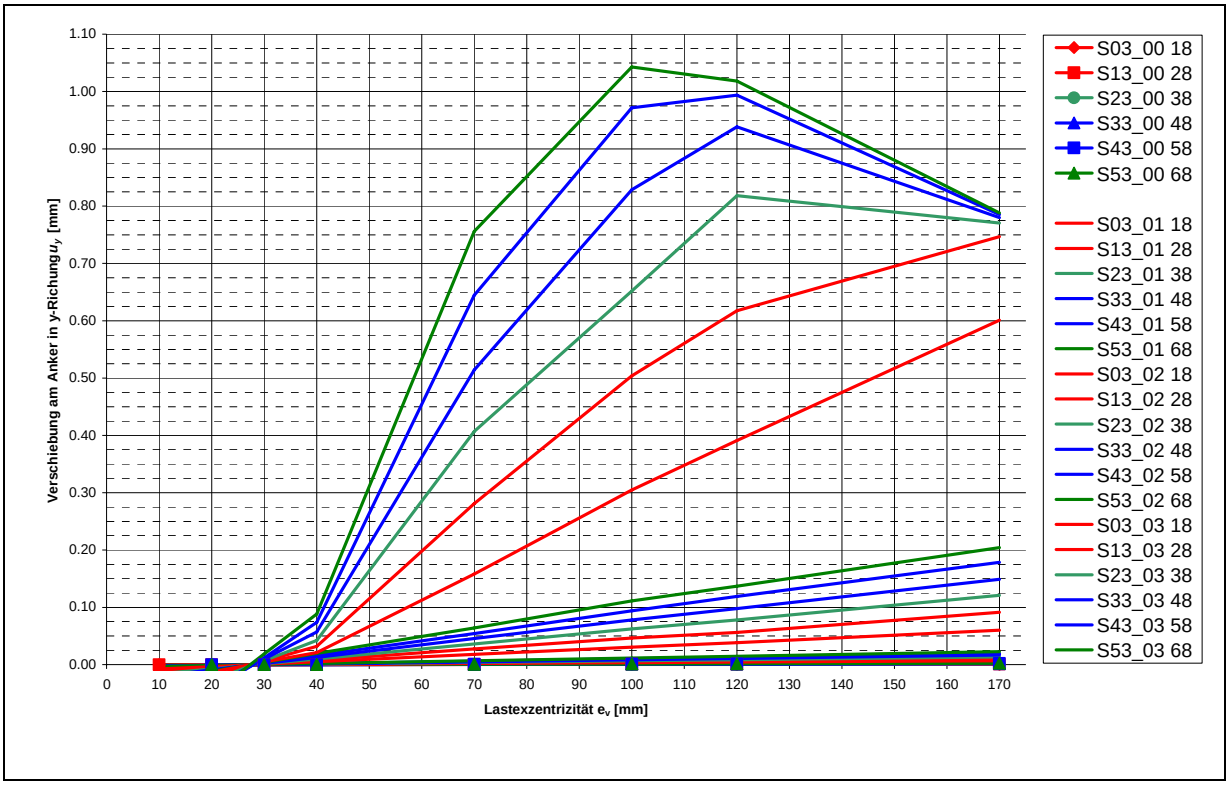


Abbildung 132: Ankerverschiebung für das System Sx3

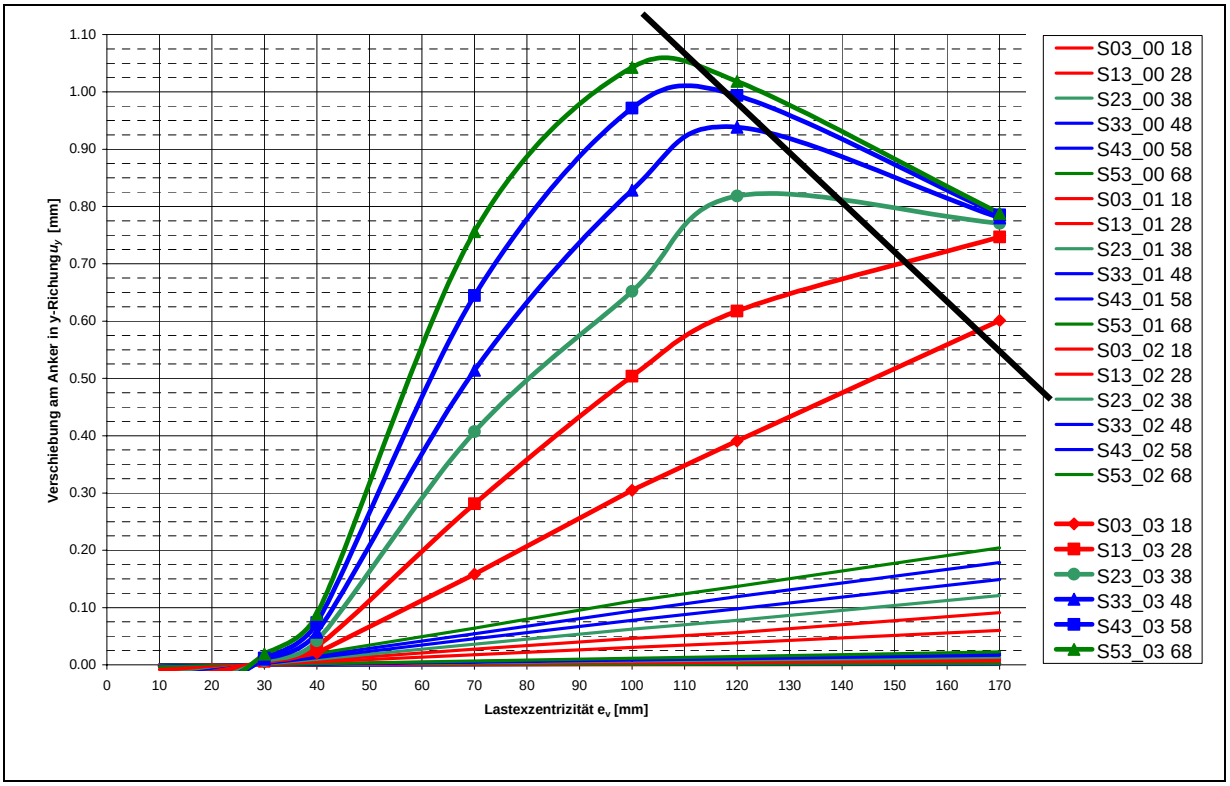


Abbildung 133: Ankerverschiebung für das System Sx3, geglättete Linien

Betrachtet man die Verschiebung am Anker – in Y-Richtung – so erhält man ledig für kleine Ankersteifigkeiten Kurvenverläufe, die sich deutlich vom linearen unterscheiden. Diese kleinen Ankersteifigkeiten kann man aber auch als **große** Ankerverschie-

bungen u_A ausdrücken. Damit lässt sich eine Grenzankerverschiebung angeben, für die die zulässigen Lasten abgemindert werden müssen. Diese Grenzankerverschiebung kann auch als Grenzverdrehung Φ ausgedrückt werden. Aus dem Diagramm erhält man:

Wertetafel: u_y = 1.06 für f_c = 68 N/mm² bzw. e_v = 105 mm

u_y = 0.60 für f_c = 38 N/mm² bzw. e_v = 160 mm

$$u_y = a \cdot e_v + c \qquad u_y = 0.008 \cdot e_v + 0.220$$

mit: $1.06 = a \cdot 105 + c \quad -> \quad a = 0.008$

$0.60 = a \cdot 160 + c \quad -> \quad c = 0.220$

$$u_y = a \cdot f_c + c \qquad u_y = 0.0153 \cdot f_c + 0.0173$$

$$\text{oder } 100 \cdot u_y = 1.5 \cdot f_c + 1.7$$

mit: $1.06 = a \cdot 68 + c \quad -> \quad a = 0.0153$ *(4.13)*

$0.60 = a \cdot 38 + c \quad -> \quad c = 0.0173$

bzw.:

$$\tan\Phi = \frac{u_y}{a_{Anchor} = 260\ mm} = (0.031 \cdot e_v + 0.846) \cdot 10^{-3}$$

$$= (5.896 \cdot f_c + 6.75) \cdot 10^{-5}$$

$$1000 \cdot \tan\Phi = 0.031 \cdot e_v + 0.846 = 0.06 \cdot f_c + 0.07$$

Eine weitere Möglichkeit den Grenzwinkel zu definieren besteht über die Funktion v^*_{BASE}. Erreicht die Verschiebung an der unteren Kante der Grundplatte diesen Wert, so wird die Lastübertragende Fläche reduziert. Vergleiche hierzu den Ansatz der Dehnungs- und Spannungsverteilungen für die Biegebemessung. Leider läst sich diese Verschiebung an der unteren Kante nicht genau bestimmen, da hierzu der Drehpunkt vor der Stirn, also der Lastschwerpunkt bekannt sein müsste. Näherungsweise kann dieser aber zu $h_{Base}/2$ gesetzt werden. Dieser Ansatz führt aber nicht zu brauchbaren Ergebnissen.

$$\Delta u_{unten,Grenz} = v^*_{Base} = \Phi_{Grenz} \cdot \frac{h_{Base}}{2}$$

mit:

$$v^*_{Base} = \frac{0{,}86 \cdot f_c + 73}{1000} \cdot \ln(h_{Base}) - 0{,}135 \qquad (4.14)$$

$$\Phi_{Grenz,v^*_{Base}} = \frac{h_{Base}}{2} \cdot \left(\frac{0{,}86 \cdot f_c + 73}{1000} \cdot \ln(h_{Base}) - 0{,}135 \right)$$

Bestimmt man sich den Grenzwinkel auf der Basis von h_{red}, so erhält man die nebenstehende Wertetafel:

Auswertung "Stanze Anker System Sx3 und Sx6"

	f_c [N/mm²]	h_{Base} [mm]	tanΦGrenz
S23_03_h	38	20	0.00270041
S33_03_h	48	20	0.00230151
S43_03_h	58	20	0.00197941
S53_03_h	68	20	0.00174576
S36_03_h	48	50	0.00335765
S56_03_h	68	50	0.01100942

Es gilt:

$$h_{Base} = 20 \text{ mm}: \quad \tan\Phi_{Grenz} = -3{,}186 \cdot 10^{-5} \cdot (f_c - 121{,}4789)$$
$$h_{Base} = 50 \text{ mm}: \quad \tan\Phi_{Grenz} = 3{,}825885 \cdot 10^{-4} \cdot (f_c - 39{,}223455)$$

allgemein: $\tan\Phi_{Grenz} = a \cdot f_c + b$

mit:

$$a = -16{,}3316 \cdot 10^{-5} + 0{,}1562997 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{h_{Base}^{\ 3}} \qquad (4.15)$$
$$a = 1{,}381495 \cdot 10^{-5} \cdot h_{Base} - 30{,}8159 \cdot 10^{-5}$$
$$b = 0{,}009857 - 7{,}11865 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{h_{Base}^{\ 3}}$$
$$b = -0{,}0006292 \cdot h_{Base} + 0{,}016454$$

$$\tan\Phi_{Grenz} = a \cdot f_c + b$$

mit:

$$a = -16{,}5 \cdot 10^{-5} + 0{,}155 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{h_{Base}^{\ 3}} \qquad (4.16)$$
$$b = 0{,}01 - 7{,}10 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{h_{Base}^{\ 3}}$$

Auswertung "Stanze Anker System Sx3 und Sx6"	f_c [N/mm²]	h_{Base} [mm]	tanΦGrenz ist	tanΦGrenz soll
S23_03_h	38	20	0.00265	0.00270041
S33_03_h	48	20	0.00238	0.00230151
S43_03_h	58	20	0.00212	0.00197941
S53_03_h	68	20	0.00186	0.00174576
S36_03_h	48	50	0.00328	0.00335765
S56_03_h	68	50	0.01094	0.01100942

$$\tan\Phi_{Grenz} = a_{\Phi} \cdot h_{Base} \cdot \sqrt[3]{f_c^{\,2}}$$

mit:

$$a_{\Phi} = 2{,}0 \cdot 10^{-5} \Big/ f_c^{0{,}08}$$

oder: *(4.17)*

$$\tan\Phi_{Grenz} = 2{,}0 \cdot 10^{-5} \cdot h_{Base} \cdot f_c^{0{,}587}$$

h_{Base} [mm]

f_c [N/mm²]

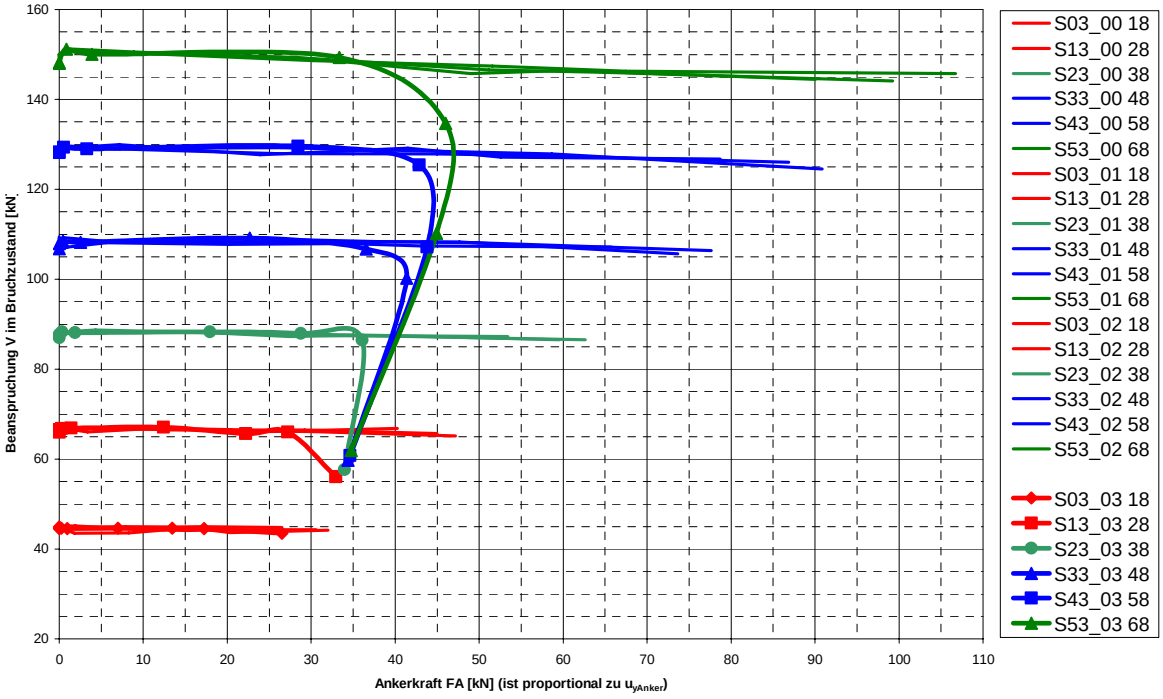


Abbildung 134: V über F_{Anker} für System Sx3.

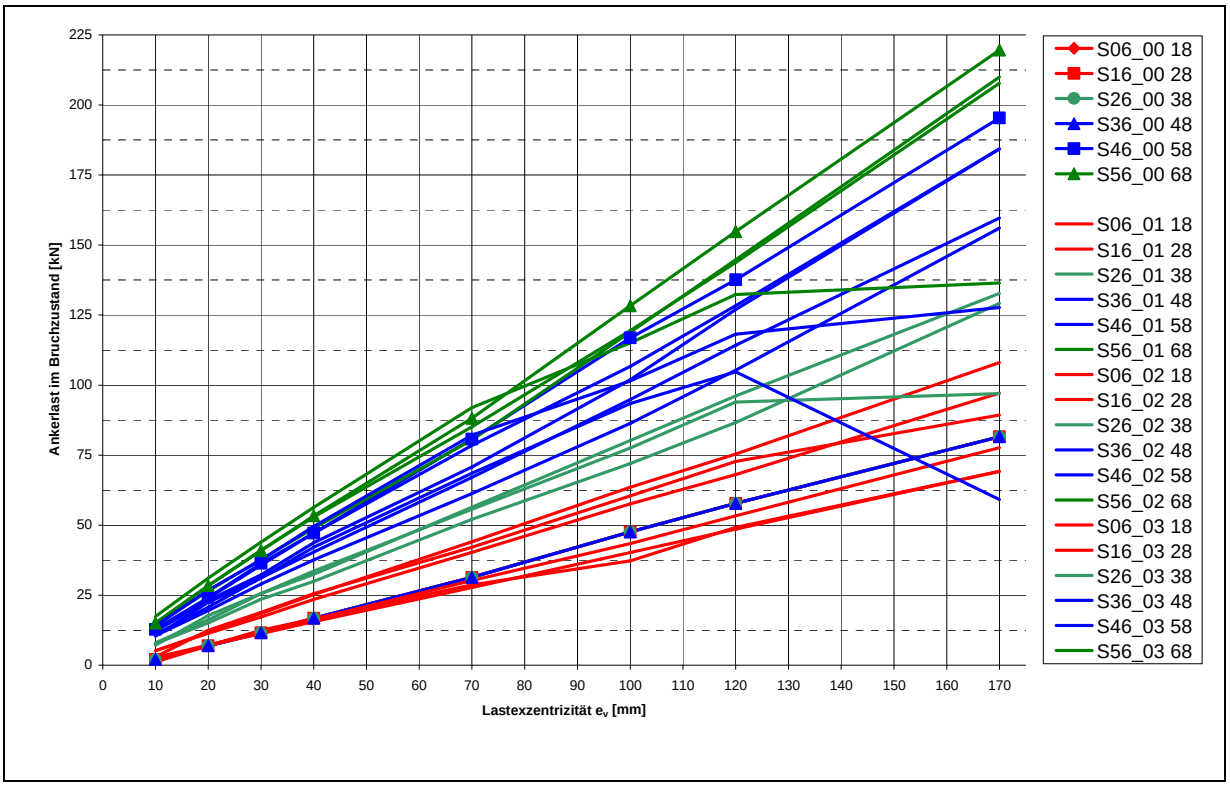


Abbildung 135: Ankerlasten für das System Sx6.

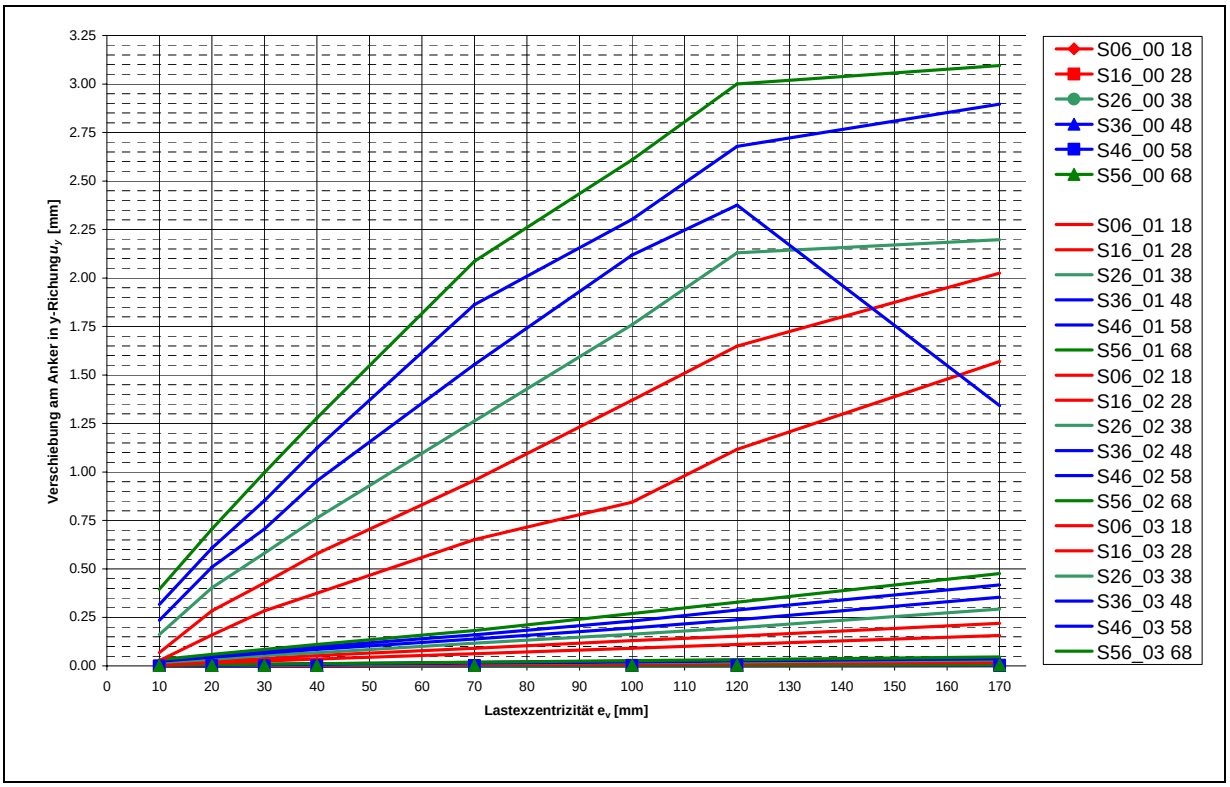


Abbildung 136: Ankerverschiebung für das System Sx6.

A4.4.2 ÜBERTRAGBARE SPANNUNG VOR DER STIRN – σ_{BASE}

siehe Kapitel „e_{Base} – Lastangriff vor der Stirn“

A4.4.3 LASTANGRIFF VOR DER STIRN – E_{BASE} –

Der Lastangriff vor der Stirn wird entscheidend durch den Verdrehwinkel Φ bestimmt. Dieser gibt die Größe der Verschiebungsdifferenz zwischen Oberkante der Grundplatte und Unterkante der Grundplatte vor. Aufgrund der E-Modul-Verhältnisse der hier beteiligten Materialien Stahl und Beton, ist es ausreichend hier lediglich die Verformungen im Beton zu berücksichtigen. Weiter oben wurde der Grenzdrehwinkel für die Systeme Sx3 bestimmt, also die Systeme mit einer Einbindetiefe von 20 mm. Übersetzt man den Grenzdrehwinkel in eine konstante Verschiebungsdifferenz zwischen Oberkante der Grundplatte und Unterkante der Grundplatte, so lässt sich der Grenzdrehwinkel in Abhängigkeit zu der Grundplattenhöhe darstellen:

$$\Delta u = tan\Phi \cdot h_{Base} = konst.$$

$$tan\Phi_{20} \cdot 20\text{ mm} = tan\Phi \cdot h_{Base}$$

$$\text{mit:}\quad 1000 \cdot tan\Phi_{20} = 0{,}06 \cdot f_c + 0{,}07 \simeq 0{,}06 \cdot (f_c + 1) \qquad (4.18)$$

$$tan\Phi = \frac{0{,}06 \cdot f_c + 0{,}07}{1000} \cdot \frac{20}{h_{Base}} = \frac{0{,}06 \cdot f_c + 0{,}07}{50 \cdot h_{Base}}$$

$$1000 \cdot tan\Phi = \frac{1{,}2 \cdot f_c + 1{,}35}{h_{Base}} \simeq \frac{1{,}2 \cdot (f_c + 1)}{h_{Base}}$$

Im Weiteren soll jedoch mit der Definition des Grenzdrehwinkels nach Gleichung (4.17) gearbeitet werden.

Dieser Grenzdrehwinkel stellt sicher, dass die gesamte Grundplattenhöhe sich an der Lastübertragung beteiligen kann. Wird dieser Winkel überschritten, so muss die lastübertragende Höhe reduziert werden. Aus der Grenzwinkelbeziehung kann das maximal mögliche Δu ermittelt werden. Mit dem vorhandenen Drehwinkel ergibt sich dann die Lastübertragende Höhe *x,* in Analogie zur Druckzonenhöhe beim Biegebalken. Und mit dem vereinfachenden Ansatz eines Spannungsblocke erhält man die Lage und die Größe der Resultierenden vor der Grundplatte.

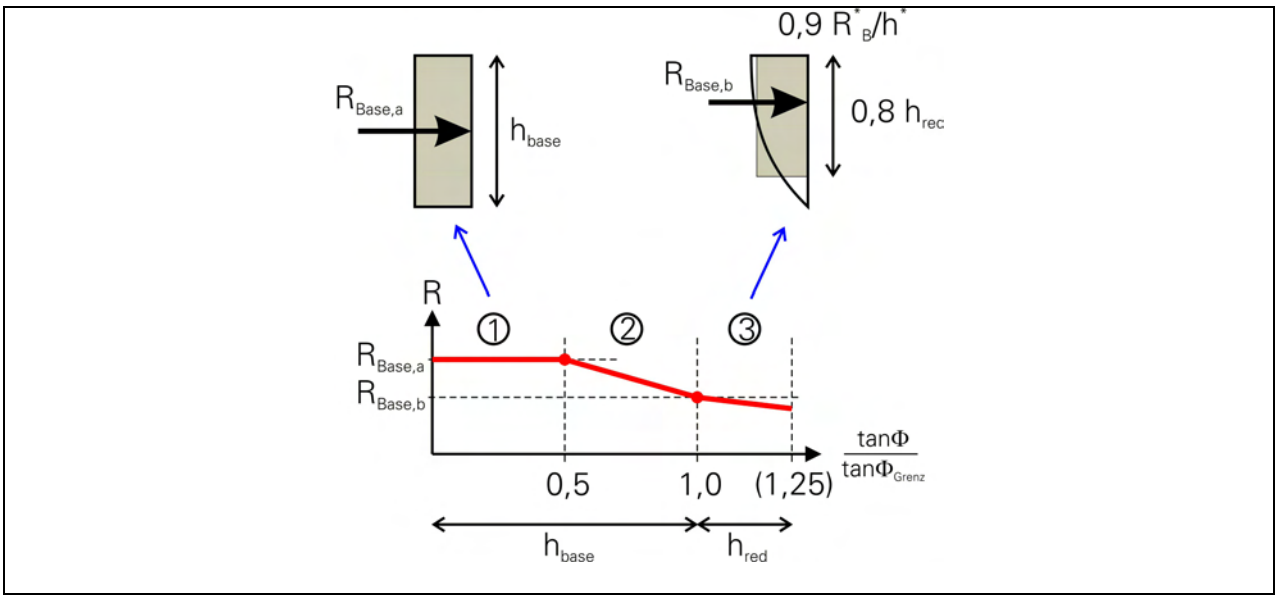


Abbildung 137: Abminderung R_{Base} in Abhängigkeit zu Φ_{Grenz}

$$tan\Phi \leq 0{,}5 \cdot tan\Phi_{Grenz}$$
$$R_{Base,a} = \sigma^*_{Base} \cdot b_{Base} \cdot h_{Base}$$

$$tan\Phi = tan\Phi_{Grenz}$$
$$R_{Base,b} = 0{,}9 \cdot \sigma^*_{Base} \cdot b_{Base} \cdot 0{,}8 \cdot h_{Base}$$

$$0{,}5 \cdot tan\Phi_{Grenz} < tan\Phi < tan\Phi_{Grenz} \qquad (4.19)$$

interpolieren zwischen $R_{Base,a}$ und $R_{Base,b}$

$$tan\Phi > tan\Phi_{Grenz}$$
$$R_{Base} = 0{,}9 \cdot \sigma^*_{Base} \cdot b_{Base} \cdot 0{,}8 \cdot h_{red}$$
$$h_{red} = \frac{tan\Phi_{Grenz}}{tan\Phi} \cdot h_{Base}$$

mit

$$\sigma^*_{Base} = \left(\frac{255 \cdot f_c}{234 + f_c} + \frac{4{,}0 \cdot f_c - 3{,}2}{h_{Base}} \right) \qquad \textit{siehe Gleichung (4.10)}$$

A4.4.4 VERSCHIEBUNGEN – V^*_{BASE} BZW U_X

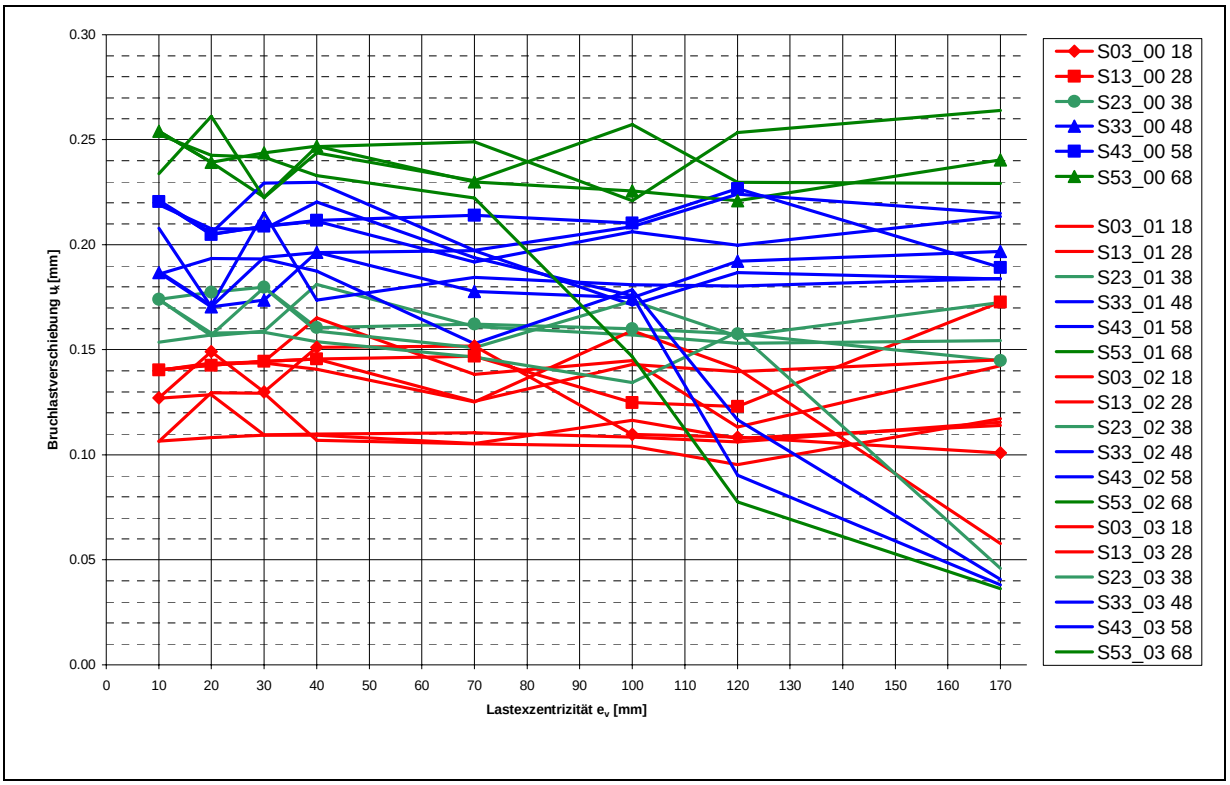


Abbildung 138: Bruchlastverschiebung über Lastexzentrizität, Systeme Sx3, 20 mm.

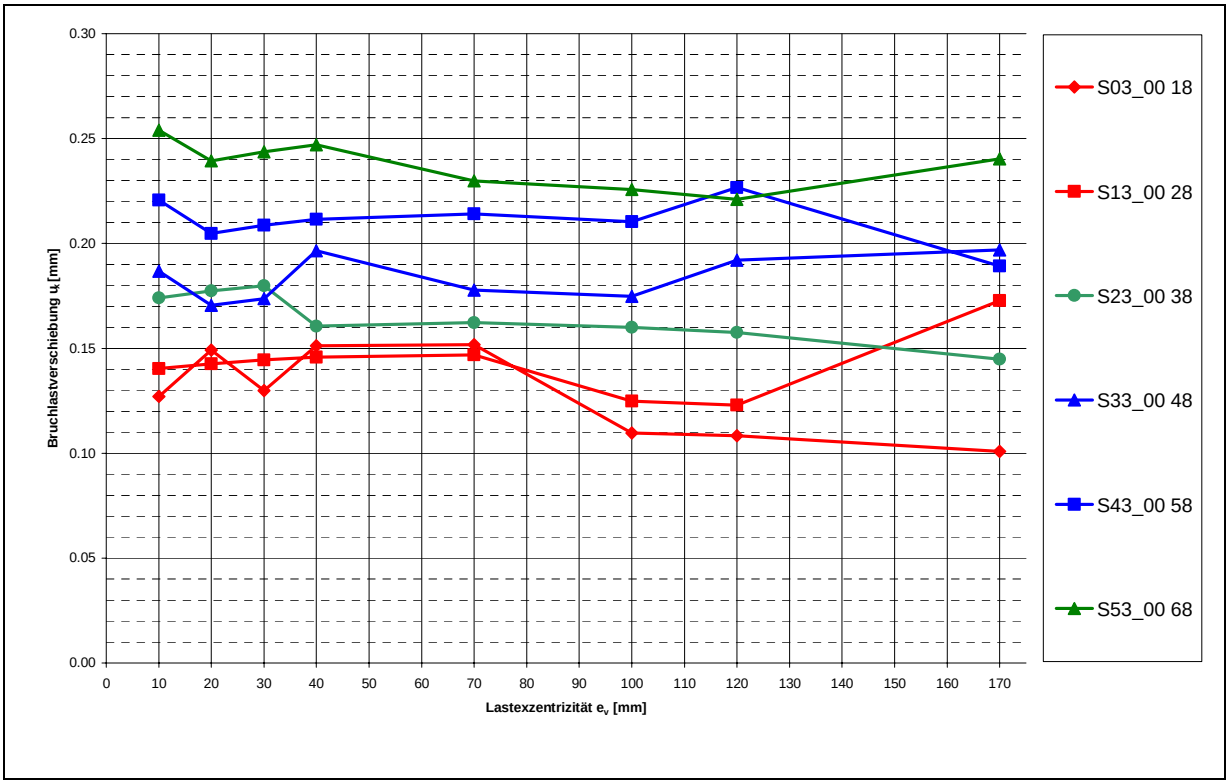


Abbildung 139: Bruchlastverschiebung über Lastexzentrizität, nur Sx3_00.

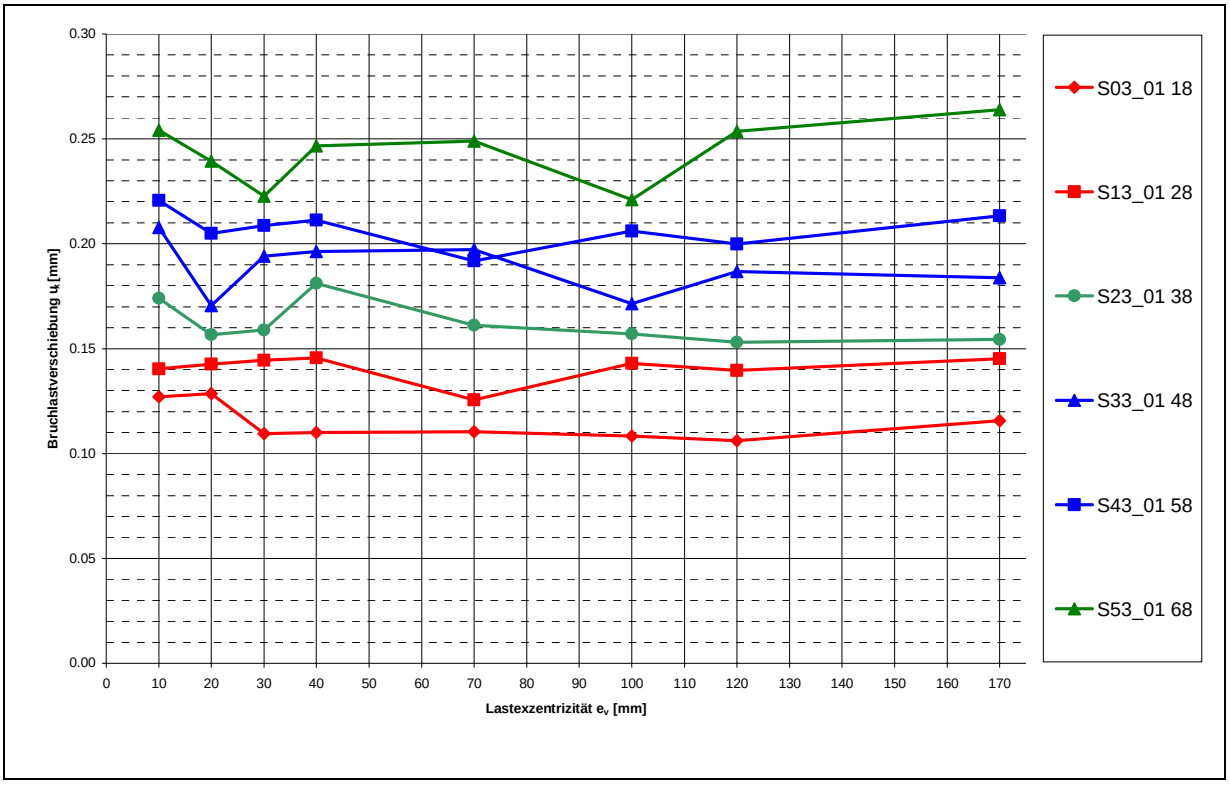


Abbildung 140: Bruchlastverschiebung über Lastexzentrizität, nur Sx3_01.

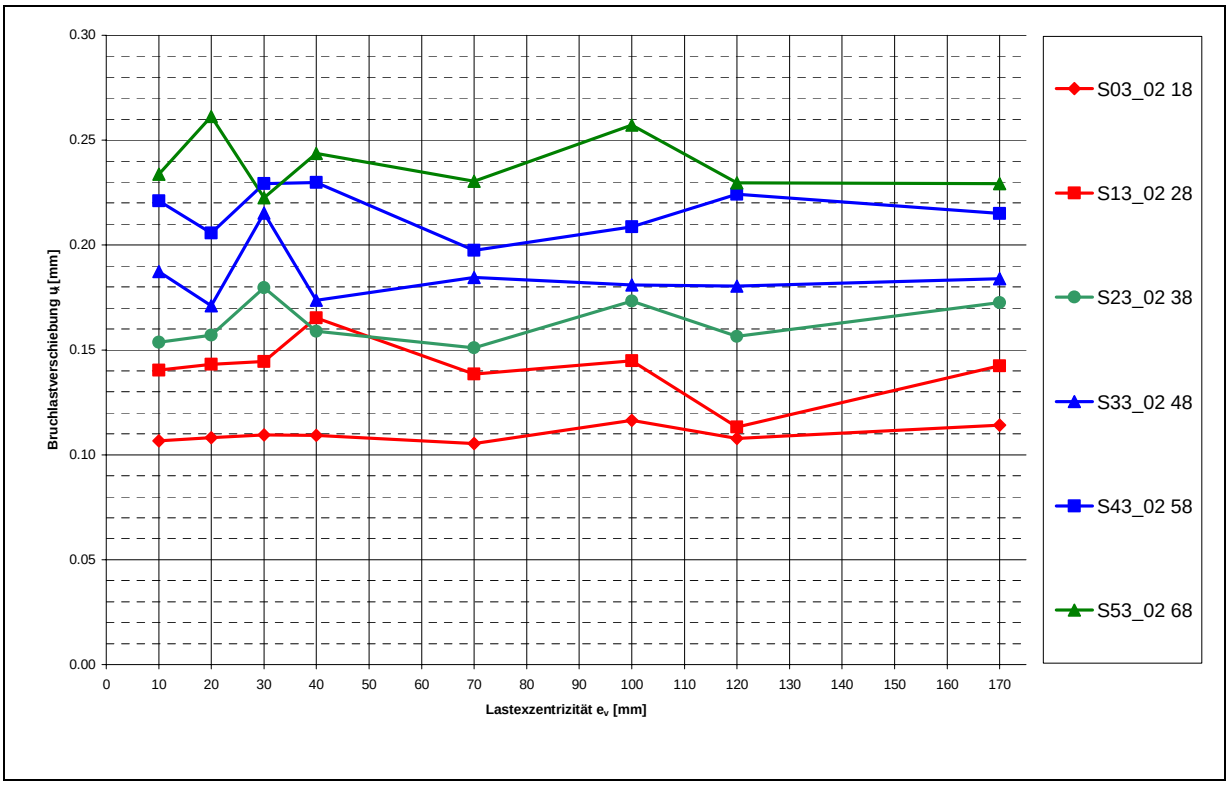


Abbildung 141: Bruchlastverschiebung über Lastexzentrizität, nur Sx3_02.

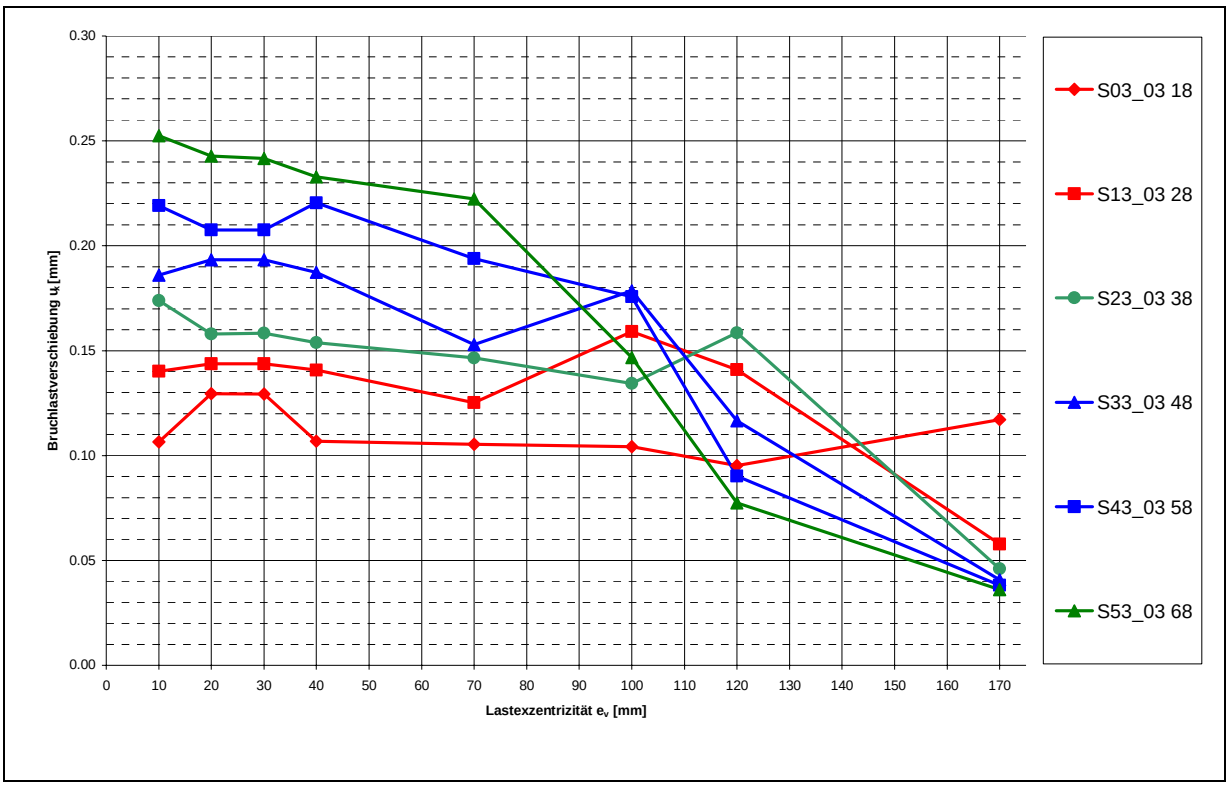


Abbildung 142: Bruchlastverschiebung über Lastexzentrizität, nur Sx3_03.

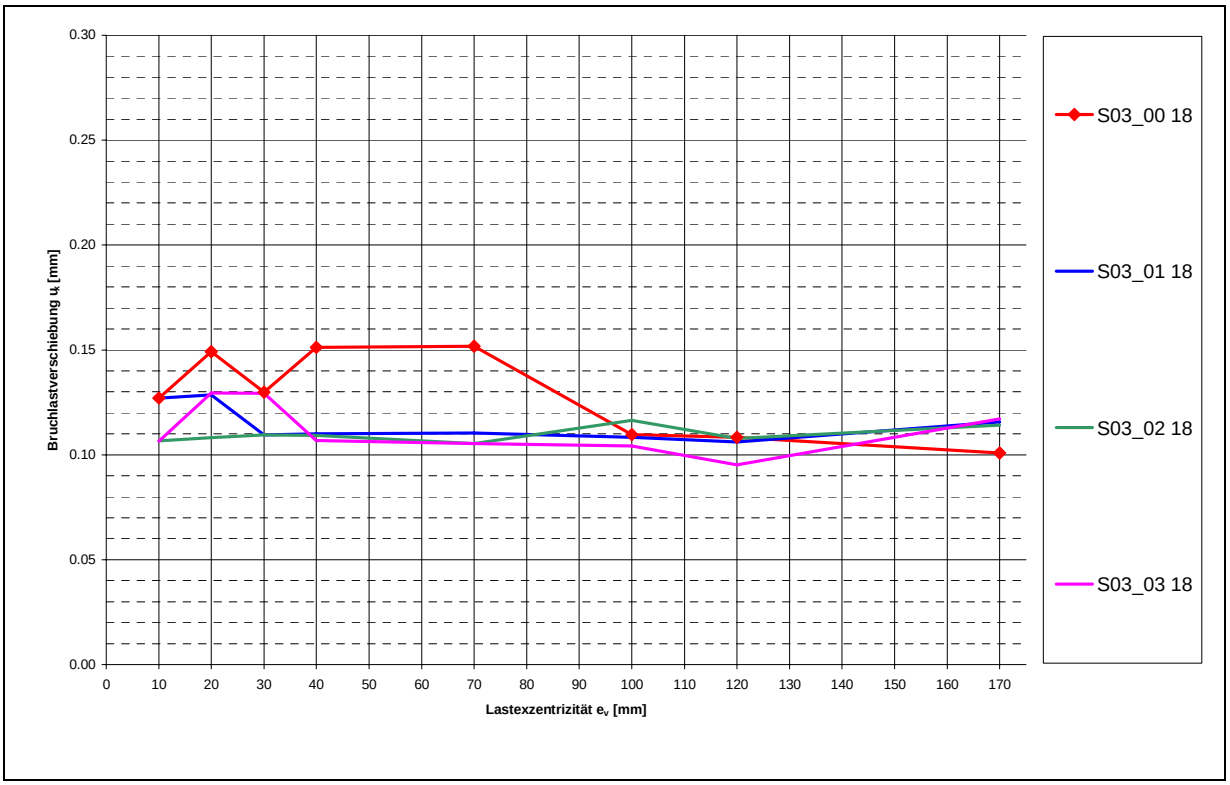


Abbildung 143: Bruchlastverschiebung über Lastexzentrizität, nur S03.

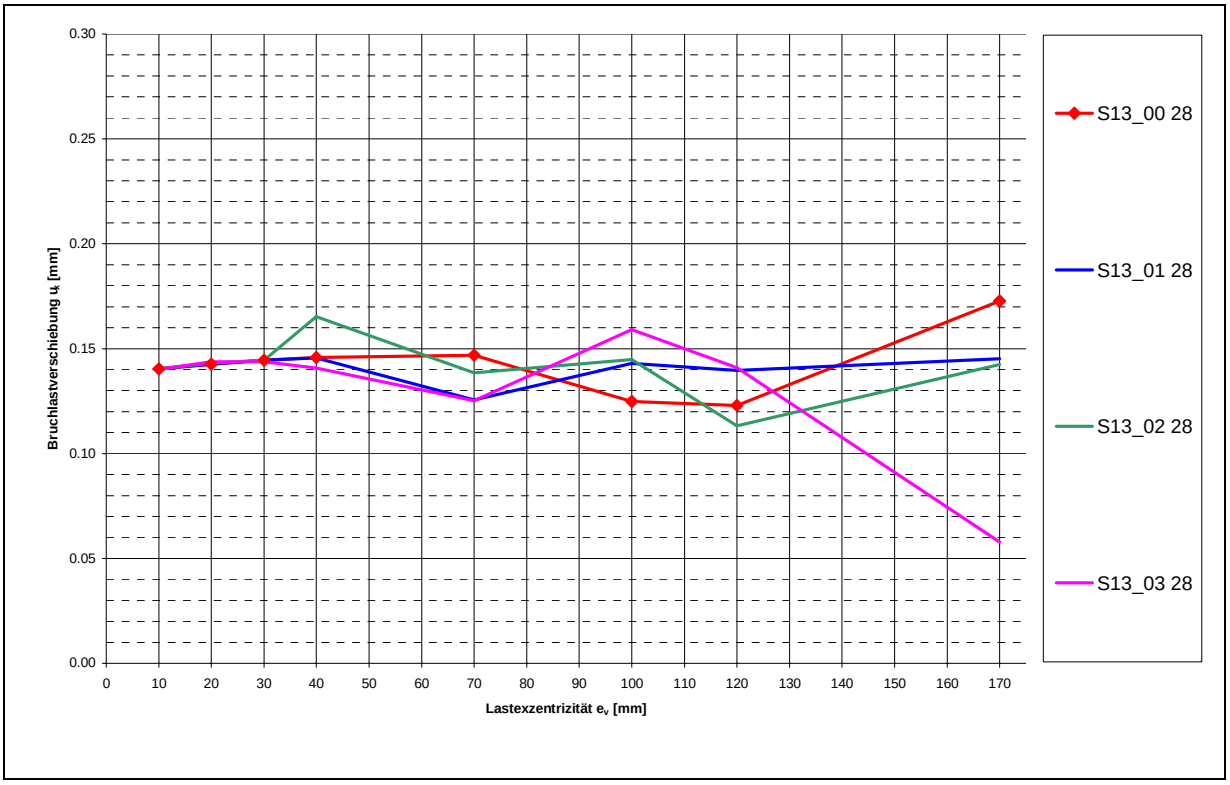


Abbildung 144: Bruchlastverschiebung über Lastexzentrizität, nur S13.

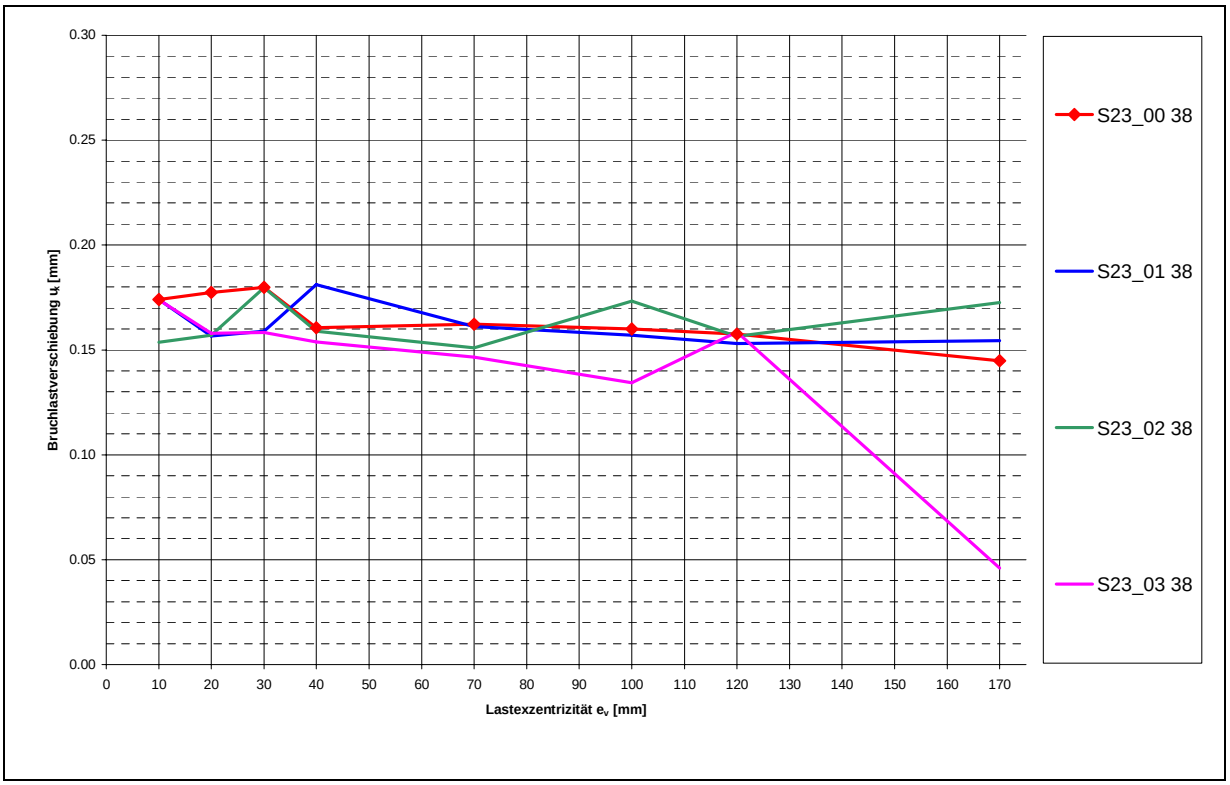


Abbildung 145: Bruchlastverschiebung über Lastexzentrizität, nur S23.

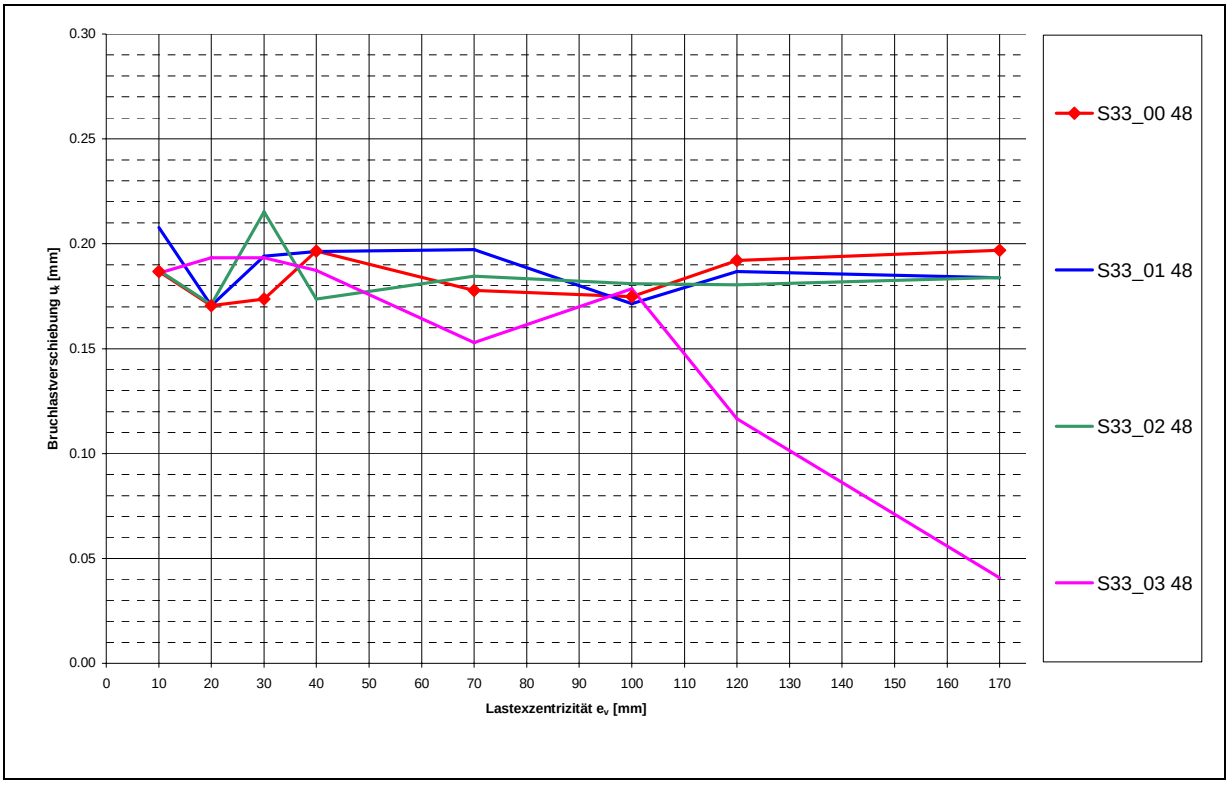


Abbildung 146: Bruchlastverschiebung über Lastexzentrizität, nur S33.

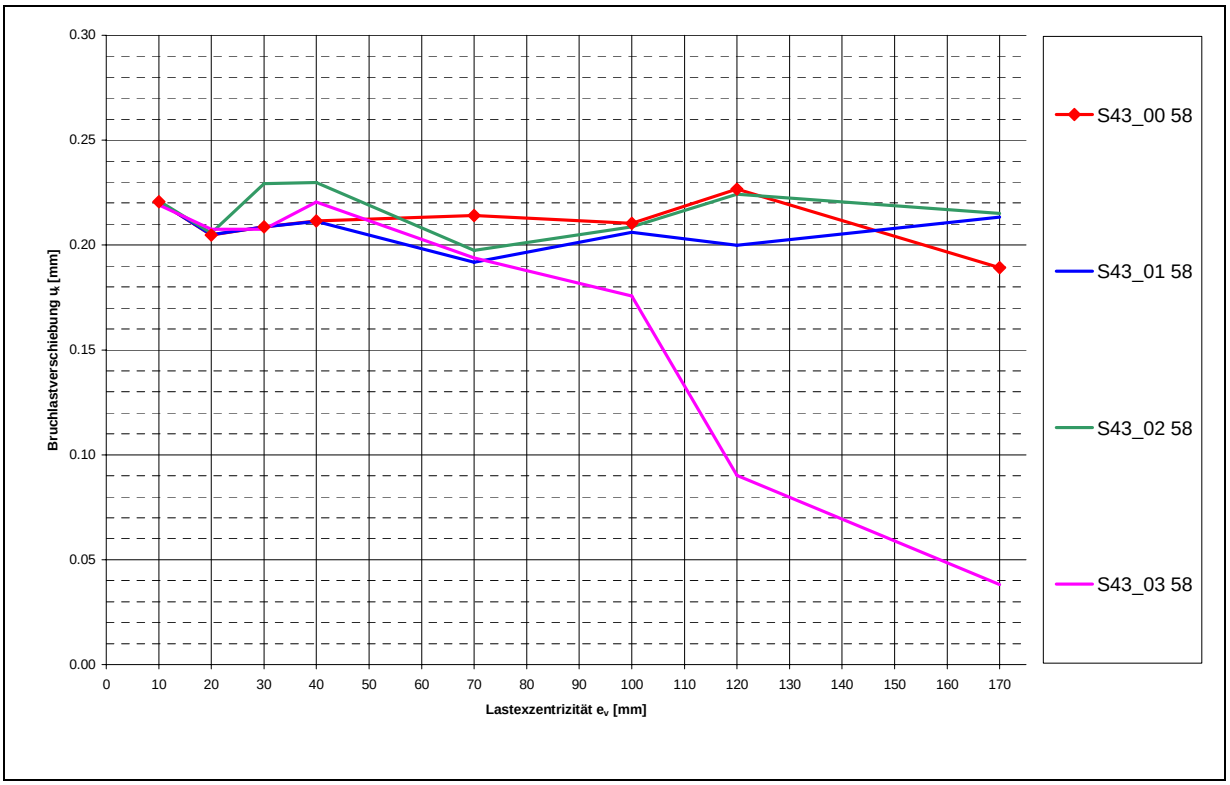


Abbildung 147: Bruchlastverschiebung über Lastexzentrizität, nur S43.

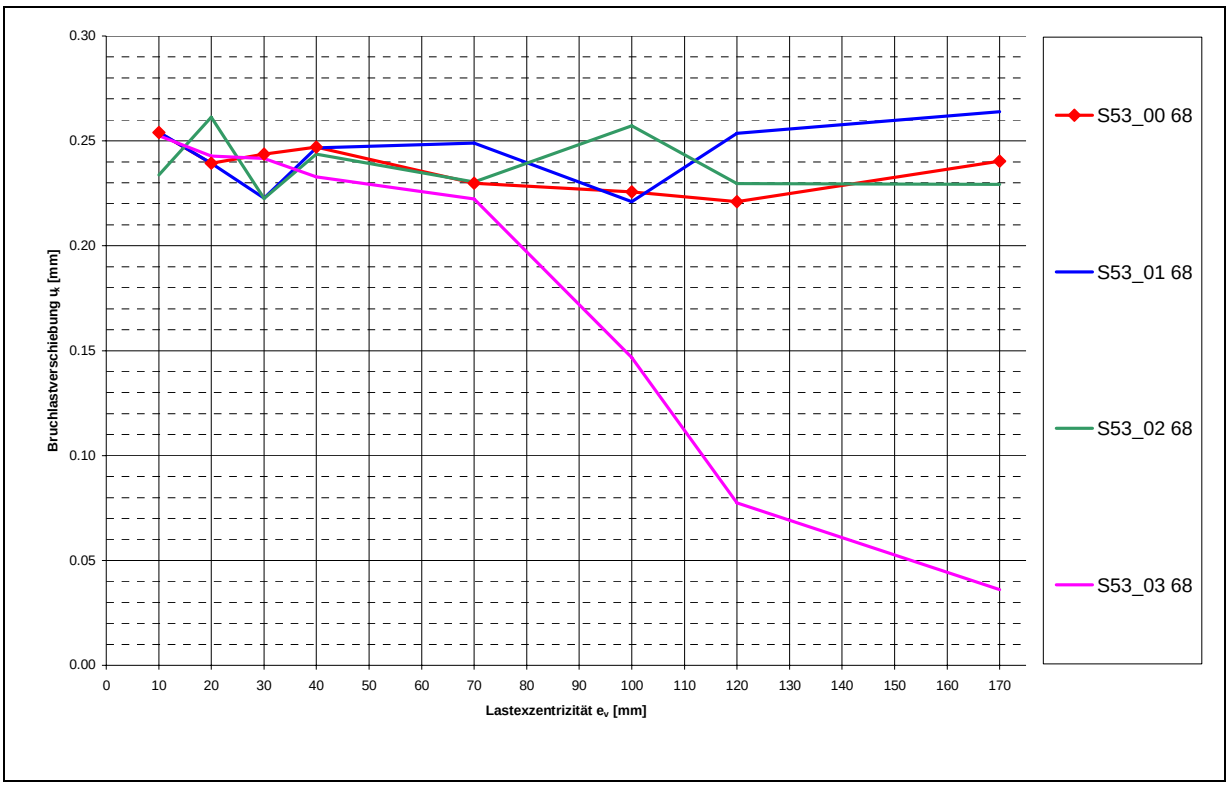


Abbildung 148: Bruchlastverschiebung über Lastexzentrizität, nur S53.

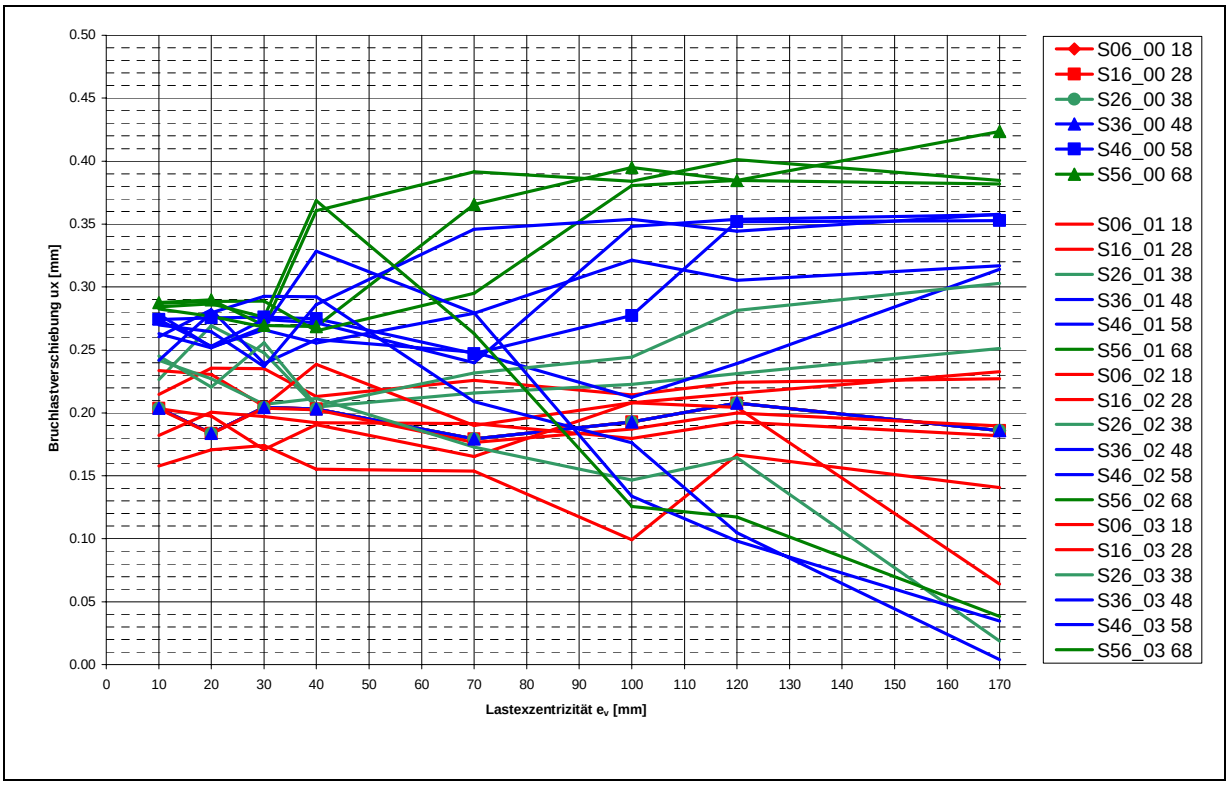


Abbildung 149: Bruchlastverschiebung über Lastexzentrizität, Systeme Sx6, 50 mm.

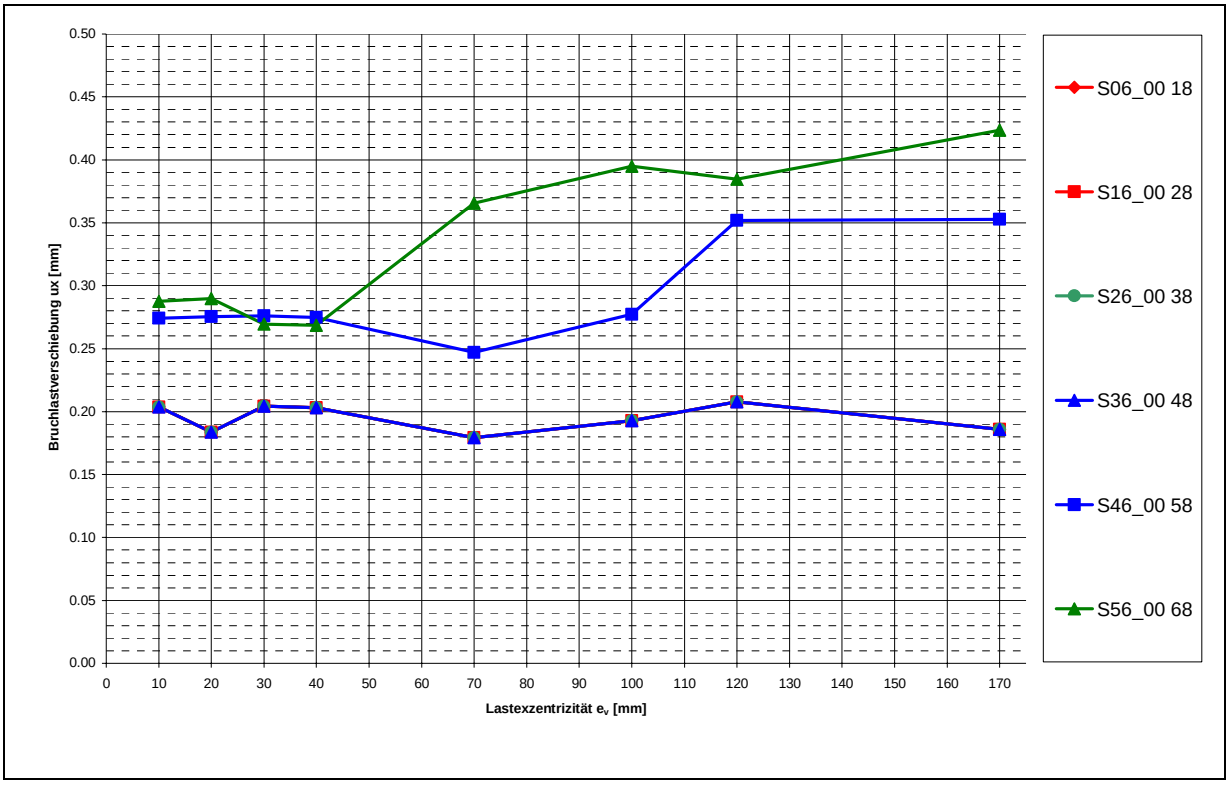


Abbildung 150: Bruchlastverschiebung über Lastexzentrizität, nur Sx6_00.

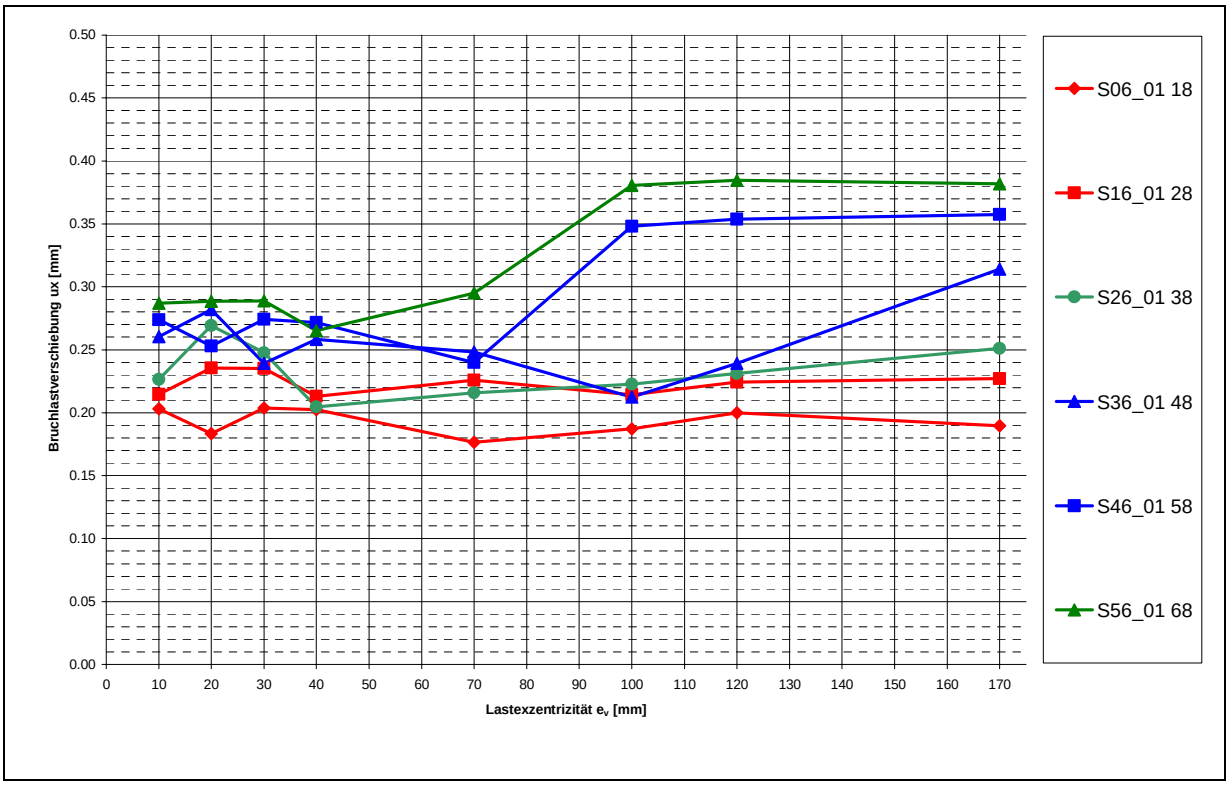


Abbildung 151: Bruchlastverschiebung über Lastexzentrizität, nur Sx6_01.

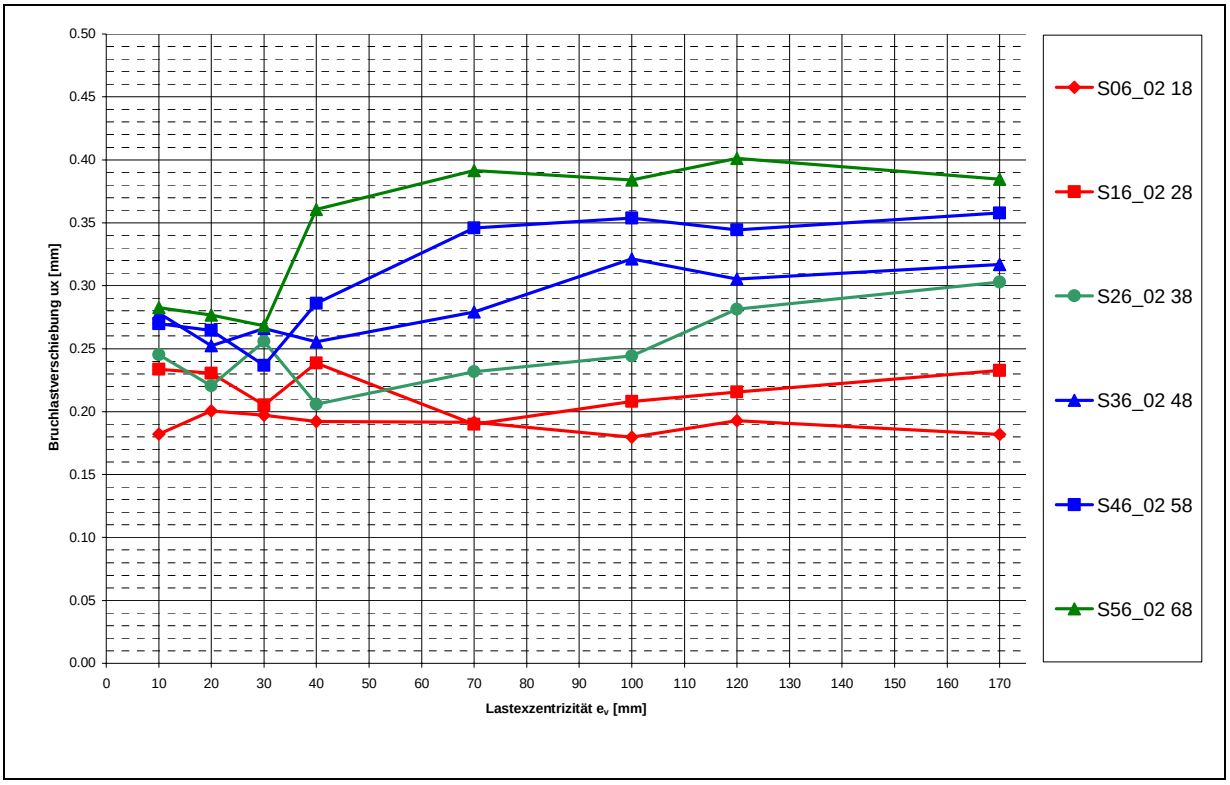


Abbildung 152: Bruchlastverschiebung über Lastexzentrizität, nur Sx6_02.

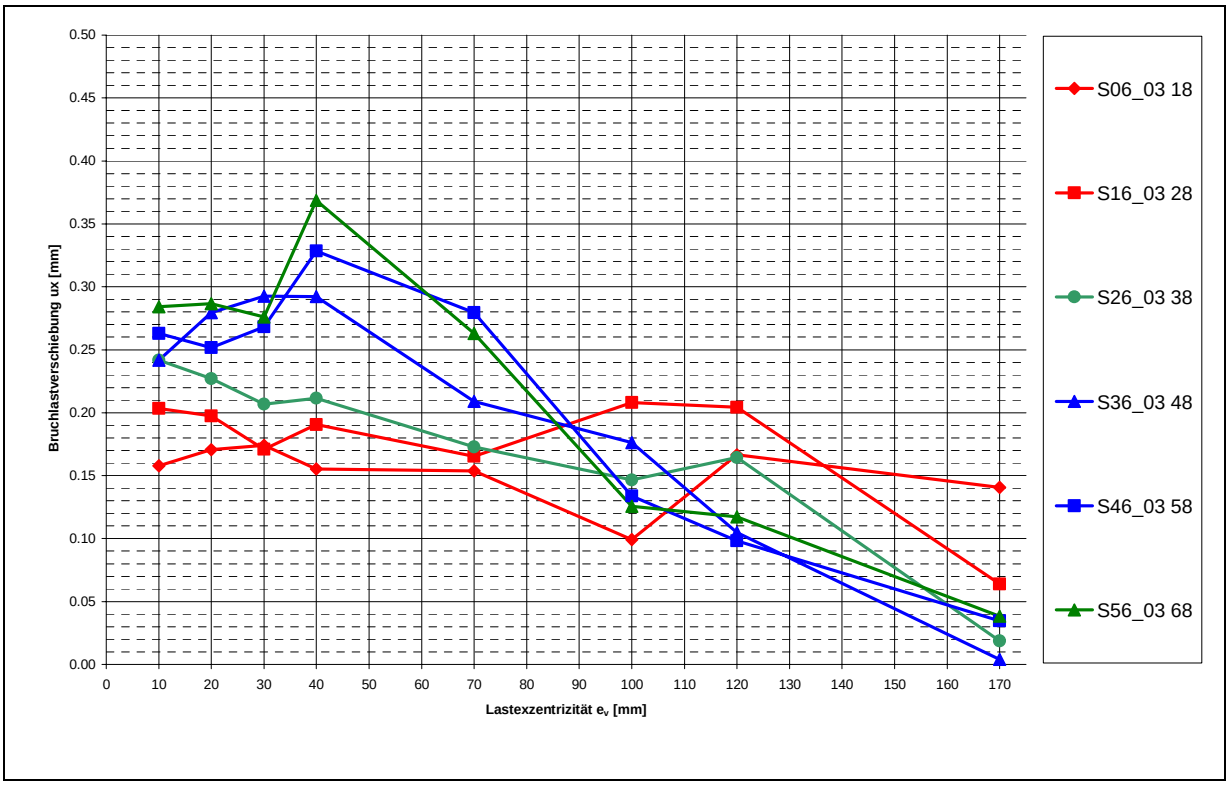


Abbildung 153: Bruchlastverschiebung über Lastexzentrizität, nur Sx6_03.

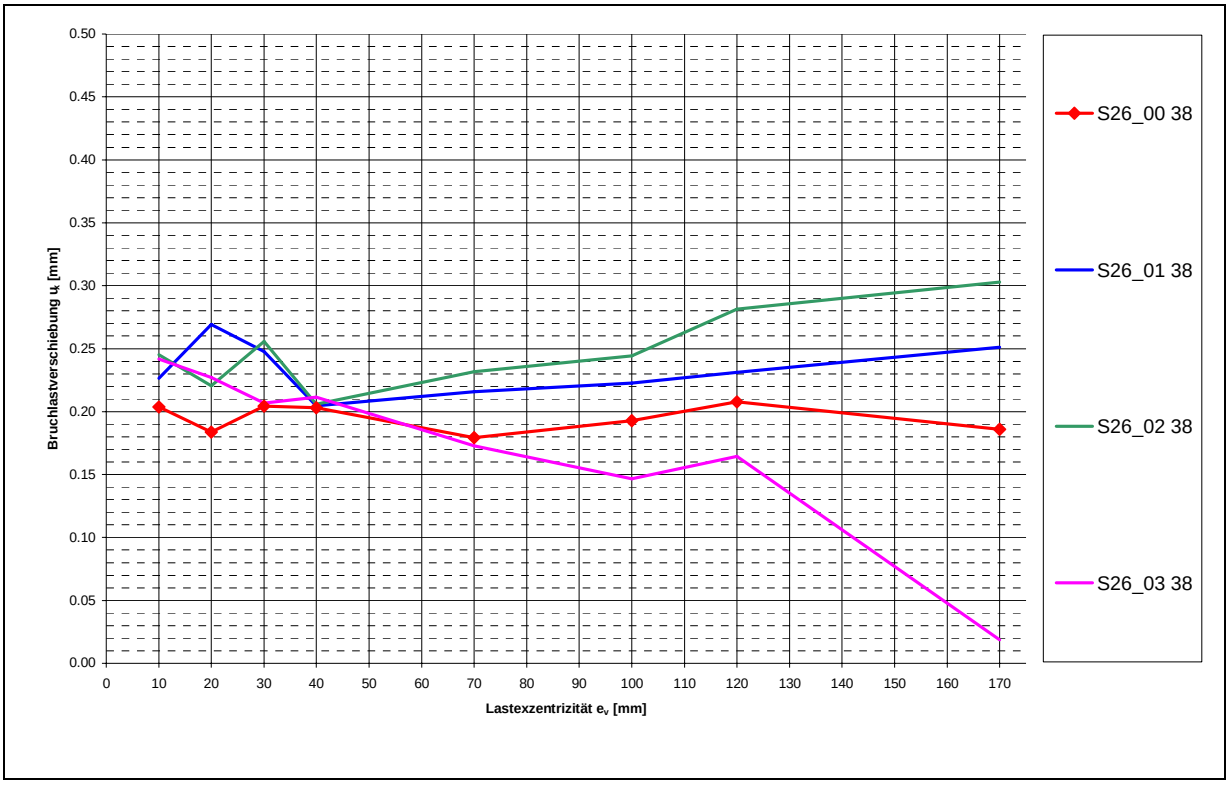


Abbildung 154: Bruchlastverschiebung über Lastexzentrizität, nur S26.

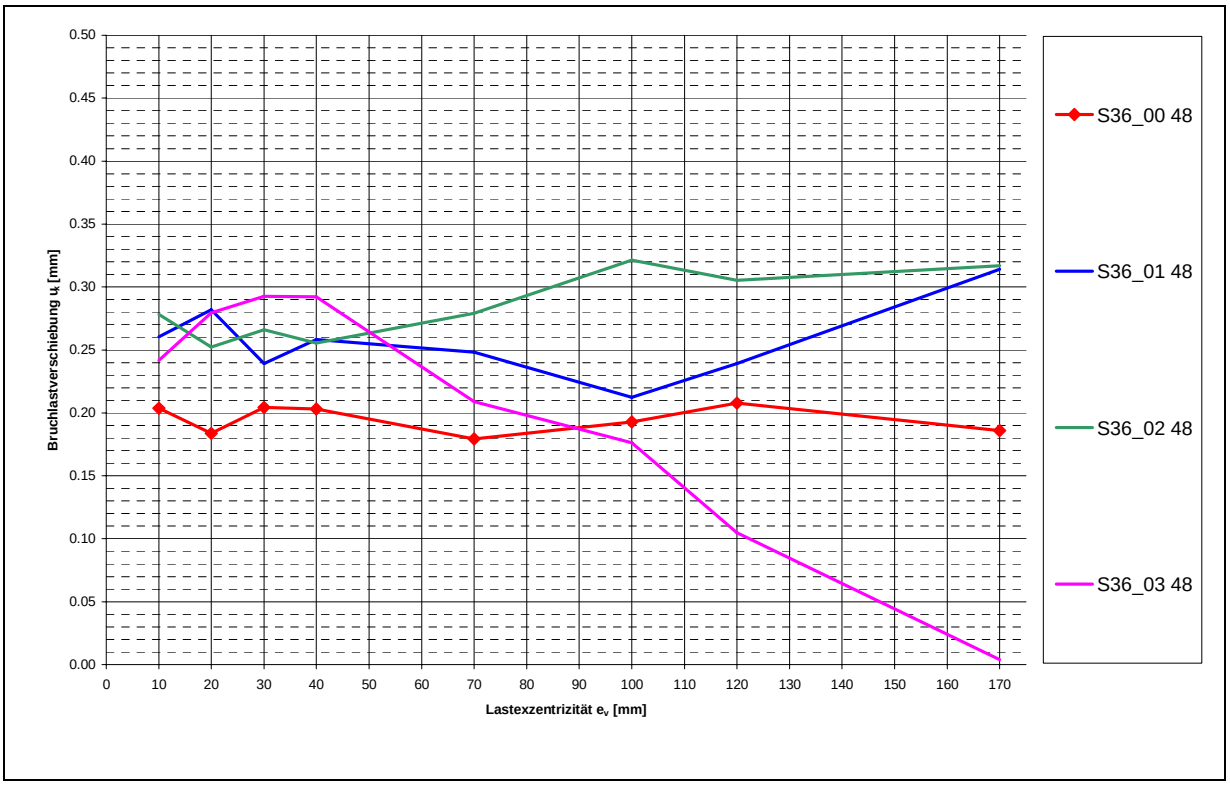


Abbildung 155: Bruchlastverschiebung über Lastexzentrizität, nur S36.

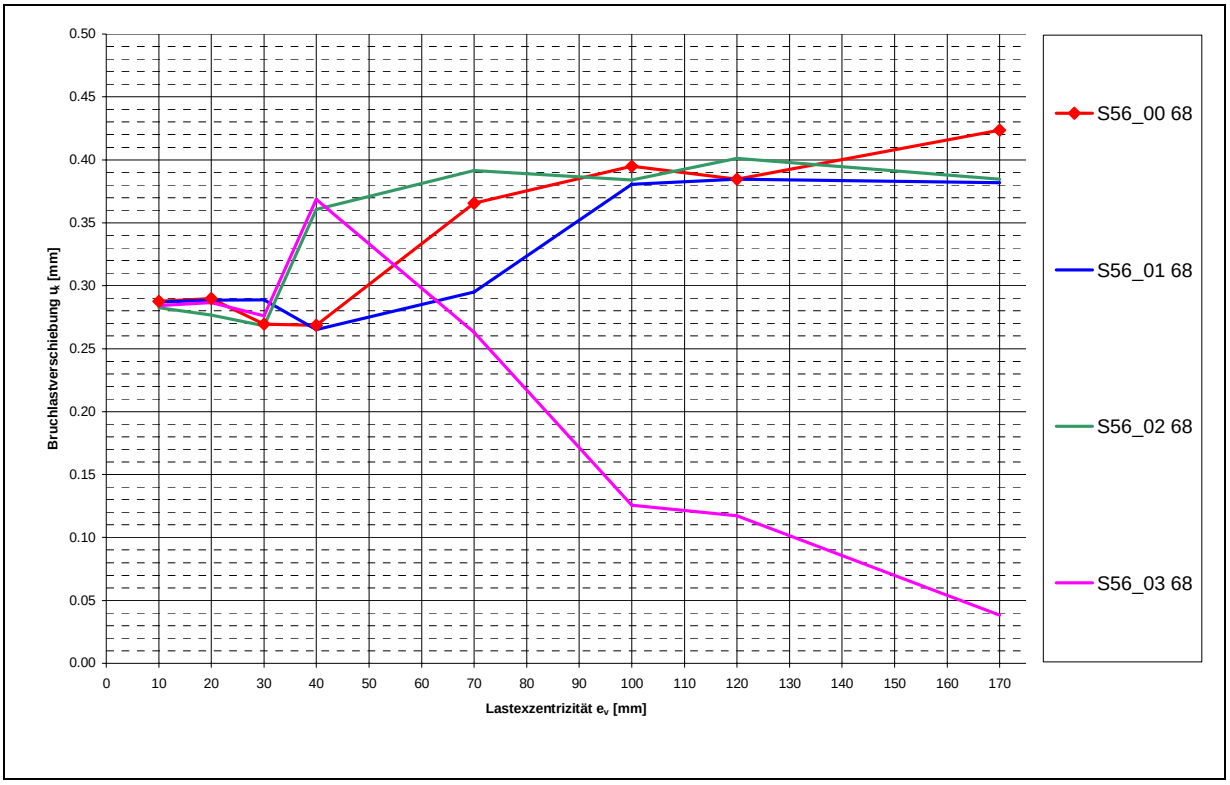


Abbildung 156: Bruchlastverschiebung über Lastexzentrizität, nur S56.

Eine Aussage zu v_{Base} soll dem Kapitel „Nachrechnung“ vorbehalten bleiben.

A4.5 NACHRECHNUNG

Für die Nachrechnung der Versuche gelten die Bezeichnungen und Festlegungen am unverformten und am verformten System, wie sie in Abbildung 157 und Abbildung 158 dargestellt sind.

Die Berechnung wird iterativ aufgebaut, wobei Grundwerte am unverformten System ermittelt werden. Diese fließen dann in eine Berechnung am verformten System ein, deren Zeil es ist, die Grundwerte anhand eben dieser Verformungen zu korrigieren. Diese wird dann in weiteren Schritten verfeinert. Das Schema ist identisch mit dem Vorgehen bei der Berechnung im Modell LUG.

Ausgehend von der Geometrie der Verankerung und der Beanspruchung kann die Ankerkraft F_{Anchor} bestimmt werden:

$$
\begin{aligned}
&F_0 = F_{Anchor} \quad \text{und} \quad R_{Base} = V \\
&F_{Anchor} = \frac{V \cdot e_V - R_{Base} \cdot e_{Base}}{a_{Anchor} - a_R} = V \cdot \frac{e_V - e_B}{a_A - a_R} \\
&\text{bzw. am verformten System} \\
&F_{Anchor} = \frac{V \cdot \left(e_V + u_{Anchor}\right) - R_{Base} \cdot e_{Base}}{a_{Anchor} - a_R} = V \cdot \frac{e_V + u_A - e_B}{a_A - a_R}
\end{aligned}
\tag{4.20}
$$

Lediglich die Lage der Resultierenden R_{Base} und F_0 sind abzuschätzen. Die Lage der Resultierenden in der Stirnfläche e_{Base} kann in einem ersten Schritt mittig in der Stirnfläche angenommen werden. Dies passt zu dem Grundwert der Bruchlast R^*_{Base} vor der Stirn, die nahezu immer basierend auf f_c bzw. σ^*_{Base} ermittelt werden darf. Lediglich für große Verdrehwinkel Φ der Ankerkonstruktion muss die zu übertragende zulässige Last reduziert werden. Dies geschieht mit dem Grenzwinkel Φ der in Gleichung (4.17) angegeben wird. Vereinfacht ausgedrückt kann e_{Base} somit alle Lagen innerhalb der Kernfläche annehmen. Das Wandern des Schwerpunktes nach oben kann direkt aus der Verdrehung des Einbauteils erklärt werden. Durch die Verdrehung wird der obere, also randnahe Bereich mehr belastet – Auftreten größerer Stauchungen – und bricht bei Erreichen der einachsigen Betonfestigkeit. Die tiefer liegenden Bereiche entziehen sich infolge der abnehmenden Stauchungen einer vollen Lastübertragung. Somit kann die so beanspruchte Fläche nicht die volle Lastübertragungskapazität erreichen. Das Verhalten ist analog zur Fülligkeit einer Betondruckzone infolge Biegebeanspruchung. Ein Ansatz über Fülligkeitsparameter wie bei der Biegebemessung ist hier aber nicht am Platz, da dies den Rechenaufwand unverhältnismäßig erhöhen würde und im Ergebnis kaum sichtbar wird. Die Schwerpunktlage e_{Base} kann linear variiert werden, oder die Schwerpunktlage kann direkt aus dem Spannungsmodell ermittelt werden, dass der Ermittlung der Resultieren R_{Base} zugrunde liegt.

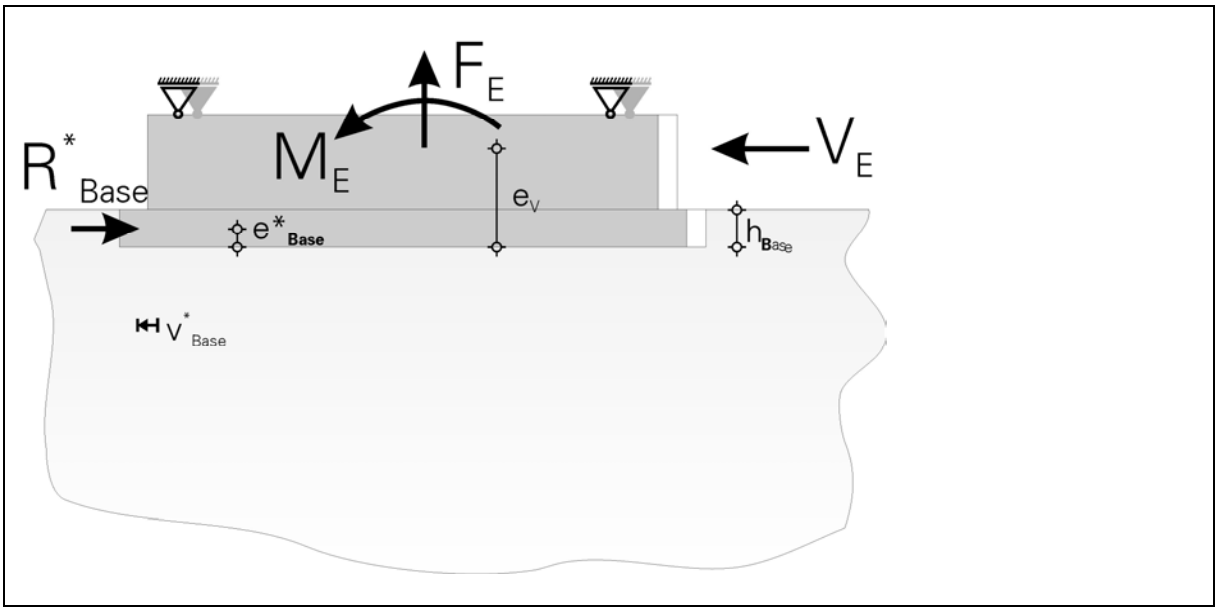


Abbildung 157: Kräfte und Bezeichnungen am unverformten System

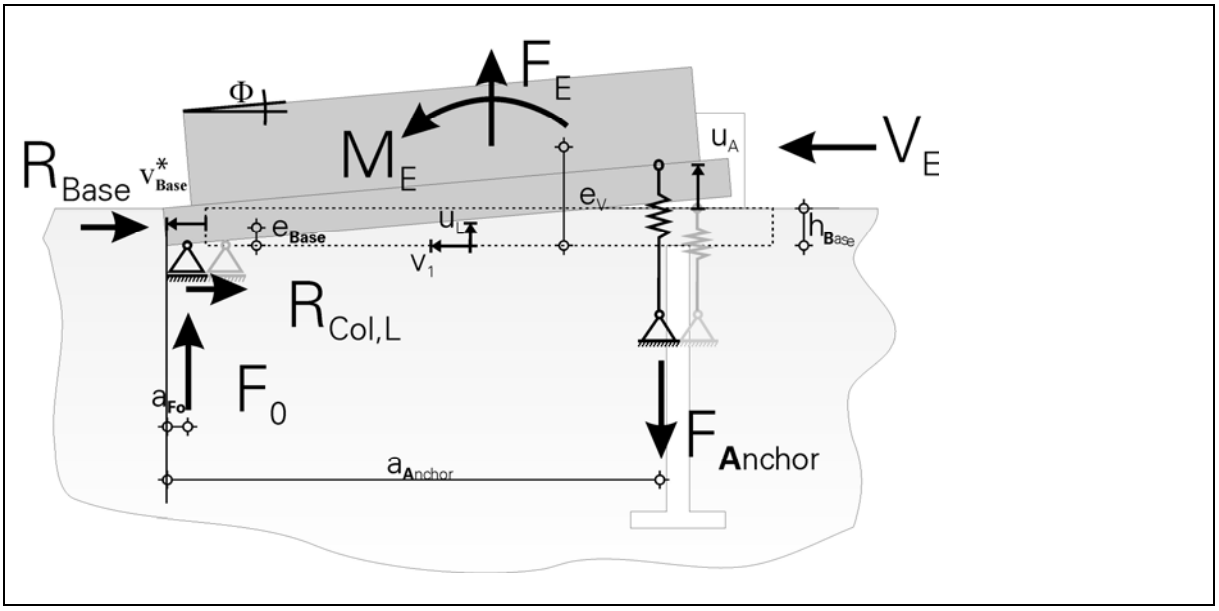


Abbildung 158: Kräfte und Bezeichnungen am verformten System

$$e_{Base} = \tfrac{1}{2} \cdot h_{Base}$$

$$\tfrac{1}{3} \cdot h_{Base} \leq e_{Base} \leq \tfrac{2}{3} \cdot h_{Base} \qquad (4.21)$$

$$e_{Base} = \tfrac{1}{3} \cdot h_{Base} \cdot \left(1 + \frac{\Phi}{\Phi_{Grenz}}\right)$$

$$tan\Phi \leq 0,5 \cdot tan\Phi_{Grenz}$$
$$R_{Base,a} = \sigma^{*}_{Base} \cdot b_{Base} \cdot h_{Base}$$

$$tan\Phi = tan\Phi_{Grenz}$$
$$R_{Base,b} = 0,9 \cdot \sigma^{*}_{Base} \cdot b_{Base} \cdot 0,8 \cdot h_{Base}$$

$$0,5 \cdot tan\Phi_{Grenz} < tan\Phi < tan\Phi_{Grenz}$$ *siehe Gl (4.19)*

interpolieren zwischen $R_{Base,a}$ und $R_{Base,b}$

$$tan\Phi > tan\Phi_{Grenz}$$
$$R_{Base} = 0,9 \cdot \sigma^{*}_{Base} \cdot b_{Base} \cdot 0,8 \cdot h_{red}$$
$$h_{red} = \frac{tan\Phi_{Grenz}}{tan\Phi} \cdot h_{Base}$$

Ähnliche Überlegungen gelten auch für die Lage der Resultierenden R_0. In einem ersten Schritt kann a_R = 0 gesetzt werden. Für eine genauere Berechnung, ist die Lage der Resultierenden wieder von der Lastübertragung vom Stahl in den Beton abhängig. Es ist aber zu beachten, dass die Verdrehung des Einbauteiles die Lastübertragungsfläche hier einengt.

a_R => Schwerpunkt von F_0

$$\frac{1}{3} \cdot \frac{F_{Anchor}}{b_{Base} \cdot n \cdot f_c} \leq a_R \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{F_{Anchor}}{b_{Base} \cdot n \cdot f_c} \qquad (4.22)$$

$$a_R = \frac{1}{2} \cdot \frac{F_{Anchor}}{n_1 \cdot f_c \cdot b_{Base}} \cdot n_2$$
$$n_1 = 1,0 \qquad (4.23)$$
$$n_2 = \left(1 - \frac{\tan\Phi}{\tan\Phi_{Grenz}}\right) \geq 0$$

A4.5.1 GRUNDWERTE AM UNVERFORMTEN SYSTEM

Es gilt:

$$R^*_{Base} = \left(\frac{255 \cdot f_c}{234 + f_c} + \frac{4{,}0 \cdot f_c - 3{,}2}{h_{Base}} \right) \cdot A_{Base}$$ *siehe Gleichung (4.10)*

$$F_{Anchor} = \frac{V \cdot e_V - R_{Base} \cdot e_{Base}}{a_{Anchor} - a_R} = V \cdot \frac{e_V - e_B}{a_A - a_R}$$

$$V = R_{Base} = R^*_{Base}$$ *siehe Gleichung (4.11)*

$$e_B = h_{Base} / 2$$

$$a_R = 0$$

Mit diesen Kräften am Einbauteil können die ersten Werte der Verformungen bestimmt werden:

$$v^*_{Base} = a \cdot \ln\left(h_{Base}\right) - 0{,}135$$

mit : *siehe Gleichung (4.12)*

$$a = \frac{0{,}86 \cdot f_c + 73}{1000}$$

$$u_{A,2} = \frac{F_{Anchor}}{\frac{E_{Anchor} \cdot A_{Anchor}}{L_{Anchor}}} = \frac{F_{Anchor}}{EA / L_{Anchor}}$$

$$e_{Base} = 1/3 \cdot h_{Base} \cdot \left(1 + \frac{\Phi}{\Phi_{Grenz}} \right)$$

mit:

$$1000 \cdot \tan \Phi_{Grenz} = 0{,}06 \cdot f_c + 0{,}07$$

$$\simeq 0{,}06 \cdot \left(f_c + 1\right)$$

$$a_R = 1/2 \cdot \frac{F_{Anchor}}{n_1 \cdot f_c \cdot b_{Base}} \cdot n_2$$

$$n_1 =$$

$$n_2 = \left(2 - \frac{\tan \Phi}{\tan \Phi_{Grenz}} \right)^{-1}$$

Diese Formeln gelten für die Nachrechnung „Nachrechnung_A.xls“ deren Bilder „G1-Nachhr5a0“ für R_{Base} und „G2_Nachr5a0“ für F_{Anchor} im Folgenden abgebildet sind.

Diese Ansätze werden analog der Dübelberechnung erweitert und mit 3D-Faktoren versehen.

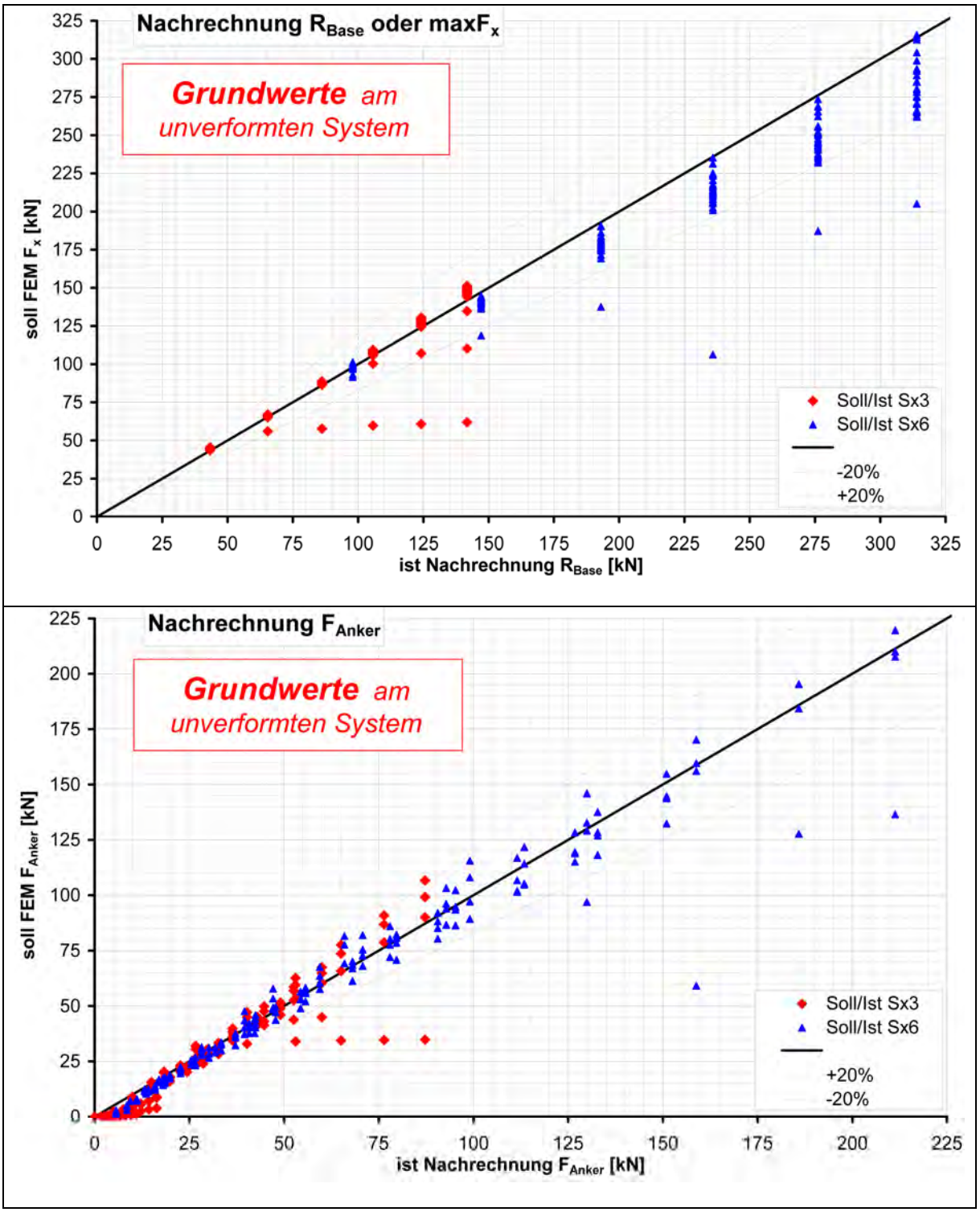


Abbildung 159: Grundwerte am unverformten System

A4.5.2 1TER SCHRITT AM VERFORMTEN SYSTEM

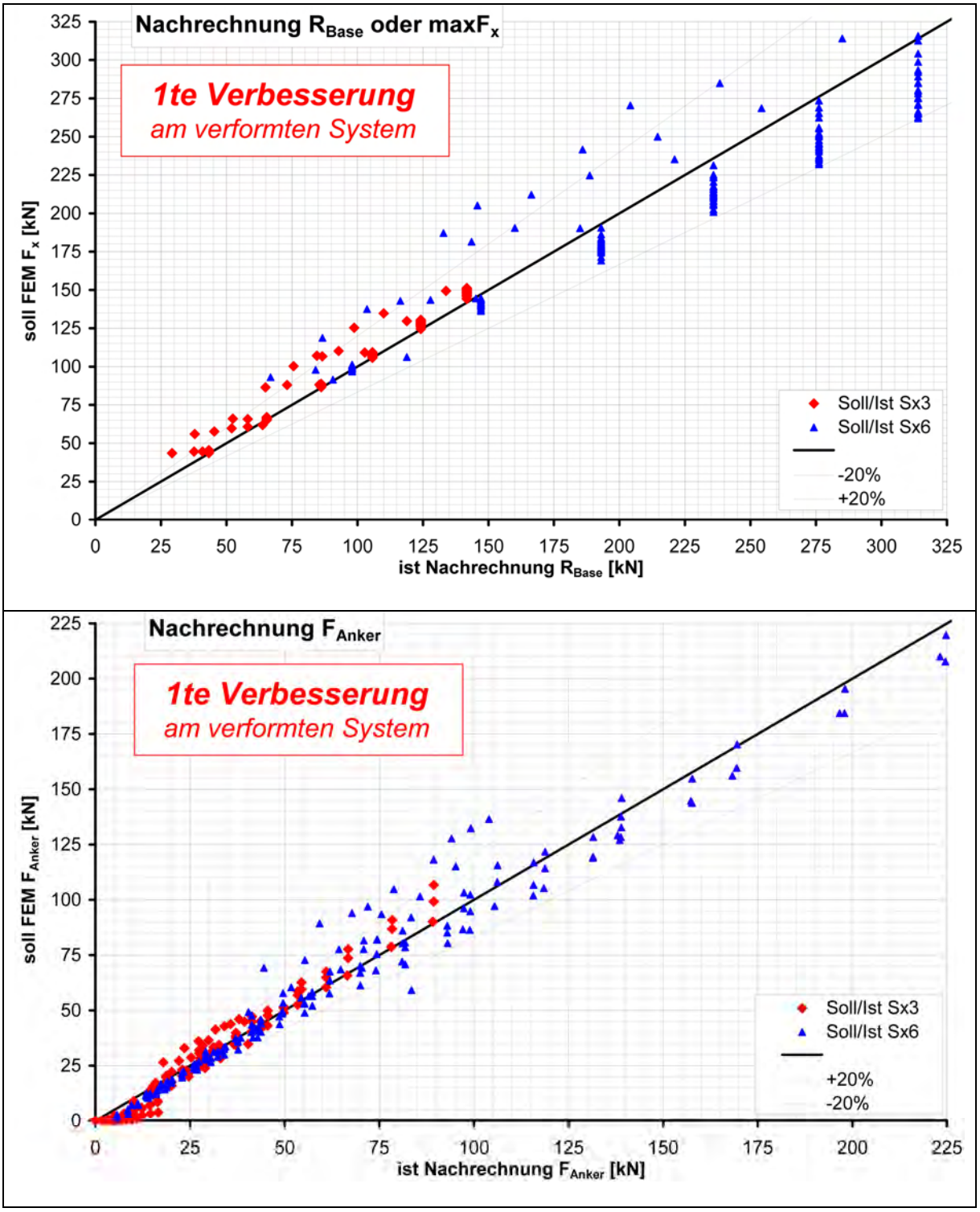
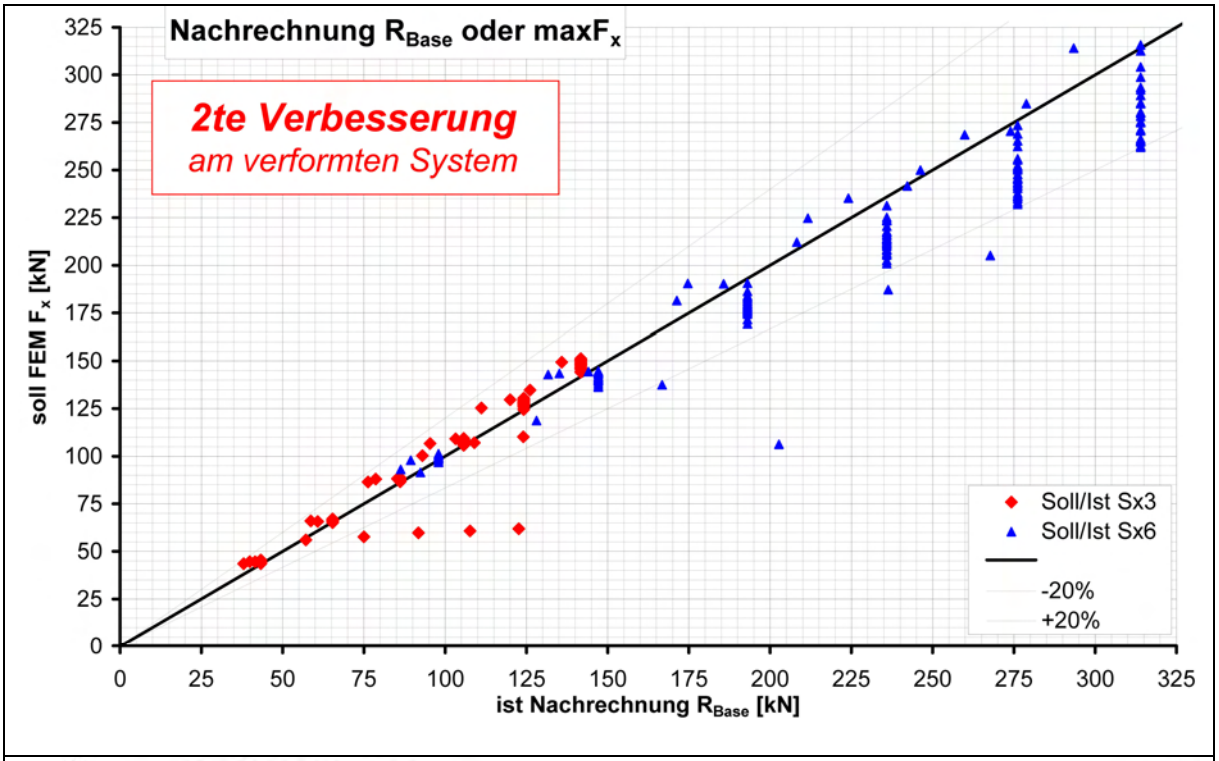


Abbildung 160: Werte für den 1ten Iterationsschritt

A4.5.3 VERBESSERUNGEN AM VERFORMTEN SYSTEM



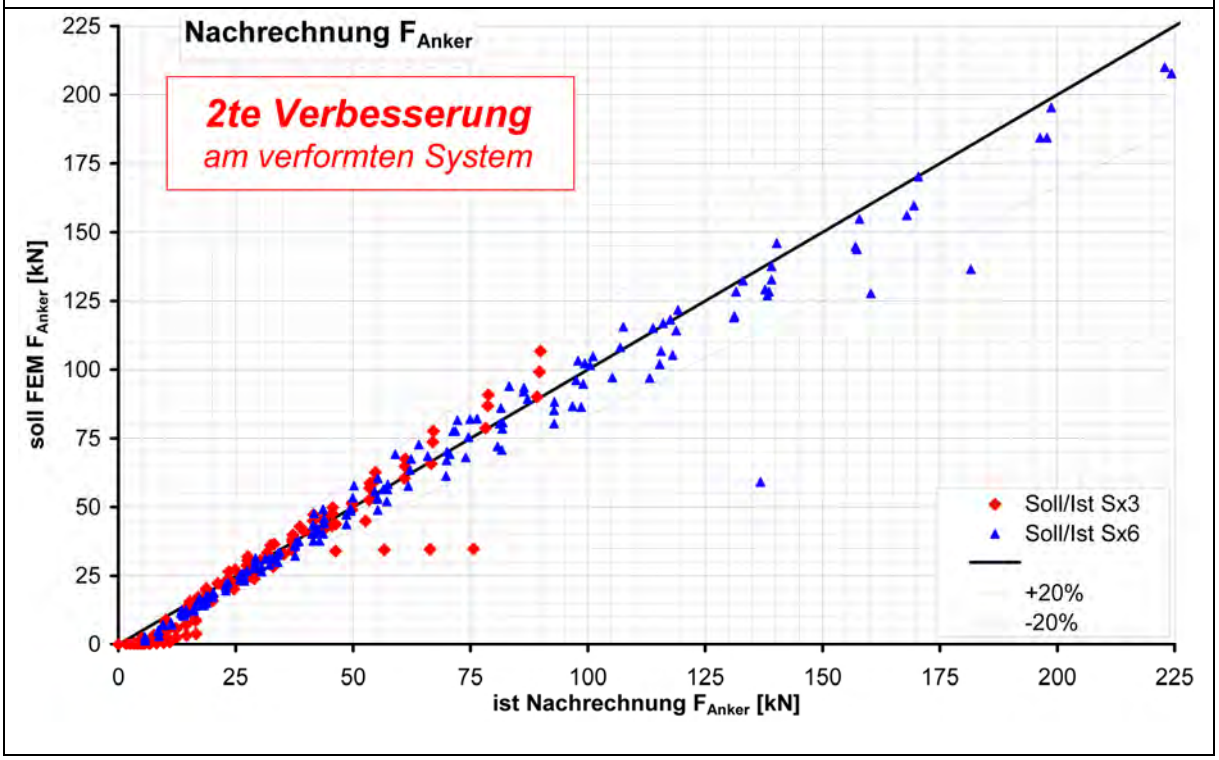


Abbildung 161: Werte für den 2ten Iterationsschritt

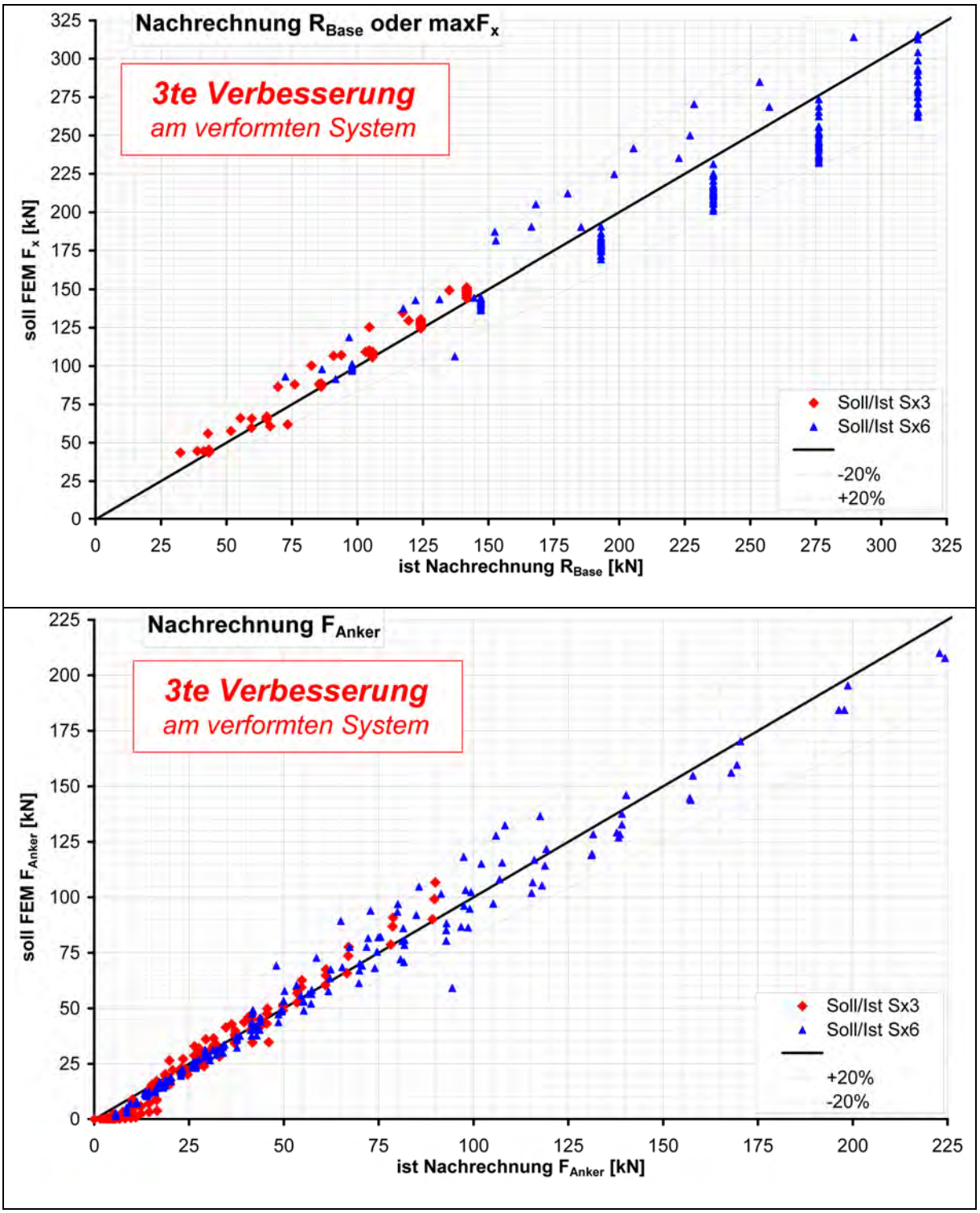


Abbildung 162: Werte für den 3ten Iterationsschritt

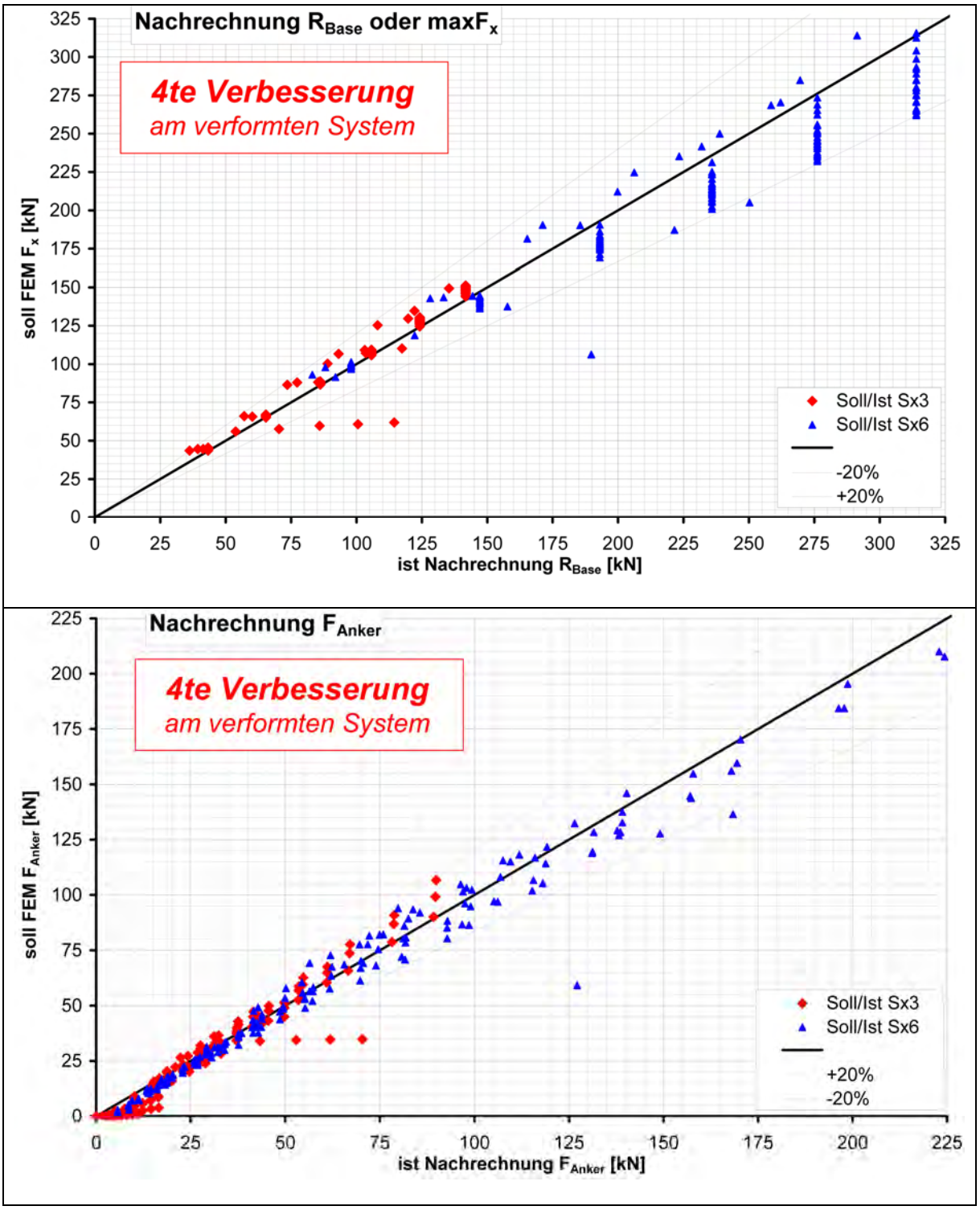


Abbildung 163: Werte für den 4ten Iterationsschritt

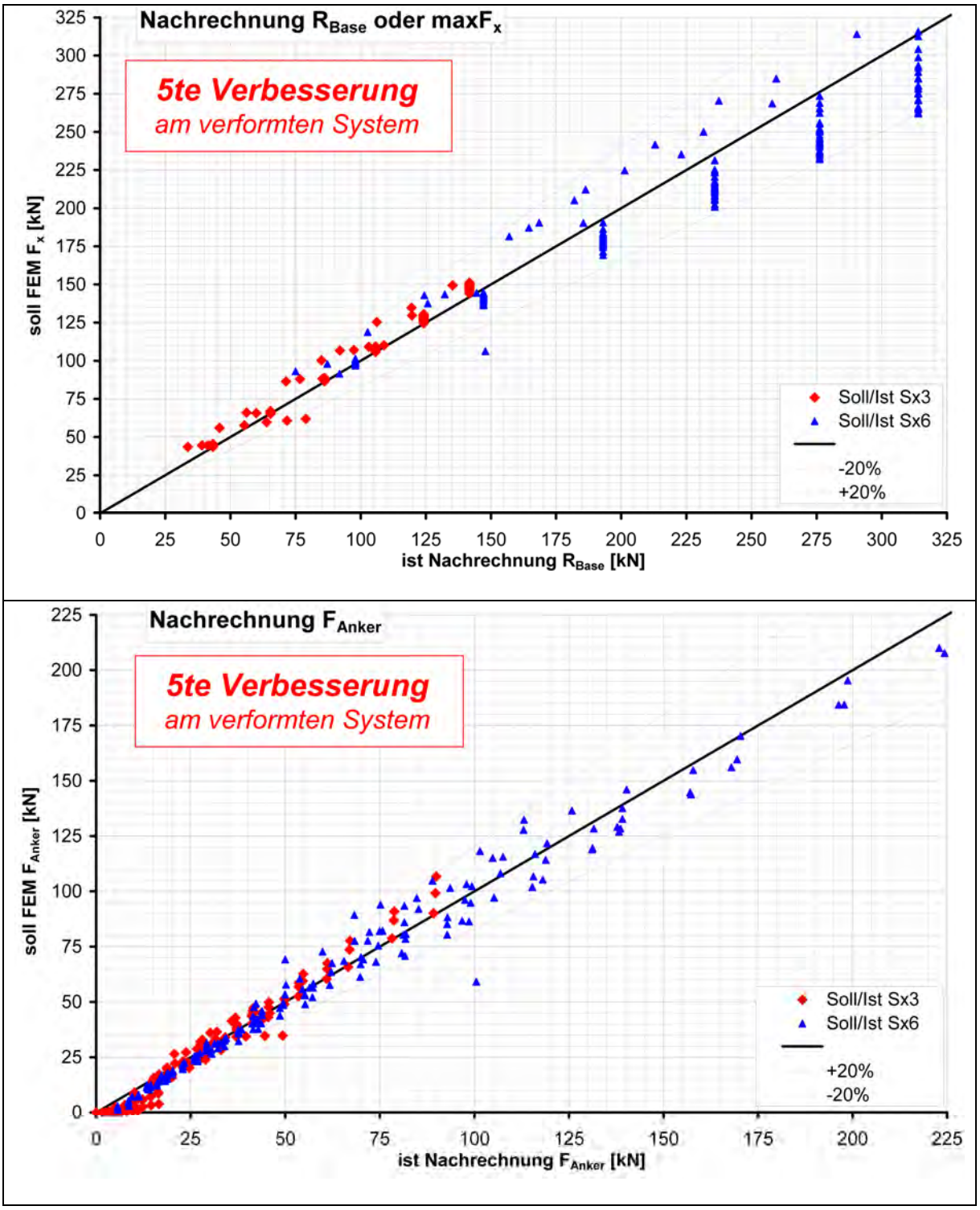


Abbildung 164: Werte für den 5ten Iterationsschritt

A4.6 ERWEITERUNG DER NACHRECHNUNG

Obige Nachrechnung wird in der Datei „ @Nachrechnung FEM Stanze.xls“ überarbeitet. Neben den 3D-Faktoren, die hier noch neutral gesetzt wurden, werden noch einige Rechenanpassungen eingebaut, um das Ergebnis exakter zu gestalten! Diese sind:

- Spannungsblock mit 0,8 und 0,9
- Grenzwinkel Φ nach Gleichung (4.17)
- Iterationshilfe festhalten Grenzwinkel Φ

Mit den Sandartwerten ergibt sich das Bild nach Abbildung 165

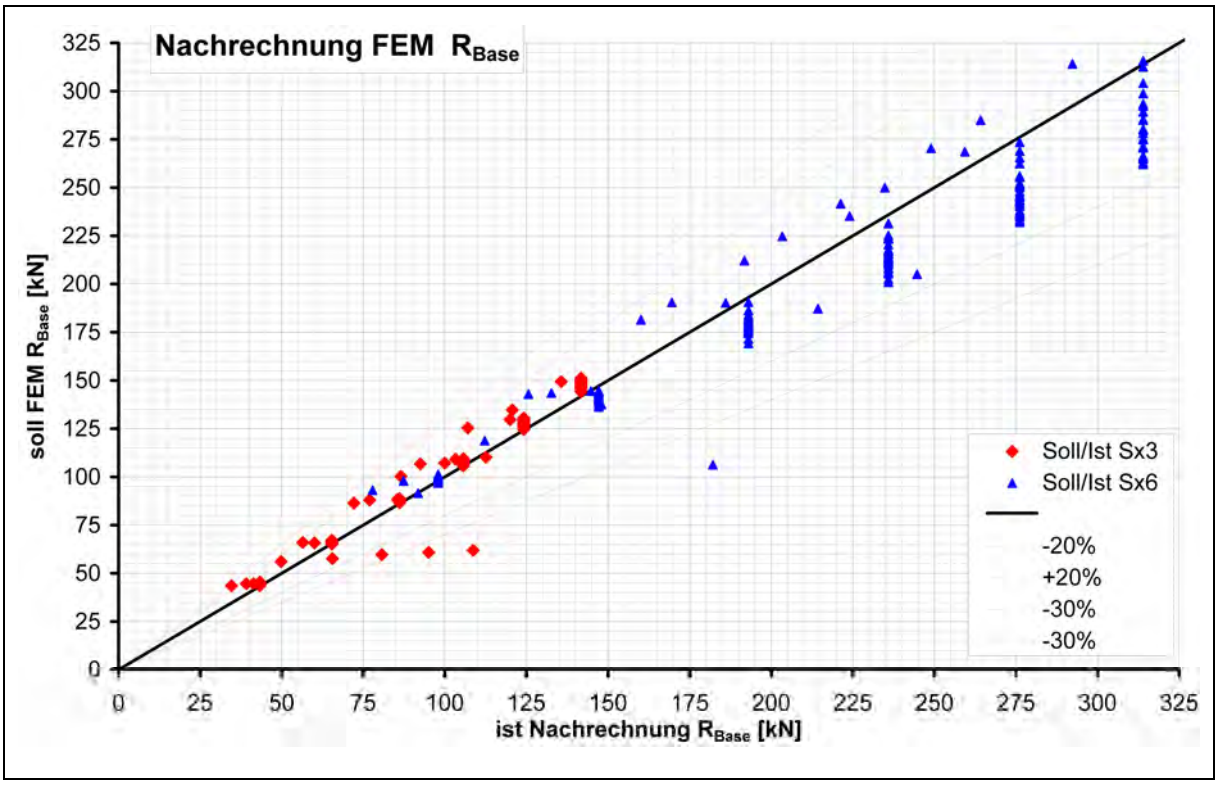


Abbildung 165: Standardwerte für Nachrechnung Stanze

A4.6.1 ITERATIONSHILFE - FESTHALTEN WINKEL Φ

Diese Iterationshilfe besagt, wenn einmal der vorhandene Winkel Φ den n-fachen Wert des Grenzwinkels Φ_{Grenz} überschritten hat, so kann er diesen nicht mehr unterschreiten. Eigentlich sollten derartige Systeme vermieden werden! Mit einem Wert von 1,25 können die Ausreißer auf der unsicheren Seite vermieden werden. Die Wirkung des Faktors 1,25 wird in Abbildung 166 demonstriert!

Es gilt:

$$\tan\Phi = n \cdot \tan\Phi_{Grenz}$$
$$\text{mit:} \quad n = 1{,}25 \qquad (4.24)$$
$$\text{für:} \quad \tan\Phi \geq n \cdot \tan\Phi_{Grenz}$$

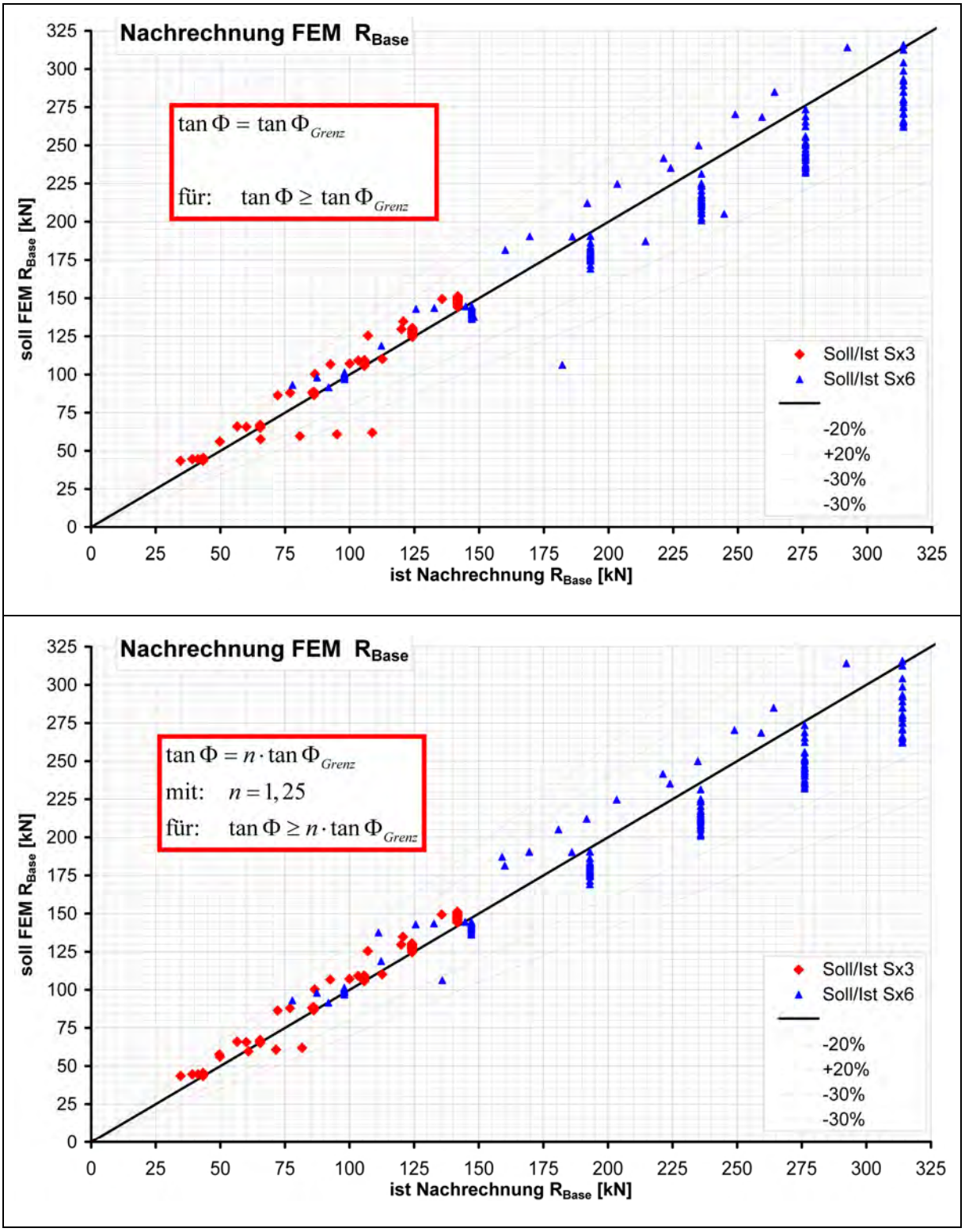


Abbildung 166: Iterationshilfe – Festhalten Winkel Φ

A4.6.2 GRENZWINKEL Φ NACH GLEICHUNG (4.17)

Eine Halbierung des Grenzwinkels F hingegen vergrößert das Sicherheitsniveau, ohne die Qualität der Ergebnisse zu verbessern. Die Ausreißer auf der unsicheren Seite bleiben erhalten, werden von dieser Maßnahme also nicht erfüllt, siehe Abbildung 167.

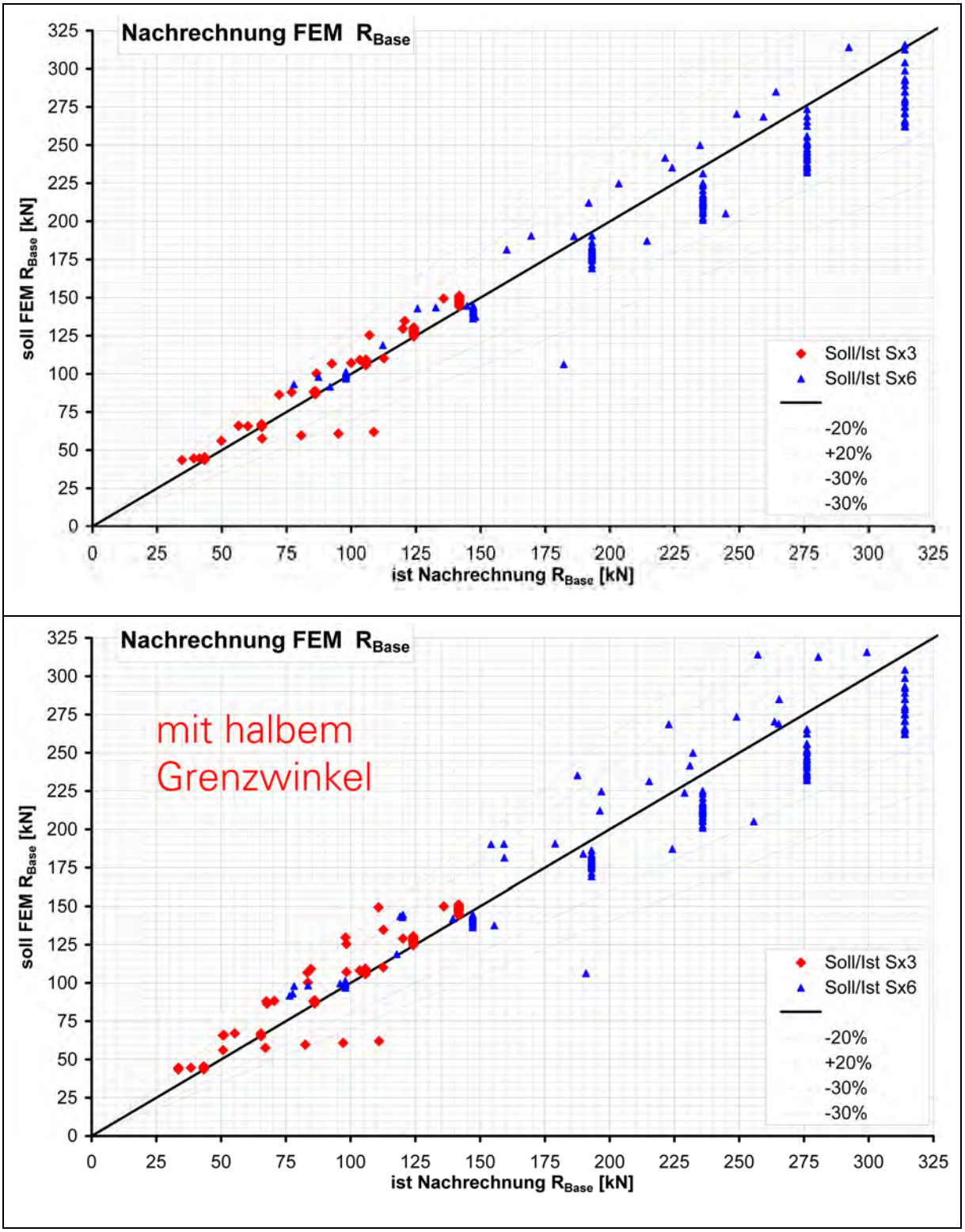


Abbildung 167: Halbierung des Grenzwinkels Φ

A4.6.3 SPANNUNGSBLOCK MIT 0,8 UND 0,9

Für den Spannungsblock wird die Spannung auf 90 % abgemindert, die Druckzonenhöhe hingegen auf 80 %. Reduziert man diese Werte auf 80 % für die Spannung und belässt die Höhe, so ergibt sich ein Bild nach Abbildung 168. Auch hier zeigt sich kein Vorteil.

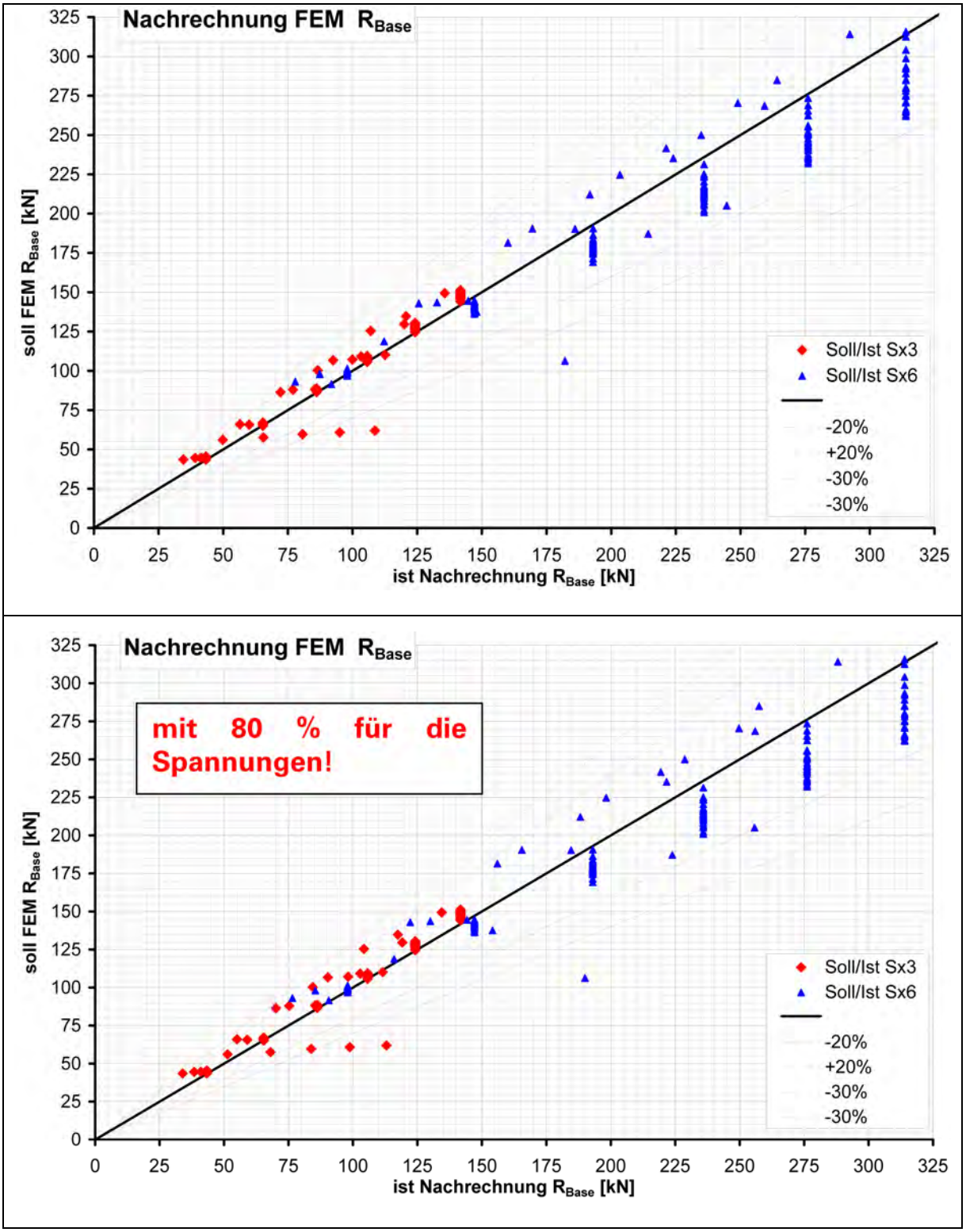


Abbildung 168 Reduzierung der Spannung

A4.7 NACHRECHNUNG DER VERSUCHE – KALIBIRERUNG

Eine Nachrechnung der Versuche nach dem gleichen Schema führt zu dem im Weiteren dargestellten Bildern. Die Rechenwerte liegen wie beim Modell LUG erwartungsgemäß unterhalb der im Versuch ermittelten Werte. Dies ist systembedingt, da die Anpassung der 2D-Berechnung an die 3D- Versuche hier erst erfolgen soll.

Nun können mit dem hier dargestellten Verfahren nur Versuch abgebildet werden, die keinen Schubdübel aufweisen.

An dieser Stelle wird es nun notwendig, die Anpassung der 2D-Rechnung an die 3D-Wirklichkeit vorzunehmen. Hierbei sind vor allem 2 Dinge zu berücksichtigen:

- 3D-Faktor zur Berücksichtigung der 3axialen Festigkeitssteigerung
- Reibung im System

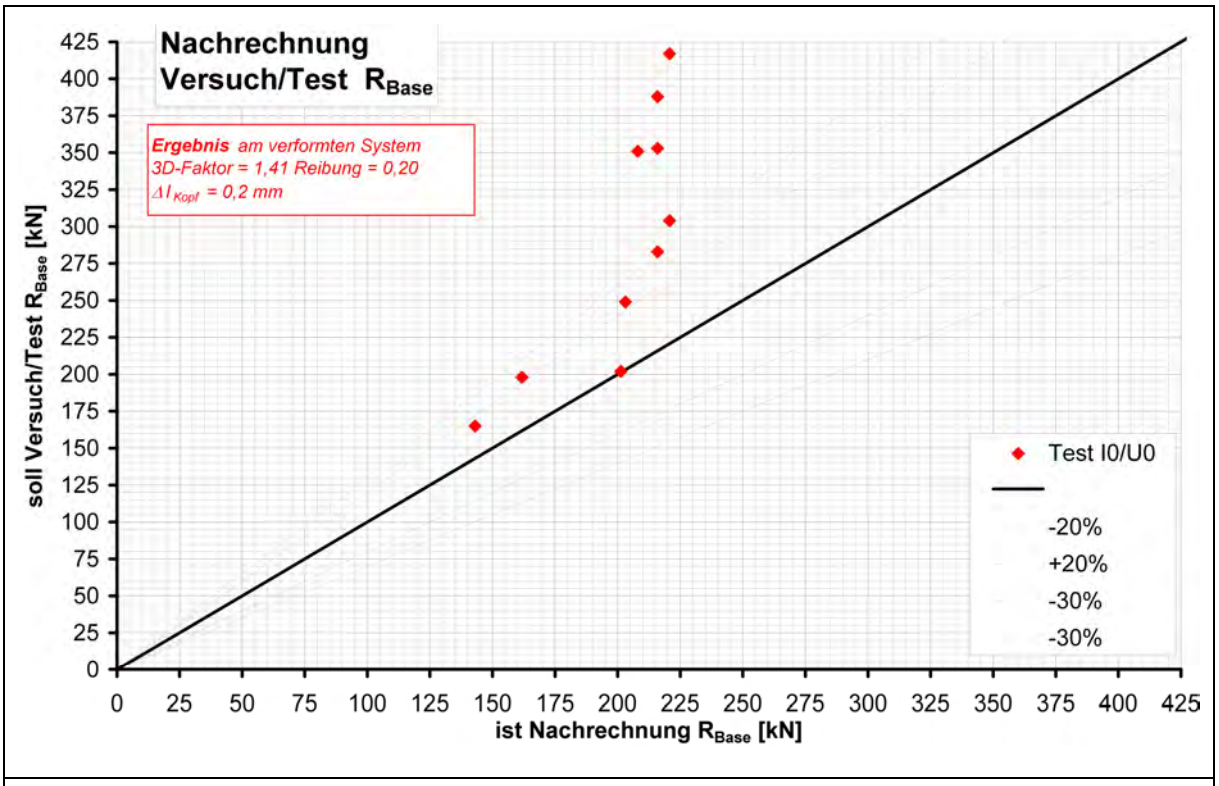
Der 3D-Faktor beschreibt die Festigkeitssteigerung für druckbeanspruchten Beton beim Übergang von 1axialer, zu 3axialer Beanspruchung. Im Gegensatz zum Modell LUG kann hier kein 3axialer Druckspannungszustand ausgenutzt werden, da ja eine Betonfläche eine freie Oberfläche darstellt.

Zwischen der Grundplatte und dem Betongrund herrscht in der Praxis immer Reibung. Auch, wenn diese zu Bemessungszwecken auf der sicheren Seite liegend nicht angesetzt wird, so ist sie für die Nachrechnung zu berücksichtigen. Die Reibung fällt in den Versuchen recht hoch aus, da für die in den Beton eingegossenen Versuchskörper im Allgemeinen Haftreibung angesetzt werden kann. Die Relativverschiebung zwischen Beton und Stahl ist hierbei immer nahezu null, da die Verformungen durch ein Zusammendrücken des Betons hervorgerufen werden. Erst nach dem Bruch einzelner Betonbereiche tritt ein Gleiten auf.

Weiterhin zu berücksichtigen ist die Ankerkopfverschiebung der als Zuganker wieder eingesetzten Kopfbolzendübel.

Wendet man diese 3 Faktoren auf die angepasste Nachrechnung der Versuche an, so ergibt sich ein Bild wie in Abbildung 170 unten dargestellt.

- 3D-Faktor: 2,00 (gewählt dann 2,1)
- Reibung: 0,20
- Ankerkopfverschiebung: 0,2 mm



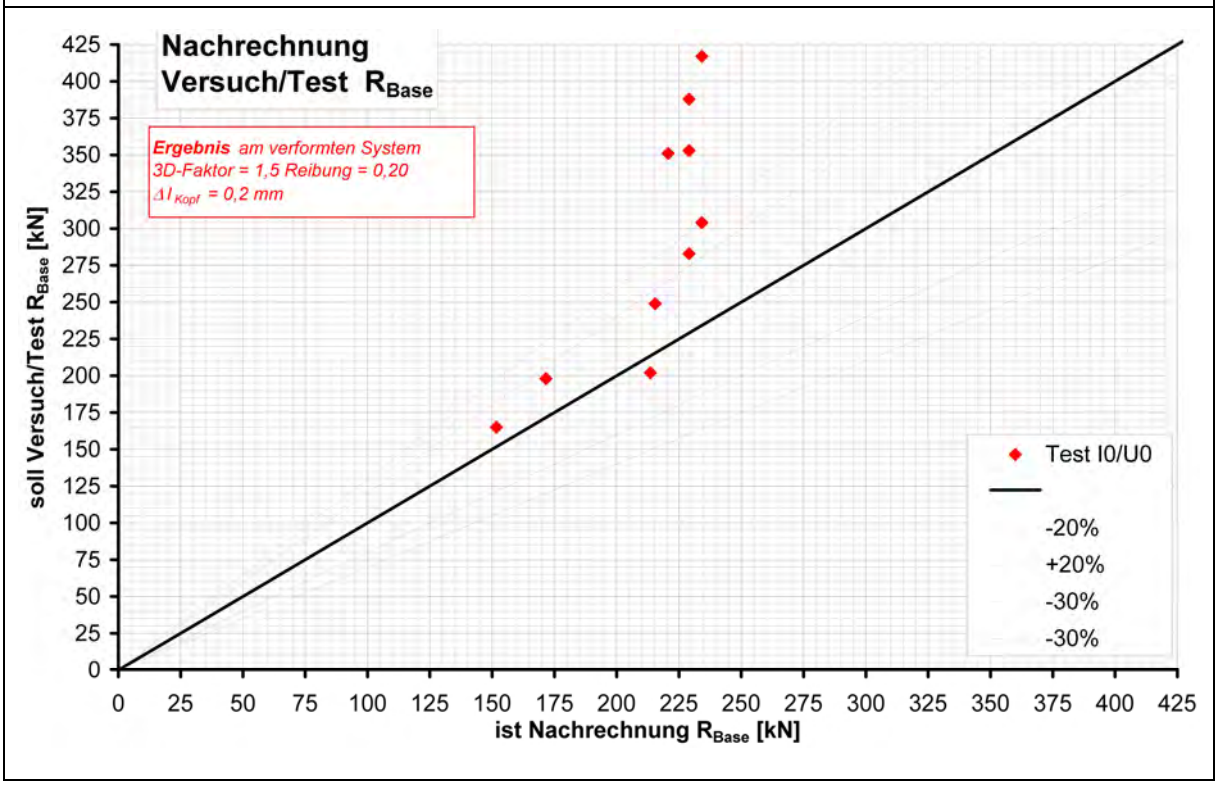
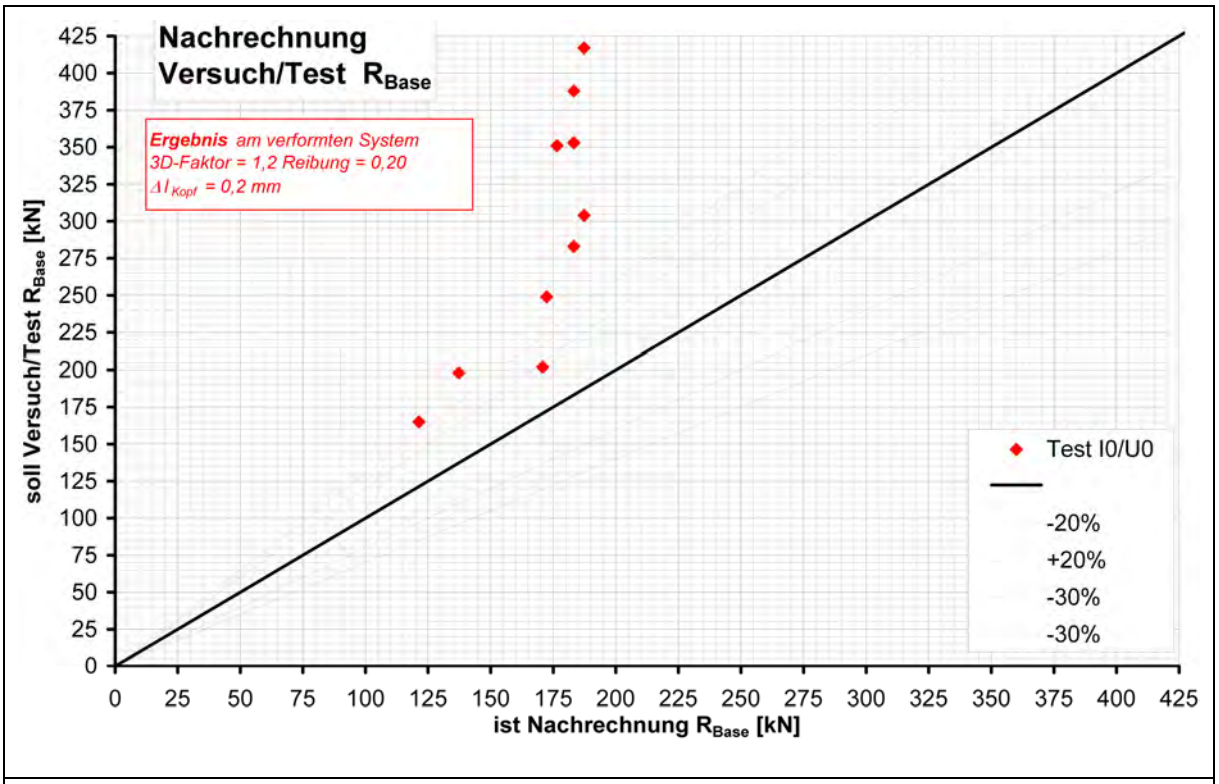


Abbildung 169: Übertragen auf die Versuche Teil 1



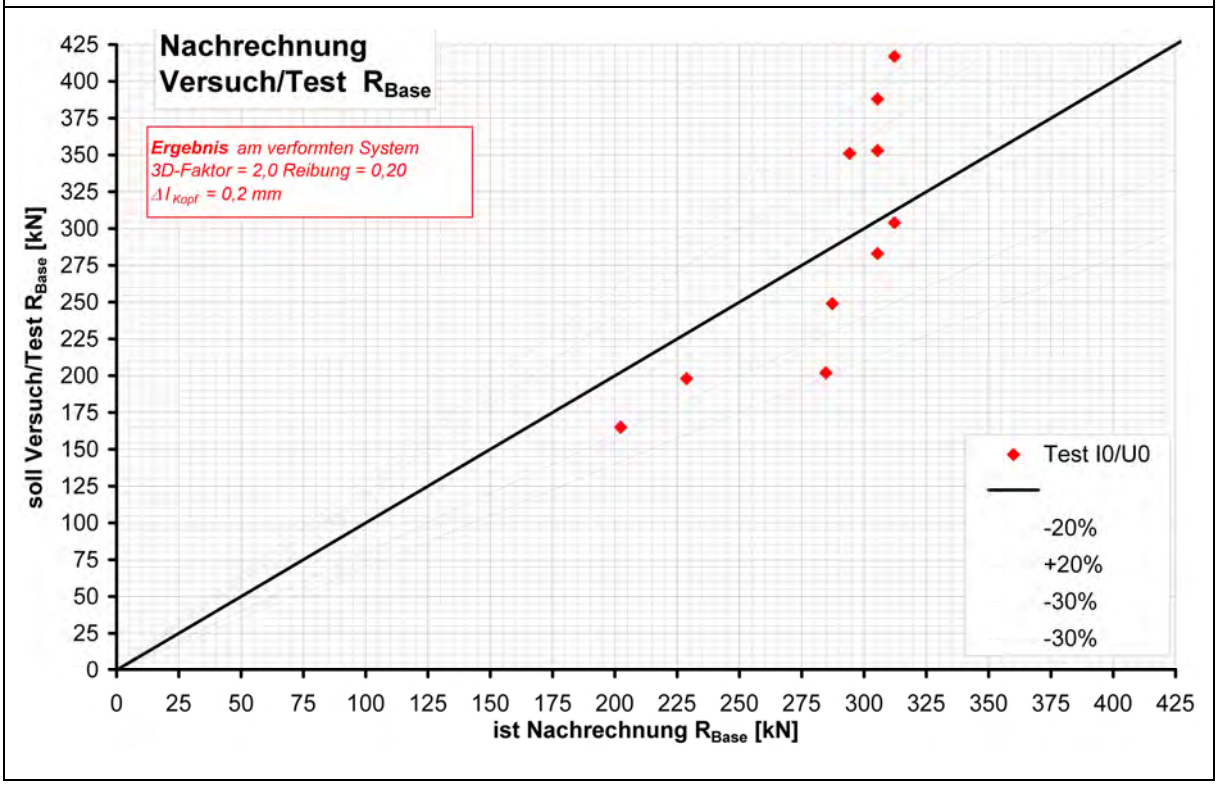


Abbildung 170: Übertragen auf die Versuche Teil 2

A4.8 VERFORMUNGSBERECHNUNG

Eine Verformungsabschätzung ist notwendig, um die Modelle GRUNDPLATTE (STANZE) und DÜBEL kombinieren zu können.

Die vorhandene Datenbasis ist aber erst brauchbar, wenn die Verformungsmessung im Punkt W4 (auf dem Anker) um die Standzeiten korrigiert wird.

Nr.:	**Bez.**	**Bruchlast**	**Bruchver-schiebung** A [mm]	v^*_{Base} **aus Nachrechnung** *B* [mm]	**Faktor** B/A [-]	**Bemerkung**
1	1.1	351,0 kN	0,27	0,16	1,69	
2	1.2	341,0 kN	0,23	0,17	1,35	
7	4.1	282,0 kN	0,66 ?	0,17	3,90	
8	4.2	304,0 kN	0,80 ?	0,17	4,70	
19	10.1	463,0 kN (354,0)	0,88 / 0,27	0,21	1,29	
20	10.2	490,0 kN	0,64 ?	0,21	3,05	
25	13.1	177,0 kN (150,0)	0,17 / 0,10	0,16	1,06	
26	13.2	249,0 kN	0,20	0,16	1,25	
31	16.1	165,0 kN	0,19	0,14	1,36	
32	16.2	195,0 kN	0,23	0,17	1,35	
				im Mittel	**1,35**	

Die Bruchverschiebung kann somit zu der 1,35-fachen Grundverschiebung angenommen werden. Aus theoretischen Überlegungen wird dieser Faktor zu der Wurzel aus dem entsprechenden 3D-Faktor gesetzt. Ohne Verlust an Genauigkeit gilt:

$$\begin{aligned} & v_{Base,u} = \sqrt{3D - Faktor} \cdot v^*_{Base} \\ & mit: \\ & v^*_{Base} = a \cdot \ln\left(h_{Base}\right) - 0{,}135 \\ & a = \frac{0{,}86 \cdot f_c + 73}{1000} \end{aligned} \tag{4.25}$$

Für die Kraft-Verschiebungsbeziehung wird eine Parabelbeziehung analog dem Parabel-Rechteckdiagram angesetzt. Für den Exponenten der Parabel sind Werte im Bereich von 1,41 und 1,60 sinnvoll. Im ersten Fall ergibt sich eine Anfangssteigung der Verschiebungs-Kraft-Beziehung von E_0, für den Wert n = 1,6 wird am Anfang die 1,1-fache Steifigkeit angesetzt.

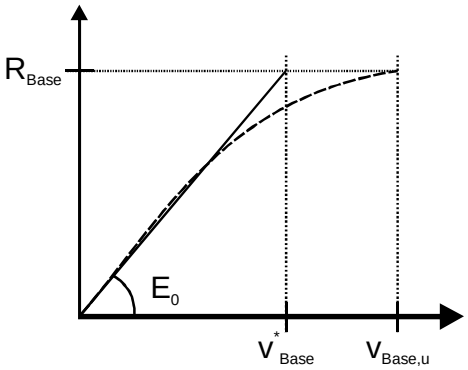
$$R_{Base,v} = -R_{Base}\left[1-\left(1-\frac{v}{v_{Base,u}}\right)^{n}\right]$$

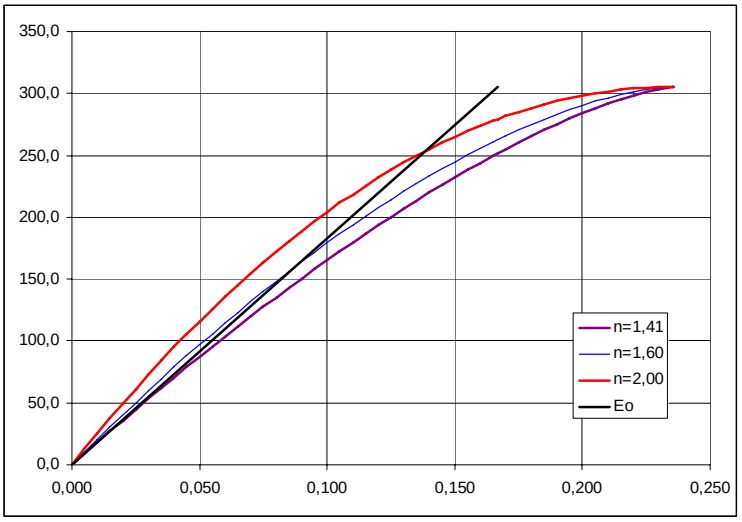
mit :

$n=\sqrt{2} \qquad E=E_0$

$n=1{,}6 \qquad E=1{,}1\cdot E_0$

$$E_0=\frac{R_{Base}}{v^*_{Base}}$$





Definition der Verschiebung für das Modell „STANZE“ und Gegenüberstellung verschiedener Parabelexponenten

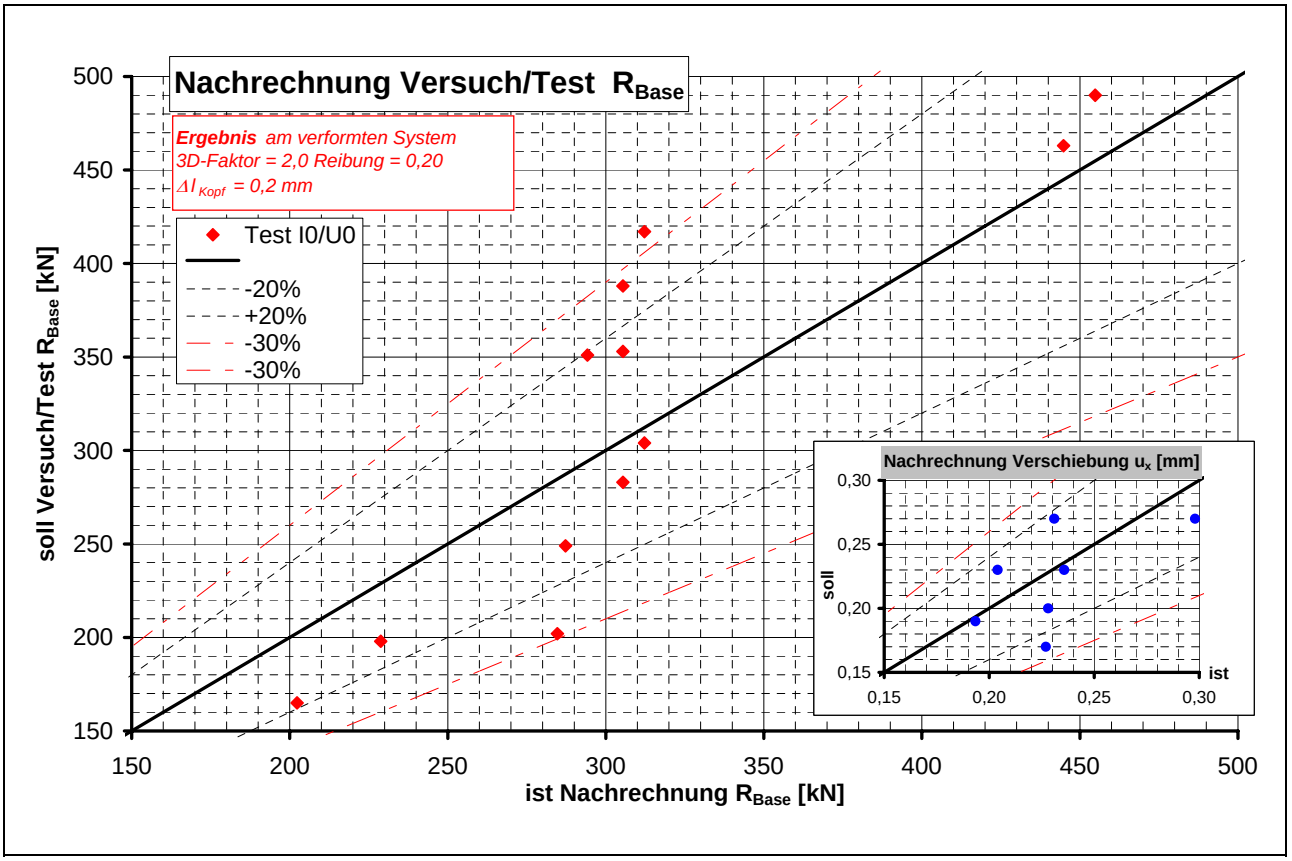


Abbildung 171: Nachrechnung der Versuche ohne Dübel mit Verformungen

A5 ZUSAMMENFÜHREN DER MODELLE

NACHRECHNUNG DER KOMBINIERTEN VERSUCHE

A5.1 IDEE

Nachdem eine Verschiebungs-Last-Beziehung für die Systeme „STANZE/BASE“ und „DUEBEL/LUG“ aufgestellt ist, kann versucht werden, die kombinierten aufnehmbaren Lasten in einem System „STANZE+DUEBEL“ zu ermitteln. Dies ist dann mit der Realität zu vergleichen.

Der nächste Schritt ist also die Zusammenführung der Berechnungen „DUEBEL“ und „STANZE“.

A5.2 GRUNDMODELLE

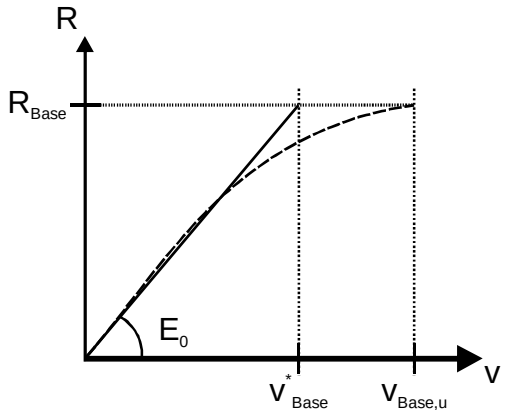
Die Grundmodelle wurden bereits beschreiben. Generell wird die Verschiebung an der Basis der Grundplatte betrachtet. Die Grundwerte dieser Verschiebung v^* existieren für die Modell STANZE und DUEBEL als Base und Lug, also, als v^*_{Base} und v^*_{Lug}.

Die übertragenen Lasten V_{Base} und V_{Lug} ermitteln sich nach den Formelapparaten, die oben hergeleitet wurden. An dieser Stelle ist lediglich das Endergebnis der Iteration von Interesse. Wobei allerdings anzumerken ist, dass die Ankerkräfte und damit die Verdrehwinkel Φ nicht immer unabhängig berechnet werden dürfen! Siehe hierzu die Ausführungen im Folgenden.

A5.2.1 STANZE – ZUSAMMENSTELLUNG MODELL DER VERSCHIEBUNG

Für die Kraft-Verschiebungs-Beziehung wird eine Parabelbeziehung analog dem Parabel-Rechteckdiagram angesetzt. Für den Exponenten der Parabel sind Werte im Bereich von 1,41 und 1,60 sinnvoll. Eine Wahl wird bei dem Vergleich der Nachrechnung mit den Versuchsergebnissen gewählt. Für den Faktor n = 1,41 ergibt sich eine Anfangssteigung der Verschiebungs-Kraft-Beziehung von E_0, für den Wert $n = 1{,}6$ wird am Anfang die 1,1-fache Steifigkeit angesetzt.

Der Bruchwert $v_{Lug,u}$ ermittelt sich aus dem Grundwert v^*_{Lug}:



$$v_{Base,u} = \alpha_{3D} \cdot v^*_{Base}$$

$$mit:$$

$$v^*_{Base} = a \cdot \ln\left(h_{Base}\right) - 0{,}135$$

$$a = \frac{0{,}86 \cdot f_c + 73}{1000}$$

Die Verschiebungs-Kraft-Beziehung lautet dann:

$$R_{Base,v} = -R_{Base}\left[1 - \left(1 - \frac{v}{v_{Base,u}}\right)^n\right]$$

$$mit:$$

$$n = \sqrt{2} \qquad E = E_0$$

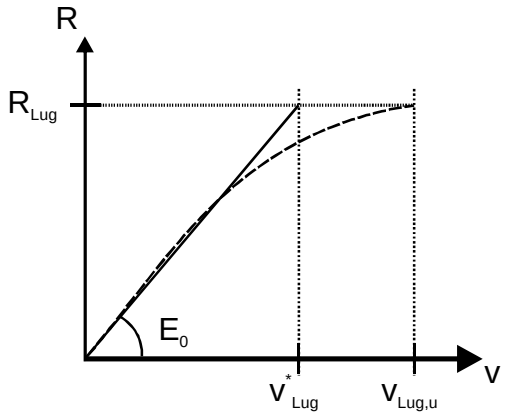
$$n = 1{,}6 \qquad E = 1{,}1 \cdot E_0$$

$$E_0 = \frac{R_{Base}}{v^*_{Base}}$$

A5.2.2 DUEBEL – ZUSAMMENSTELLUNG MODELL DER VERSCHIEBUNG

Für die Kraft-Verschiebungs-Beziehung wird eine Parabelbeziehung analog dem Parabel-Rechteckdiagram angesetzt. Für den Exponenten der Parabel sind Werte im Bereich von 1,41 und 1,60 sinnvoll. Eine Wahl wird bei dem Vergleich der Nachrechnung mit den Versuchsergebnissen gewählt. Für den Faktor n = 1,41 ergibt sich eine Anfangssteigung der Verschiebungs-Kraft-Beziehung von E_0, für den Wert $n = 1{,}6$ wird am Anfang die 1,1-fache Steifigkeit angesetzt.

Der Bruchwert $v_{Lug,u}$ ermittelt sich aus dem Grundwert v^*_{Lug}:



$$v_{Lug,u} = 0{,}09 \cdot \left(\frac{EI_{Lug}}{l_{Lug}^3} \right)^{0{,}25} \cdot v^*_{Lug}$$

mit :

$$v^*_{Lug} = a_i \cdot \left(h_L + c \right) \leq v_{L,\max}$$

und :

$$a_1 = 0{,}7532 \cdot 10^{-3} \cdot f_c^{2/3} \cdot 0{,}99^{t_L}$$

oder

$$a_2 = 7{,}3637 \cdot 10^{-12} \cdot E_c^2 \cdot 0{,}99^{t_L}$$

$$c = 0{,}215 \cdot t_L$$

$$v_{L,\max} = 0{,}07338 \cdot f_c^{0{,}29} \cdot t_L^{0{,}21}$$

Die Verschiebungs-Kraft-Beziehung lautet dann:

$$V_{E,Lug} = -V_{E,Lug,u} \left[1 - \left(1 - \frac{v}{v_{Lug,u}} \right)^n \right]$$

mit :

$$n = \sqrt{2} \qquad E = E_0$$

$$n = 1{,}6 \qquad E = 1{,}1 \cdot E_0$$

$$E_0 = \frac{V_{E,Lug,u}}{v^*_{Lug}}$$

A5.3 ÜBERLAGERUNG UND KOMBINATION

Bisher existieren ein Rechenverfahren zur Berechnung der vor der Grundplatte übertragbaren Lasten, Modell STANZE und ein Rechenverfahren für die vor dem Dübel übertragbaren Lasten, Modell DUEBEL. Beide Modelle berechnen die übertragbare Last anhand der sich am Einbauteil einstellenden Verformungen. Diese wiederum sind maßgeblich bestimmt durch die Beanspruchung des Zugankers, also der in diesem Bauteil herrschenden Kraft, die wiederum durch die übertragene Last bestimmt wird. Damit hat man in beiden Fällen einen iterativen Prozess zu durchlaufen, um die Lasten und Verformungen am Einbauteil zu bestimmen.

Die Übertragung der horizontalen Beanspruchung *V* ist in beiden Modellen räumlich getrennt, und findet einmal vor der Grundplatte (Modell STANZE) und zum anderen Mal vor dem Dübel/Lug (Modell DUEBEL) statt. Jedoch ist für beide Modelle ein Kräfteausgleich im Zuganker notwendig. Da die Beanspruchung und damit die Verformung am Zuganker jedoch die übertragbaren Lasten *V* direkt beeinflusst, muss die Zugankerkraft eines Modells bei der Berechnung des anderen Modells berücksichtigt werden.

Für die Ermittlung der maximal übertragbaren Lasten ist dies verhältnismäßig leicht zu bewerkstelligen, es muss lediglich etwas mehr iteriert werden. Bei der Kombination der Modelle hingegen ist dann zusätzlich die Bedingung einzuhalten, dass gleiche Verschiebungen in den Einzelmodellen herrschen müssen. Nun treten die jeweils maximalen übertragbaren Lasten aber nicht bei den gleichen Verschiebungen auf, womit sich ein weiteres iterativ zu lösendes Problem stellt.

An dieser Stelle werden die im Abschnitt A5.2 -- Grundmodelle -- definierten Kraft-Verschiebungs-Beziehungen benötigt. Damit kann für eine gegebene Verschiebung die vorhandene übertragene Last ermittelt werden. Die hierzu gehörende Zuganker-beanspruchung kann dann näherungsweise linear interpoliert werden. Ein genauerer Ansatz ist nicht notwendig, da die Gesamtgenauigkeit des Verfahrens dies nicht unterstützt.

A5.4 VORGEHEN

Die Berechnungen BASE und LUG werden zusammengefasst. Die Berechnung der einzelnen Traganteile bleibt weiterhin getrennt, jedoch werden einzelne Effekte aus der einen Berechnung in die andere Berechnung übernommen. Dies gilt vor allem für die Ankerzugkraft und die Berücksichtigung der zusätzlichen äußeren Beanspruchung F_E und M_E. Praktisch wird dies durchgeführt, indem die Berechnungsdateien „@STANZE.xls“ und „@DUEBEL.xls“ in der Datei „@Einbauteil.xls“ zusammengefasst werden. Hierbei bleiben die beiden Teile weitgehend erhalten, werden jedoch einem gemeinsamen Eingabeblatt unterstellt.

Das Blatt Einbauteil umfasst hiermit die Schritte bzw. Bereiche:

- Eingabe der Systemparameter und Lasten
- Zusammenstellung für das System **DUEBEL**, eine zusätzliche Ankerkraft aus einem zusätzlich vorhandenen System STANZE kann berücksichtigt werden.
- Zusammenstellung für das System **STANZE**, eine zusätzliche Ankerkraft aus einem zusätzlich vorhandenen System DUEBEL kann berücksichtigt werden.
- Bereinigen der Zusammenstellungen um diese zusätzlichen Kräfte und den äußeren Lasten, da diese sonst doppelt eingehen.
- Überlagerung der Systeme/Modelle

A5.4.1 ÜBERLAGERUNG DER MODELLE

Für die Überlagerung wird als gemeinsamer Parameter die Verschiebung der Einbauteile herangezogen. Es gilt immer, dass die Verschiebung in beiden Modellen gleich

sein muss, damit beide Lastabtragungen zusammenwirken können. Diese Bedingung ist obligatorisch, da das Einbauteil eine Einheit darstellt.

Für das Betonversagen vor dem Dübel und vor der Grundplatte, also das Betonversagen am Einbauteil können nun die kombinierten Versagenslasten ermittelt werden. Ein Versagen des Zugankers und er Einzelkomponenten des Einbauteils wird hierbei ausgeklammert. Es wird davon ausgegangen, dass diese Komponenten entsprechend der übertragbaren Lasten dimensioniert werden, oder sind. Eine entsprechende Kontrolle bzw. Bemessung ist unbedingt erforderlich, soll an dieser Stelle aber nicht interessieren. Analog den Versagensarten am Dübel sind folgende Konstellationen denkbar:

- 1) Versagen der Stirnplatte vor Dübelversagen
    - A) Für den Verschiebungszustand des Stirnversagens (Modell STANZE) wird der Kräftezustand vor dem Dübel ermittelt und addiert.
    - B) Ist die Dübeltraglast größer als im Fall 1A), so kann diese ausgenutzt werden.
    - C) Ist die Dübeltraglast kleiner als im Fall 1A), so tritt ein Gesamtversagen ein.
- 2) Versagen des Dübels vor einem Stirnplattenversagen.
    - A) Für den Verschiebungszustand des Dübelversagens (Modell DUEBEL) wird der Kräftezustand vor der Grundplatte (Modell STANZE) ermittelt und addiert.
    - B) Ist die Grundplattentraglast größer als im Fall 2A), so kann diese ausgenutzt werden.
    - C) Ist die Dübeltraglast kleiner als im Fall 2A), so tritt ein Gesamtversagen ein.

Bedingt durch die Auslegung der Versuche konnte der Falle 2B) im Versuch nicht auftreten. Dieser ist jedoch theoretisch denkbar und bei entsprechender Auslegung der Einbauteile durchaus realistisch. Wohl aber nicht unbedingt wirtschaftlich, da die Lastübertragung vor dem Dübel wesentlich gutmütiger und leistungsfähiger ist.

A5.4.2 UMSETZUNG

Die Umsetzung erfolgt, wie oben erwähnt in der Datei „@EINBAUTEIL.xls“. Die Datei „@EINBAUTEIL.xls“ gliedert sich in 3 Teile:

- EINBAU Erfassung der Eingabewerte und der Ausgabewerte, sowie die Auswertung (Überlagerung)
- STANZE Berechnung am System STANZE, siehe Zusammenstellung
- DUEBLE Berechnung am System DUEBEL, siehe Zusammenstellung.

Die Teile „STANZE“ und „DUEBEL“ wurden bereits oben behandelt. Im Teil „EINBAU“ erfolgt die Benutzereingabe. Hier werden die Eingabewerte zu Geometrie, Beanspruchung und Material zusammengefasst, und die Ergebnisse der Teilberechnungen ausgewertet. Die Überlagerung der Modelle, bzw. die additive Tragwirkung mehrerer Modelle gemeinsam, wird wie in Absatz A5.4.1 ausgeführt umgesetzt.

- Eingabeparameter
  - Position
  - Material
  - Geometrie
  - Beanspruchung
- Modell DUEBEL
  - 3D-Parameter
  - Zusammenstellung am Modell DUEBEL
- Modell STANZE
  - 3D-Parameter
  - Zusammenstellung am Modell STANZE
- Auswertung
  - Versagen BASE
    - 1A) Versagenslast BASE mit zugehörender Last am LUG
    - 1B) Versagenslast LUG nach BASE-Versagen
    - Auswertung der Versagensart
      - GnG **G**esamtversagen **n**ach **G**rundplattenversagen
      - AV **A**nker**V**ersagen
  - Versagen LUG
    - 2A) Versagenslast LUG mit zugehörender Last an BASE
    - 2B) Versagenslast BASE nach LUG-Versagen
    - Auswertung der Versagensart
      - GnD **G**esamtversagen **n**ach **D**übelversagen (LUG)
      - AV **A**nker**V**ersagen

Bei der Überlagerung muss der Ankerkraft ein gesonderter Blick gewidmet werden. Sowohl die Lastabtragung vor der Stirn, als auch diejenige vor dem Dübel sind abhängig von der Verdrehung des Einbauteils zur Betonoberfläche. Diese Verdrehung wird wiederum maßgebend durch die Verformungen des rückwärtig liegenden Zugankers bestimmt. Das heißt, die Beanspruchung des Zugankers aus Lastabtragung vor dem Dübel beeinflusst die Lastabtragung vor der Stirn und ungekehrt. Aus diesem Grund wird in den Berechnungen eine zusätzliche Ankerzugkraft eingeführt, die bei der Dübelberechnung die Ankerkraft aus der Stirnberechnung berücksichtigt, und umgekehrt. Für die Berechnung am Modell LUG siehe Spalte „AC“, für die Berechnung am Modell Stanze siehe Spalte „AS“.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
1																									
2	Bereich Eingabe:			Parameter Material + Geometrie + Last																					
3				Material				Geometrie											zul sigma	500		Beanspruchung			
4																							F_{extern}	M_{extern}	
5	Bezeichnung			f_c	E_c	E_s	G_s	h_{Base}	b_{Base}	h_{Lug}	t_{Lug}	b_{Lug}	a_{Lug}	a_{Anchor}	a1	a2	EI_{Lug}	GA_{Lug}	l_{Anchor}	A_{Anchor}	L/EA	e_v	N_E	M_E	
6				[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[Nmm²]	[Nmm²]	[mm]	[mm²]	[mm/kN]	[mm]	[kN]	[kNm]	
7				Ec=9500*(fc+8)^(1/3)																					

	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO
1				Zusammenstellung												
2	Modell **DUEBEL**			Modell **LUG**			Modell **DUEBEL**			Modell **LUG**			Modell **DUEBEL**			
3	im Bruchzustand				at the lug					Components						
4																
5	3D-Faktor Reibung	Δl_{Kopf}		$F_{A,R,base}$	$V_{E,Lug,u}$	$F_{A,lug}$	$u'_{V,Lug}$	$u_{V,Lug,u}$	$u_{F,FA,lug}$	$R'+\Delta R_{2,i}$	$e_{i,lug}$	$R_{Rear,i}$	F_{lug}	$R_{Rel,lug}$	$F_{Ro,lug}$	
6	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	
7																

	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC
1					Zusammenstellung									
2	Modell **STANZE**			Modell **BASE**		Modell **STANZE**			Modell **BASE**		Modell **STANZE**			
3	im Bruchzustand				at the base					Components				
4														
5	3D-Faktor Reibung	Δl_{Kopf}		$F_{A,R,lug}$	$V_{E,base}$	$F_{A,base}$	$u'_{V,base}$	$u_{V,base,u}$	$u_{F,FA,base}$	R_{base}	e_{base}	$R_{Rel,base}$	$F_{Ro,base}$	
6	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[kN]	
7														

	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW	BX	BY	BZ	CA
1	ohne N_E, M_E, $F_{A,base}$										Auswertung													
2	Modell DUEBEL					Modell STANZE					Versagen **BASE**		$u_{V,Lug} > u_{V,Base}$											
3											**1A)** $V_{E,ges,uv,Base}$						**1B)**				**1C)**			
4											n=	1,6	(Exponent)				Dübelversagen nach Stirnversagen				Versagen			
5	$V_{E,lug}$	$aR_{Ro,lug}$	$F_{A,lug,ges}$	$F_{A,lug,Ve}$		$V_{E,base}$	$aR_{Ro,base}$	$F_{A,base,ges}$	$F_{A,base,Ve}$		$u_{V,base,u}$	$V_{E,base}$	zug $V_{E,lug}$	$V_{E,ges}$	$F_{A,ges}$		$u_{V,lug,u}$	$V_{E,lug}$	$F_{A,ges}$					
6	[kN]	[mm]	[kN]	[kN]		[kN]	[mm]	[kN]	[kN]		[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]		[mm]	[kN]	[kN]					
7																								

	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW
1																						
2	Versagen **LUG**			$u_{V,Lug} < u_{V,Base}$											Ergebniss							
3	**2A)** $V_{E,ges,uv,Lug}$						**2B)**				**2C)**				Gesamt				Stirnversagen			
4	n=	1,6	(Exponent)				Stirnversagen nach Dübelversagen				Versagen											
5	$u_{V,lug,u}$	$V_{E,lug}$	zug $V_{E,base}$	$V_{E,ges}$	$F_{A,ges}$		$u_{V,base,u}$	$V_{E,base}$	$F_{A,ges}$						$V_{E,ges,u}$	$F_{A,ges,u}$	$u_{V,u}$		$V_{E,ges,base}$	$F_{A,ges,base}$	$u_{V,base}$	
6	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]		[mm]	[kN]	[kN]						[kN]	[kN]	[mm]		[kN]	[kN]	[mm]	
7																						

Abbildung 172: Kopfzeilen und Gliederung Modul "EINBAU"

Diese zusätzliche Ankerzugkraft muss theoretisch für jede zu betrachtende Versagenskonstellation explizit eingesetzt werden. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass im Allgemeinen dieser Wert großzügig behandelt werden darf.

Ein weiterer Aspekt der Berechnung in getrennten Teilsystemen ist, dass die äußere Beanspruchung in jedem Modell voll angesetzt wird. Da diese in jedem Teilsystem für die Ermittlung der Verdrehung voll wirkt, ist dies richtig. Bei der Überlagerung der Systeme darf diese ermittelte vertikale Beanspruchung dann jedoch nicht Additiv behandelt werden. Dies wirkt sich auf die Ankerzugkraft und auf die Druckkraft (F_0 *bzw.* R_0) zwischen Grundplatte und Beton vor dem Dübel aus. Da F_0 aber über die Reibung einen Beitrag zur Lastabtragung leistet, muss diesem Aspekt Beachtung gezollt werden.

Stellt man sehr hohe Anforderungen an das Ergebnis der Berechnung, so kommt man also nicht umhin, das System Einbauteil auch als Gesamtsystem zu berechnen, und nicht in zwei Teilsysteme aufzuspalten. Die Aufspaltung ist hingegen dann sinnvoll, wenn einzelne Traganteile untersucht und ausgenutzt werden sollen, oder diese betont werden sollen. Dies ist immer der Fall, wenn nach Ausfall eines Tragsystems das Zweite die volle Lastabtragung übernehmen soll, und die Last eventuell sogar noch weiter gesteigert werden soll und kann. Die Auswirkungen der Berücksichtigung dieser einzelnen Komponenten oder die Auswirkung von deren Missachtung werden im Folgenden diskutiert.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1	**Berechnung mit Modell DUEBEL, hier Ansatz mit Streckenlasten am Dübel**																						
2	Werte aus "Einbau"						Parameter Geometrie + Material + Last																aus Base
3																							
4	**geprüft 16.11.2004**																						alles aus Base
5				3D-Faktor	Reibung	Δl_{Kopf}	$h_{Dübel}$	$t_{Dübel}$	$b_{Dübel}$	a_{Lug}	a_{Anchor}	a1	a2	b_{Base}	$EI_{Dübel}$	$GA_{Dübel}$	L/EA	f_c	E_c	e_v	N_E	M_E	$F_{A,RBase}$
6				[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[Nmm²]	[Nmm²]	[mm/kN]	[N/mm²]	[N/mm²]	[mm]	[kN]	[kNm]	[N]
7																							
8																							

	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP
1	**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Ber**
2	Grundwerte													nur Spannung					
3				Lastangriff am Lug										für u_{cz}^*					
4	$h_{Dübel,max}$		R_L^*		Empirisch 1				P/R				Wahl			v_L^*			
5	h_L^*	$R_{L,1}$	$R_{L,2}$	R_L^*	$e_{1,Lug}$	α	β	$e_{L,1}^*$	$e_{L,2}^*$	η	k	$e_{L,3}^*$	e_L^*	h_2^*	$v_{L,max}$	$v_{L,xu}$	v_L^*	$tan\ \Phi_{Grenz}$	
6	**[mm]**	[kN]	[kN]	**[N]**	[mm]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[mm]	**[mm]**	[mm]	[mm]	[mm]	**[mm]**	[-]	
7																			
8																			

	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO	BP
1	**echnung**		**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**		
2	Iteration F_A, Schritt 1																									
3	nue=		0,2	(für alle weiteren Schritte)											aus A(	$v_{3,1}$ ohne R_R		$v_{2,1}$ mit Rechteck		hilfe:	0,75			2,000		
4	β=		0,8	(für alle weiteren Schritte)												hinter dem Lug		vor dem Lug						1,666		
5	h_L^*	R_L^*	e_L^*	v_L^*	$V_{E0,Lug}$	F_{L0}	F_{A0}	R_{Ro}	$u_{A,FA0}$	$u_{L,FA0}$	u_{cz}^*	α_1	$tan\ \Phi$	$v_{1,1}$	h_2	$v_{3,1}$	$R_{Rear,1}$	$v_{2,1}$	X1	X2	$\Delta R_{2,i}$	$F_{Lug,1}$	$V_{E1,Lug}$	a_{Ro}	$F_{A1,all}$	
6	**[mm]**	**[N]**	**[mm]**	**[mm]**	[N]	[N]	[N]	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[N]	[N]	[mm]	[N]	
7																		#DIV/0!								
8																										

	BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW	BX	BY	BZ	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI
1	**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Ber**
2	Iteration F_A, Schritt i =			2															
3									$v_{3,i}$ ohne R_R		$v_{2,i}$ mit Rechteck R_L^* und R_R								
4									hinter dem Lug		vor dem Lug								
5	$F_{Ro,i-1}$	$u_{A,FA,i-1}$	$u_{L,FA,i-1}$	u_{cz}^*	α_1	$tan\ \Phi$	$R_{Rei,i-1}$	$v_{1,i}$	$v_{3,i}$	$R_{Rear,i}$	$v_{2,i}$	$x1_{,i}$	$x2_{,i}$	$\Delta R_{2,i}$	$F_{Lug,i}$	$V_{E,i}$	$a_{Ro,i-1}$	$F_{A,i}$	
6	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[N]	[mm]	[mm]	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[N]	[N]	[mm]	[N]	
7																			
8																			

weiter Iterationen

	HM	HN	HO	HP	HQ	HR	HS	HT	HU	HV	HW	HX	HY	HZ	IA	IB	IC	ID	IE
1	**Berechnung**				**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**		
2	Iteration F_A, Schritt i =			10															
3									$v_{3,i}$ ohne R_R		$v_{2,i}$ mit Rechteck R_L^* und R_R								
4									hinter dem Lug		vor dem Lug								
5	$F_{Ro,i-1}$	$u_{A,FA,i-1}$	$u_{L,FA,i-1}$	u_{cz}^*	α_1	$tan\ \Phi$	$R_{Rei,i-1}$	$v_{1,i}$	$v_{3,i}$	$R_{Rear,i}$	$v_{2,i}$	$x1_{,i}$	$x2_{,i}$	$\Delta R_{2,i}$	$F_{Lug,i}$	$V_{E,i}$	$a_{Ro,i-1}$	$F_{A,i}$	
6	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[N]	[mm]	[mm]	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[N]	[N]	[mm]	[N]	
7																			
8																			

	IF	IG	IH	II	IJ	IK	IL	IM	IN
1	Zusammenstellung								
2									
3	Am Dübel								
4	R_{Lug}								
5	$R^*+\Delta R_{2,i}$	e_{Lug}	$R_{Rear,i}$	$R_{Rei,i-1}$	$V_{E,i}$	$F_{A,i}$	$u_{A,FA,i}$	$F_{Ro,i}$	$F_{Lug,i}$
6	[N]	[mm]	[N]	[N]	[N]	[N]	[mm]	[N]	[N]
7									
8									

Abbildung 173: Kopfzeilen und Gliederung Modul "DUEBEL"

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
1	Berechnung mit Modell STANZE																			Berechnung			Berechnung			Berech
2	Werte aus "Einbau"						Parameter Geometrie + Material + Last													Grundwerte						
3				Faktor	Reibung	$D/_{Kopf}$																				
4	Versuch			3D																						
5				3D-Faktor Reibung		Δl_{Kopf}	h_{Base}	b_{Base}	a1	a_{Anchor}	l_{Anchor}	A_{Anker}	L/EA	f_c	E_c	e_v	N_E	M_E	alles aus Lug $F_{A,RLug}$	σ_{Base}^*	$R_{Base,a}^*$	$R_{Base,b}^*$	v_{Base}^*	$e_{Base,a}^*$	$e_{Base,b}^*$	a_R^*
6	geprüft 16.11.2004			[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm²]	[mm/kN]	[N/mm²]	[N/mm²]	[mm]	[kN]	[kNm]	[kN]	[N/mm²]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
7																					Gl (1.6)	0,90	(0.8)	0,5		10000
8																						0,80				

	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ
1	hung		Berechnung				Berechnung		Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung		
2							1 te Verbesserung am verformten System																			
3																							$R_{0,i}$	mit $R_{0,i-1}$		
4	$\tan\Phi_{Grenz}$	$\tan\Phi_{Grenz}$	$\tan\Phi_{Grenz}$	Φ_{Grenz}	$F_{Anchor,0}$		$u_{y\ Anker}$	$\tan\Phi$	Φ	$u_{B_oben_2}$	$u_{B_unten_2}$	h_{red}	R_{Base_2} (Gl. 1.6)			R_{Base_2}	e_B			e_B	R_{Reib}	V_E	R_0	a_R	F_A	
5	Gl (1.4)	Gl (1.1)			[kN]		[mm]	aus ist	aus ist	[mm]	[mm]	[mm]	--->	--->	--->	[kN]	--->	--->	--->	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	
6	2,00E-05				(>0)		(>0)						a	b	c		a	b	c							
7	1,000												0,5											1,00	auf f_c	
8	0,667	0,08																						1,00	$x\text{-}\Phi/\Phi_{Grenz}$	

	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT
1			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung	
2	te Verbesserung am verformten System																		
3																$R_{0,i}$	mit $R_{0,i-1}$		
4	$\tan\Phi$	Φ	$u_{B_oben_2}$	$u_{B_unten_2}$	h_{red}	R_{Base_2} (Gl. 1.6)			R_{Base_2}	e_B			e_B	R_{Reib}	V_E	R_0	a_R	F_A	
5	aus ist	aus ist	[mm]	[mm]	[mm]	--->	--->	--->	[kN]	--->	--->	--->	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	
6						a	b	c		a	b	c							
7	1,25																	auf f_c	
8																		$x\text{-}\Phi/\Phi_{Grenz}$	

	BU	BV	BW	BX	BY	BZ	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN
1		Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Be
2		3 te Verbesserung am verformten System																		
3																	$R_{0,i}$	mit $R_{0,i-1}$		
4	$u_{y\ Anker}$	$\tan\Phi$	Φ	$u_{B_oben_2}$	$u_{B_unten_2}$	h_{red}	R_{Base_2} (Gl. 1.6)			R_{Base_2}	e_B			e_B	R_{Reib}	V_E	R_0	a_R	F_A	
5	[mm]	aus ist	aus ist	[mm]	[mm]	[mm]	--->	--->	--->	[kN]	--->	--->	--->	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	
6	(>0)						a	b	c		a	b	c							
7																		auf f_c		
8																		$x\text{-}\Phi/\Phi_{Grenz}$		

	HE	HF	HG	HH	HI	HJ	HK	HL	HM	HN	HO	HP	HQ	HR	HS	HT	HU	HV	HW	HX
1	rechnung		Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung		
2		10 te Verbesserung am verformten System																		
3																	$R_{0,i}$	mit $R_{0,i-1}$		
4	$u_{y\ Anker}$	$\tan\Phi$	Φ	$u_{B_oben_2}$	$u_{B_unten_2}$	h_{red}	R_{Base_2} (Gl. 1.6)			R_{Base_2}	e_B			e_B	R_{Reib}	V_E	R_0	a_R	F_A	
5	[mm]	aus ist	aus ist	[mm]	[mm]	[mm]	--->	--->	--->	[kN]	--->	--->	--->	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	
6	(>0)						a	b	c		a	b	c							
7																		auf f_c		
8																		$x\text{-}\Phi/\Phi_{Grenz}$		

	HY	HZ	IA	IB	IC	ID	IE	IF	IG	IH
1	Zusammenstellung									
2										
3	An der Grundplatte									
4	R_{Base_2}	e_B	R_{Reib}	V_E	R_0	a_R	F_A	$u_{y\ Anker}$	Φ	
5	[kN]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[°]	
6										
7										
8										

Abbildung 174 Kopfzeilen und Gliederung Modul "STANZE"

A5.4.3 GÜLTIGKEIT DER ERGEBNISSE

Bei der bisherigen Rechnung wird davon ausgegangen, dass die zulässige horizontale Betontragfähigkeit ermittelt werden soll. Also ein Versagen des Betons vor der Stirn (Modell BASE) und/oder ein Versagen des Betons vor dem Dübel (Modell LUG) stattfindet. Alle anderen Teile des Systems Einbauteil sind dann für diese Lasten und die Ihnen zugewiesenen Beanspruchungen zu bemessen bzw. Nachzuweisen.

Dies gilt auch für die Zuganker, die wiederum ein eigenes komplexes System darstellen. Im Allgemeinen werden wohl Kopfbolzendübel oder ähnliche Systeme eingesetzt. Die Zugtragmechanismen dieser Teile können anderen Arbeiten entnom-

men werden. Eine Interaktion der Betonbeanspruchung aus Ankerausbruch des Zugankers und Betonbeanspruchung aus Schubkrafteinleitung vor der Stirn und vor dem Dübel muss für übliche Ausbildungen der Einbauteile nicht berücksichtigt werden. Die Beanspruchung aus Schubkrafteinleitung ist sehr lokal auf die Bereiche vor der Stirn und vor dem Dübel begrenzt, und klingt dann sehr rasch ab (räumliche Ausweitung).

Die Betonbeanspruchung aus Zugankerausbruch ist hingegen räumlich sehr ausgedehnt. Die Ausbruchkegel erreichen im Test immer einen Durchmesser der die 4 bis 6 fache Verankerungstiefe beträgt. Für die Berechnung wird hingegen ein Verankerungskegel mit 2facher Verankerungstiefe als Durchmesser angesetzt. Wenn sich nun die Beanspruchungen aus Schubkrafteinleitung und Zugankerbeanspruchung überlagern, so geschieht dies nur in einem sehr kleinen Bereich des Ausbruchkegels. Weiterhin versagt diese Mantelfläche des Ausbruchkegels auf Zug (Betonzugbeanspruchung), während die Schubkrafteinleitung eine Druckkomponente quer zu dieser Versagensfläche darstellt. Also verzögert die Schubkrafteinleitung in Ihrem Bereich ein Versagen der Ausbruchkegelfläche. Das Versagen des Zugankers auf Zug wird also immer auf der der Last abgewanden Seite, durch Ausbilden der Ausbruchkegelfläche beginnen (siehe hierzu auch die Beschreibung der Versuchsergebnisse).

A5.5 VERGLEICH MIT DEN VERSUCHSERGEBNISSEN

Zuerst soll einmal die Qualität der Berechnungsergebnisse ohne Berücksichtigung der jeweils im anderen Lastabtragungsmodell auftretenden Ankerkräfte dargestellt werden. Dies entspricht einer vereinfachten Berechnung an zwei vollständigen Teilsystemen. Bis auf die Dimensionierung der Anker ist dieses Vorgehen durchaus vertretbar, bzw. führt immer noch zu recht guten Ergebnissen. Die Erweiterung des Verfahrens mit Berücksichtigung der Ankerkraft aus beiden Modellen erhöht den Aufwand für die Berechnung erheblich. Genau genommen muss die jeweils zugehörende Ankerkraft angesetzt werden. Die Berechnung und Berücksichtigung der Ankerkräfte für Versagen im Modell „STANZE“ und Versagen im Modell „DUEBEL“ ist nicht ausreichend, da diese Lasten nicht am Einbauteil addiert werden dürfen. Im Regelfall ist somit zu untersuchen:

- Versagenslast der Stirn, mit zugehöriger Dübelkraft und zugehöriger Ankerkraft
- Dübel trägt diese Last alleine und zugehörende Ankerkraft
- Versagenslast des Dübels mit zugehörender Ankerkraft

Auf der sicheren Seite für die Ankerkraft können jedoch die beiden Maxima addiert werden. Für die Versagenslasten vor der Stirn und vor dem Dübel liegen die Werte dann etwas mehr auf der sicheren Seite.

A5.5.1 OHNE BERÜCKSICHTIGUNG DER ANKERLAST AUS JEWEILS 2TEM TRAGANTEIL

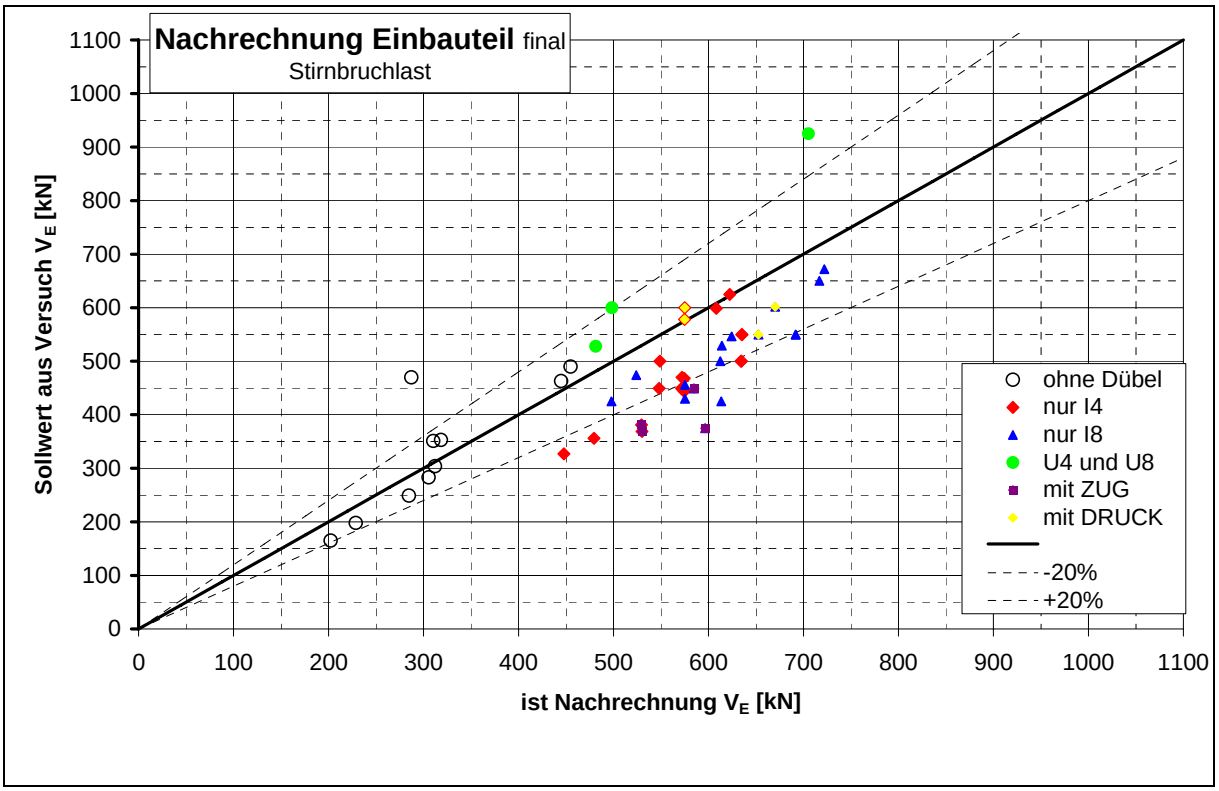


Abbildung 175: Nachrechnung der Stirnbruchlasten für die gültigen Versuche

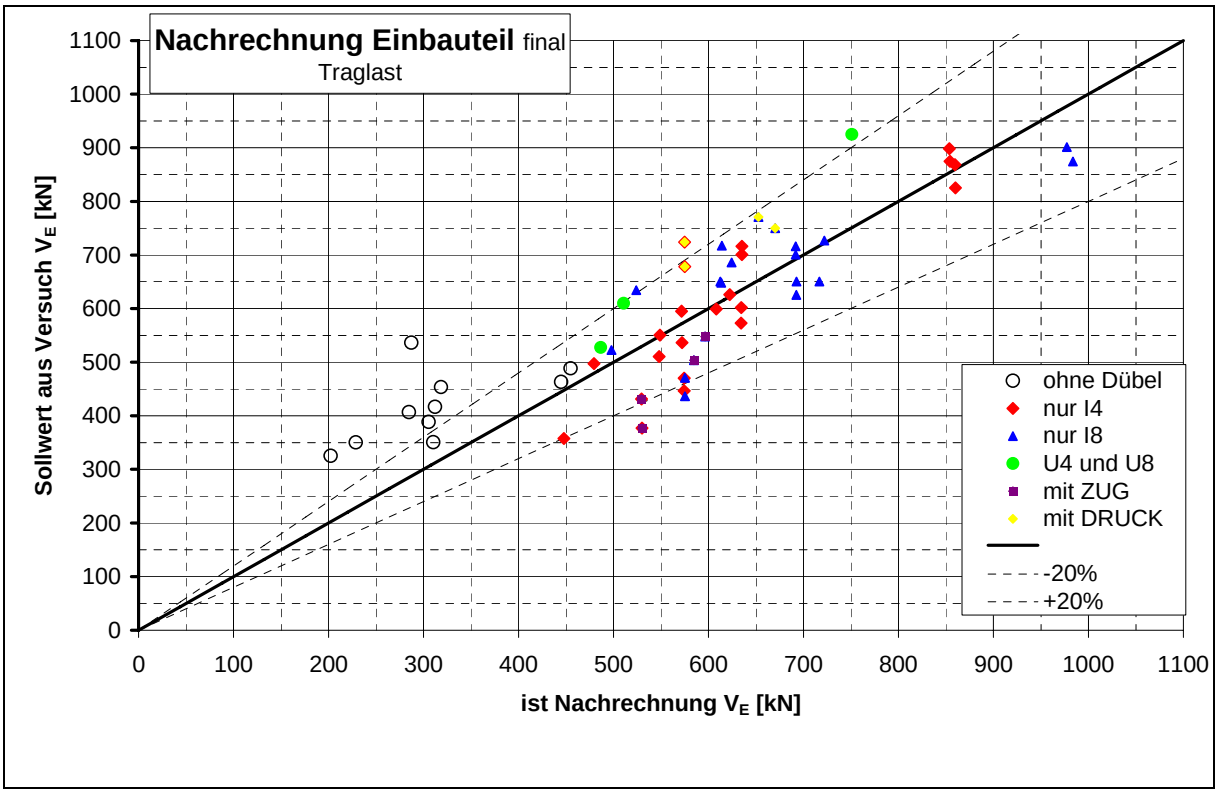


Abbildung 176: Nachrechnung der Traglast für die gültigen Versuche

A5.5.2 MIT „EXAKTER“ BERÜCKSICHTIGUNG DER ANKERKRAFT

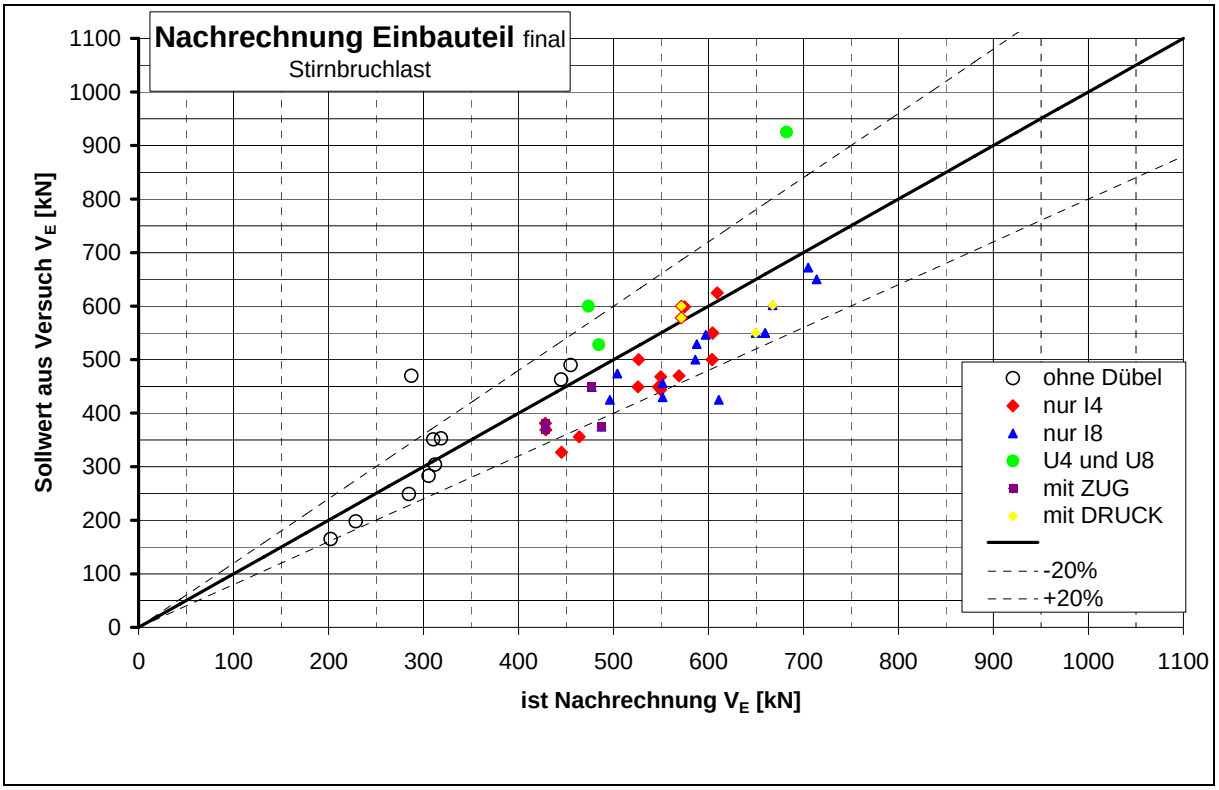


Abbildung 177: Nachrechnung der Stirnbruchlasten für die gültigen Versuche mit $F_{Anker,anders}$

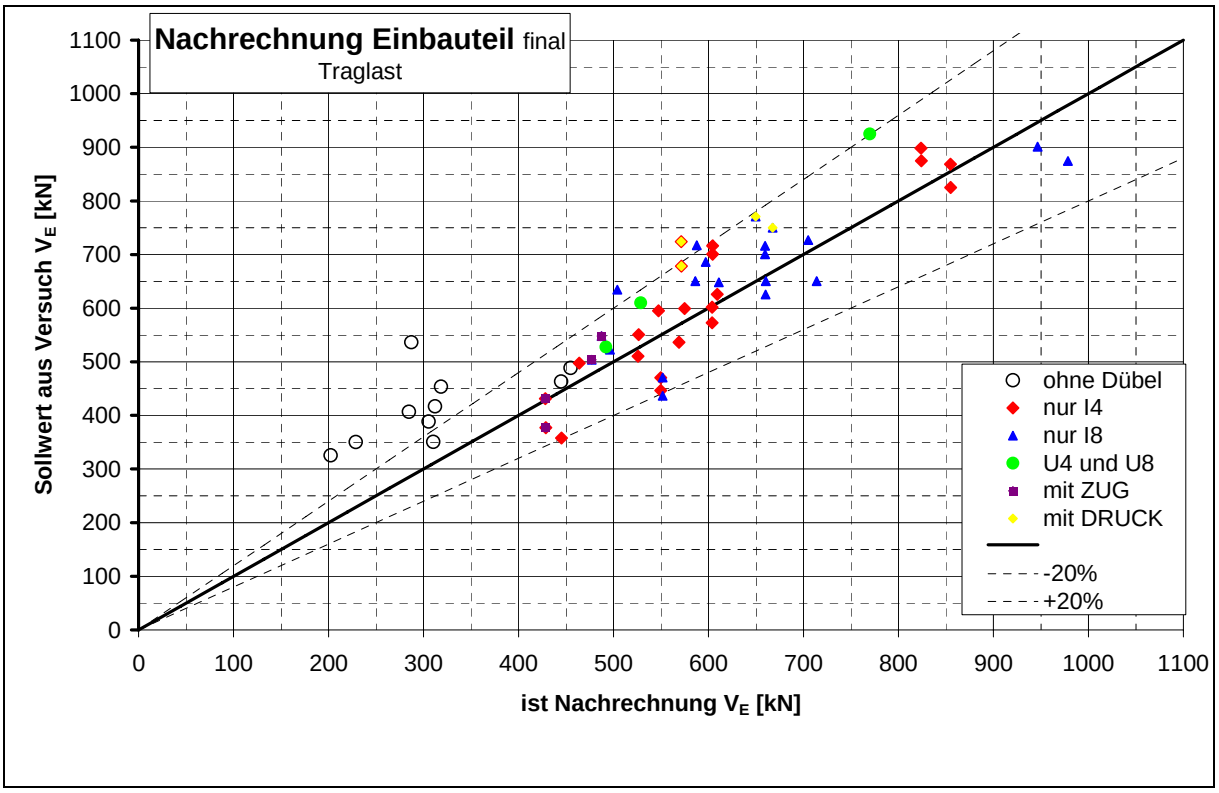


Abbildung 178: Nachrechnung der Traglast für die gültigen Versuche mit $F_{Anker,anders}$

A5.5.3 DARSTELLUNG ALLER VERSUCHE NACH 1

und ohne Berücksichtigung der Gültigkeit des Versagenskriteriums

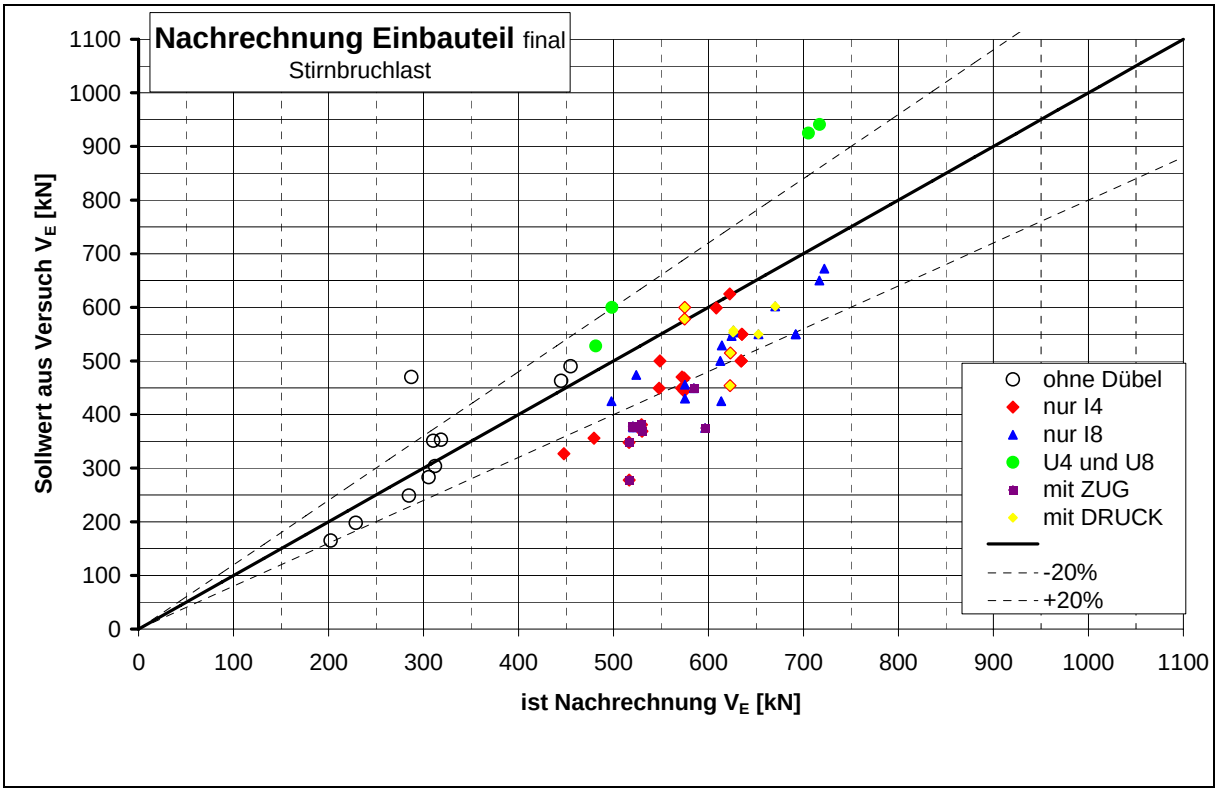


Abbildung 179: Nachrechnung der Stirnbruchlasten für alle Versuche

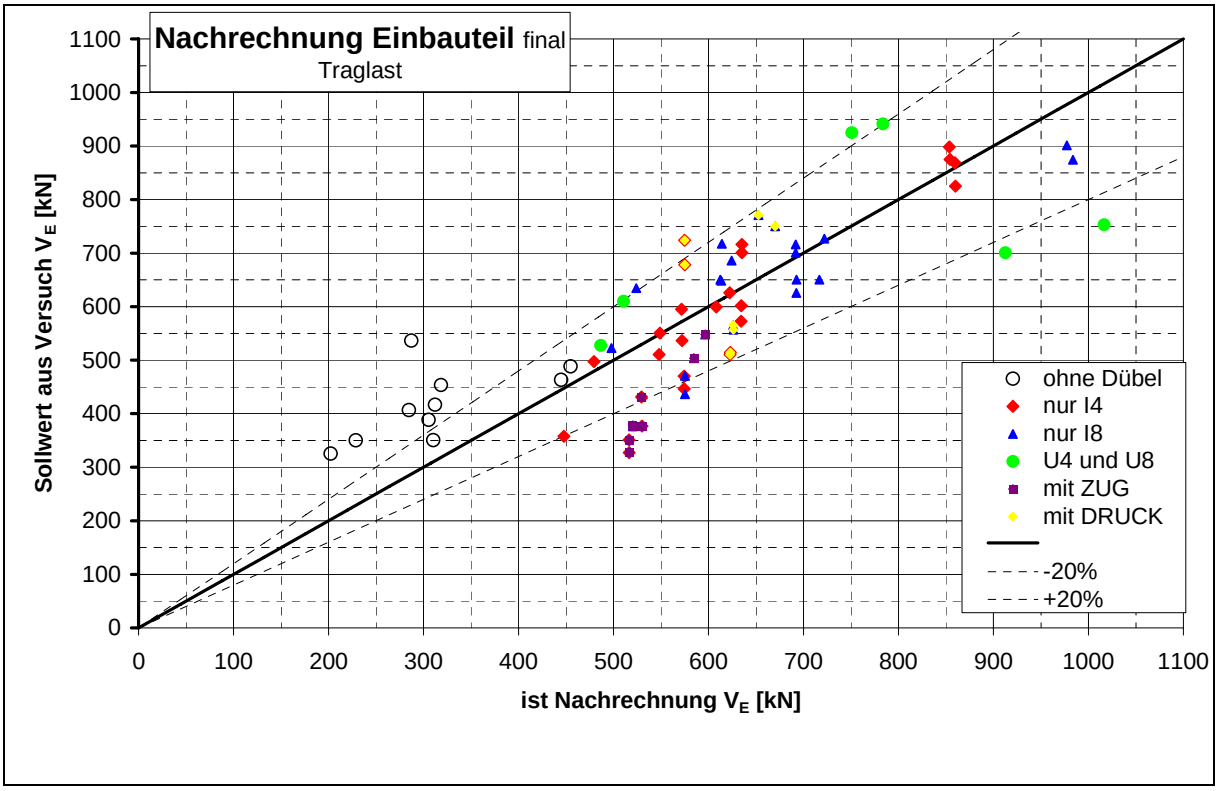


Abbildung 180: Nachrechnung der Traglast für alle Versuche

A5.5.4 VERGLEICH

Interessant ist ein Vergleich der Ergebnisse nach Absatz A5.5.1 und Absatz A5.5.2, der die Qualitätssteigerung bei jedoch stark erhöhtem Aufwand für die Berechnung zeigt. Die Werte ohne Berücksichtigung der Ankerkraft aus der Jeweils anderen Tragwirkung (Modell STANZE oder DUEBEL) sind grau dargestellt. Die Ergebnisse mit entsprechender Berücksichtigung dann farbig.

Für die Ermittlung der Stirnbruchlast, siehe Abbildung 191 wird die Überschätzung der Stirnbruchlasten hierdurch deutlich abgemindert. Es gelingt nahezu in den ursprünglich anvisierten Grenzen von +20% zu bleiben.

Für die Berechnung der Traglasten, siehe Abbildung 194 hingegen wird durch diesen zusätzlichen Berechnungsaufwand lediglich das Sicherheitsniveau im Ganzen vergrößert. Abgesehen von wenigen Punkten wandern alle Ergebnisse mehr oder weniger weit nach links. Eine Ausnahme bilden die grün dargestellten Versuche mit sehr steifen Dübeln die sogar nach rechts wandern. Diese werden aber prinzipbedingt in Ihrer Traglast unterschätzt, womit sich hier keine gravierenden Nachteile für das Sicherheitsniveau ergeben.

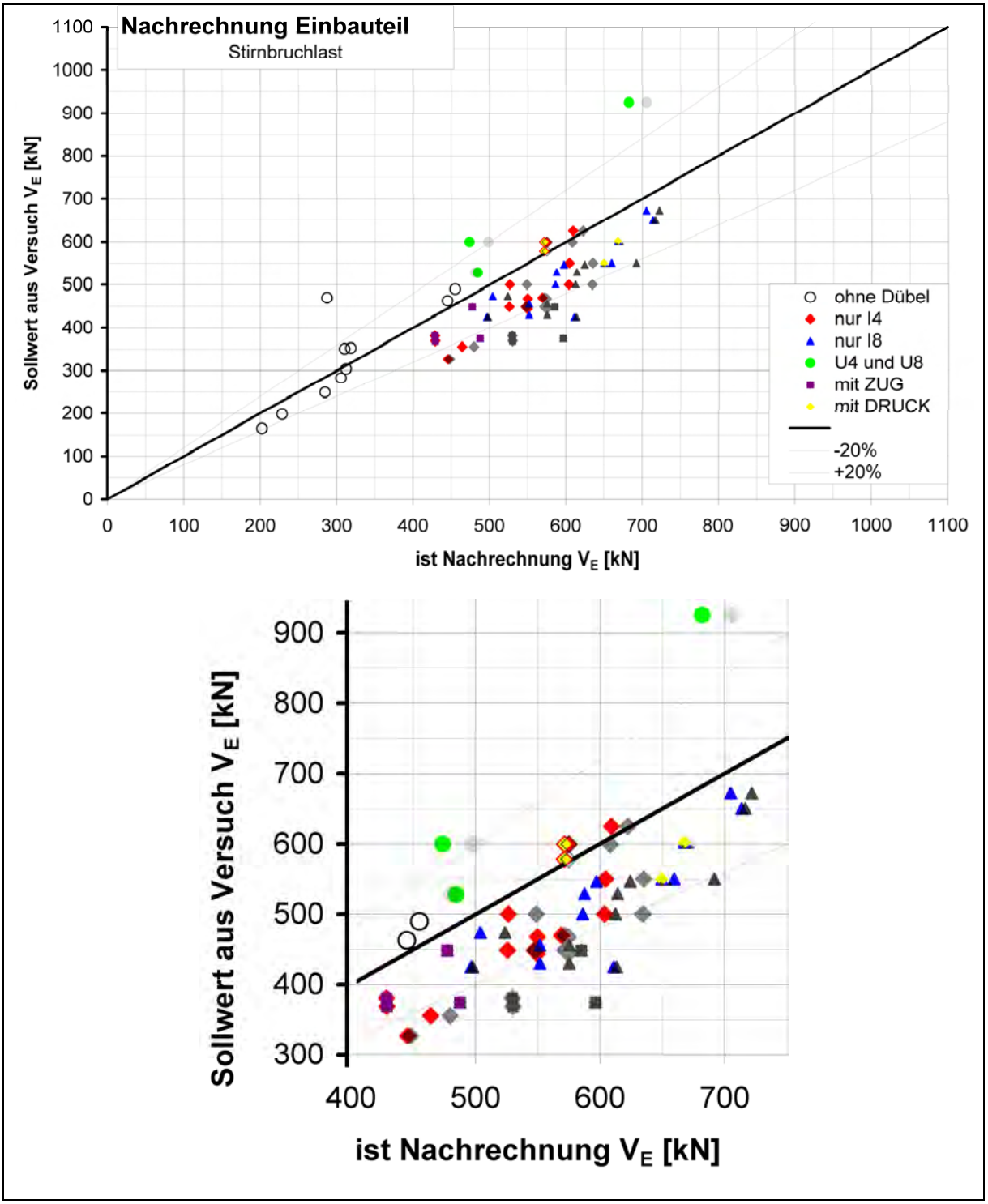


Abbildung 181: Vergleich für Stirnbruchlasten

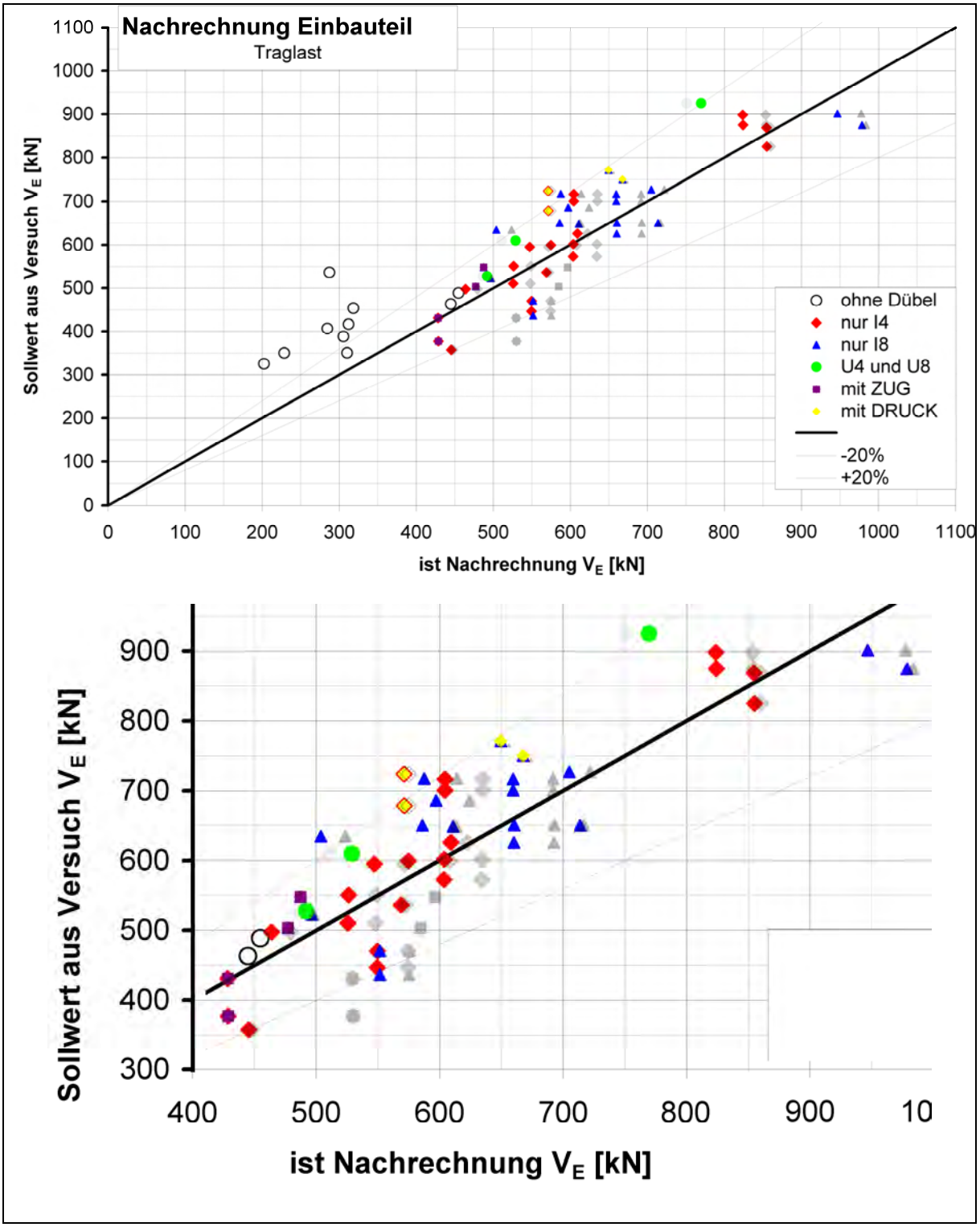


Abbildung 182: Vergleich für Traglast

A5.6 ZUSÄTZLICHE BETRACHTUNG ZU e^*_{LUG}

Für den Ansatz der resultierenden Kraft vor dem Dübel existieren 3 Varianten, um den Grundwert für e_{Lug} zu bestimmen.

- (1) Empirische Lösung mittels Regression
- (2) Ansatz einer Parabel-/Rechteckfunktion mit konstantem Wert für Einbindetiefen $h_{Lug} > 2\ h_L^*$.
- (3) Ansatz einer überhöhten Parabel, um das Maximum in e_{Lug} bei zirka $2\ h_L^*$ in den Berechnungen mit 20 mm und 40 mm starken Dübeln abbilden zu können.
- (4) Angesetzt wird das Minimum aus (1), (2) und (3)

Die bisherigen Untersuchungen wurden mit $e^*_{Lug,2}$ also Variante (2) durchgeführt. Die Darstellung in Abbildung 185, und Abbildung 186 sind somit als Referenz zu betrachten.

Die Varianten (2) und (3) sind nahezu gleichwertig mit leichten Vorteilen für Variante (2) bei der Traglast. Variante (1) hingegen liefert bessere Ergebnisse bei der Traglast, bei der Stirnbruchlast hingegen sind die Ergebnisse entsprechend schlechter als bei Variante (2). Das Gleiche gilt für Variante (4). Somit sind Die Varianten (1) und (4) wiederum gleichwertig, liefern aber nur bei der Ermittlung der Traglast bessere Werte als Variante (2).

Aufgrund der Universalität wird daher im Weiteren der Variante (2) der Vorzug gegeben.

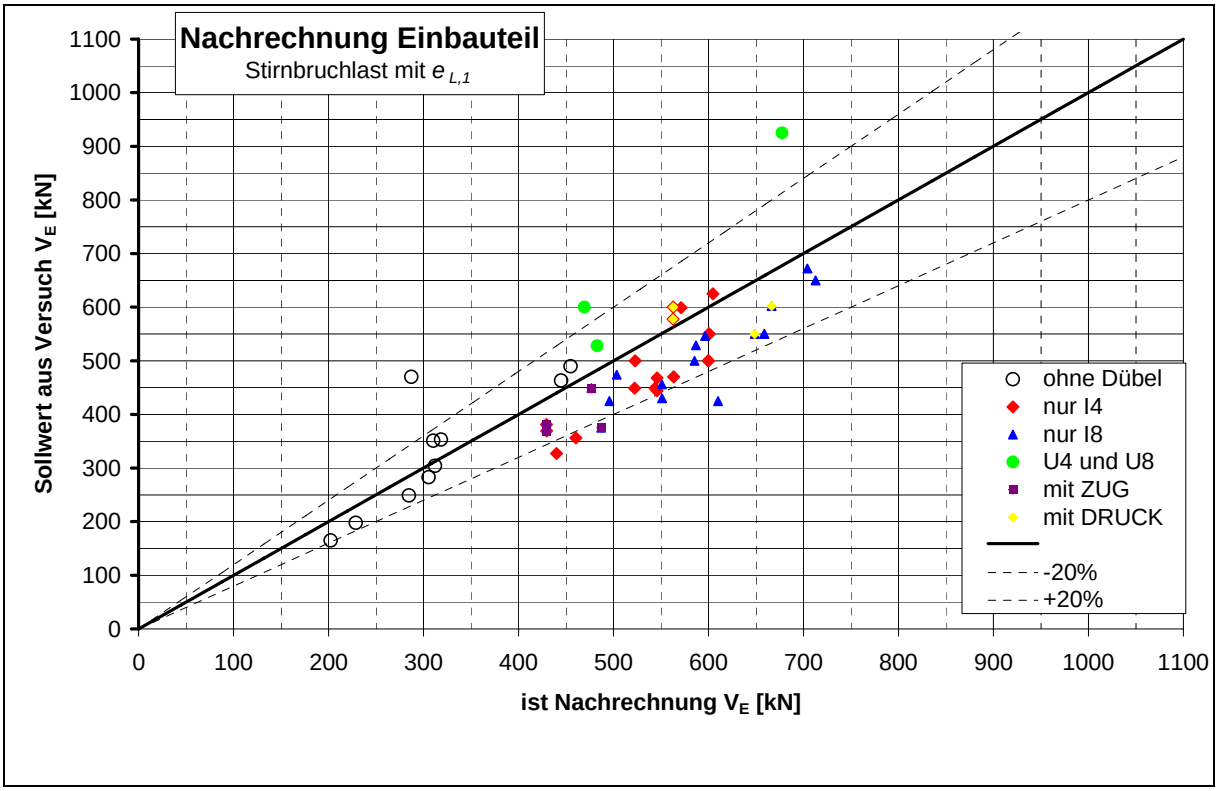


Abbildung 183: Nachrechnung der Stirnbruchlasten für $e^*_{Lug,1}$

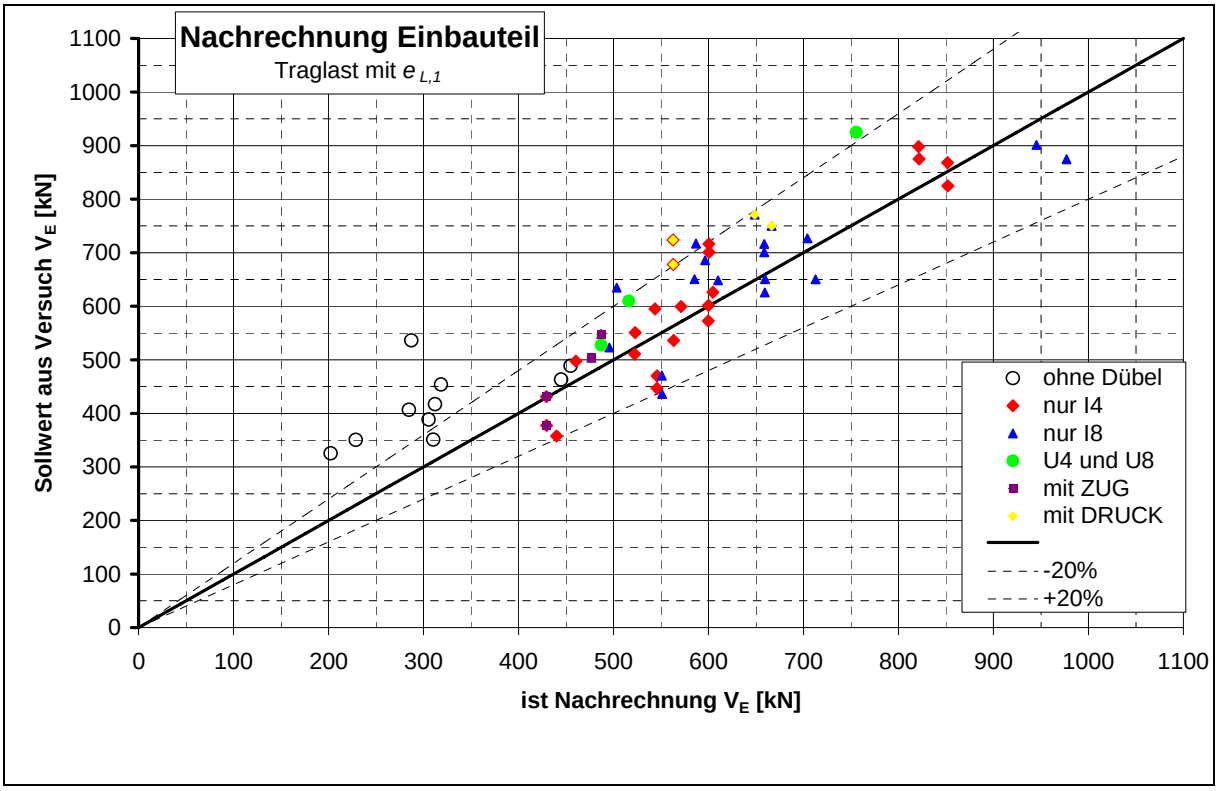


Abbildung 184: Nachrechnung der Traglast für $e^*_{Lug,1}$

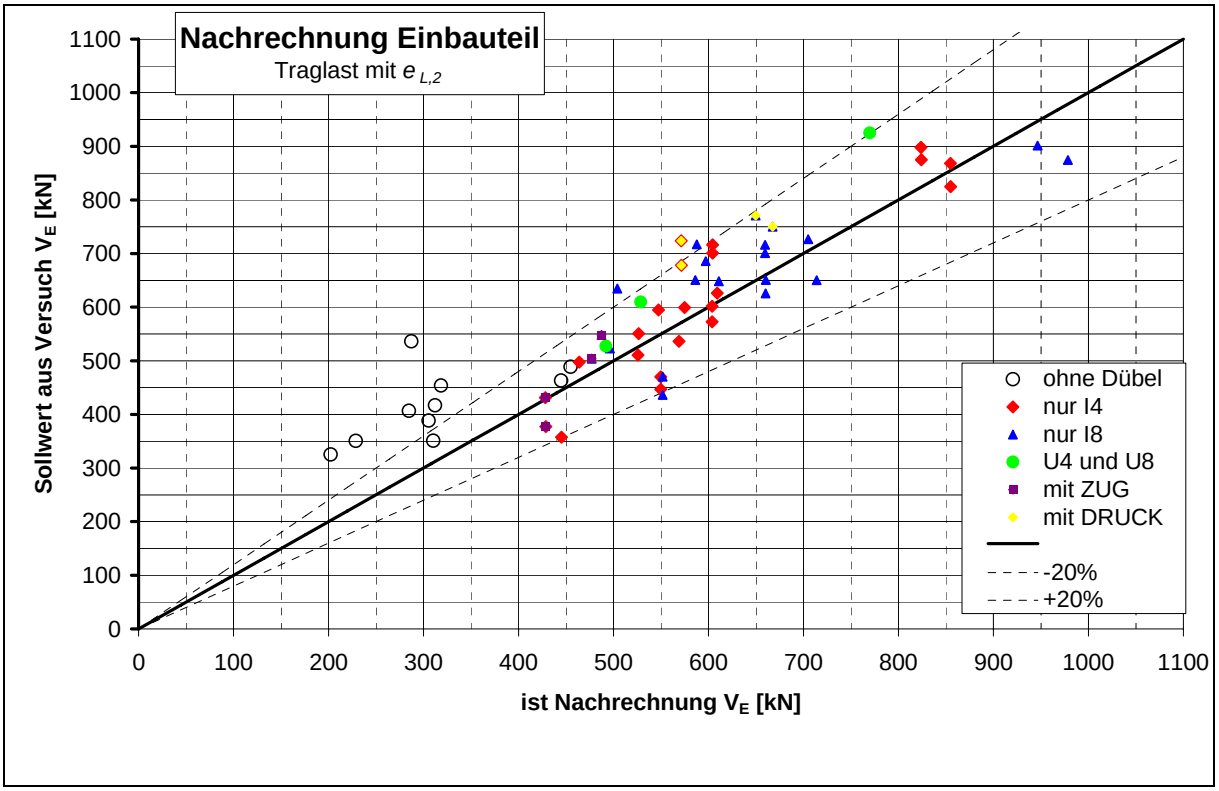


Abbildung 185: Nachrechnung der Stirnbruchlasten für $e^*_{Lug,2}$

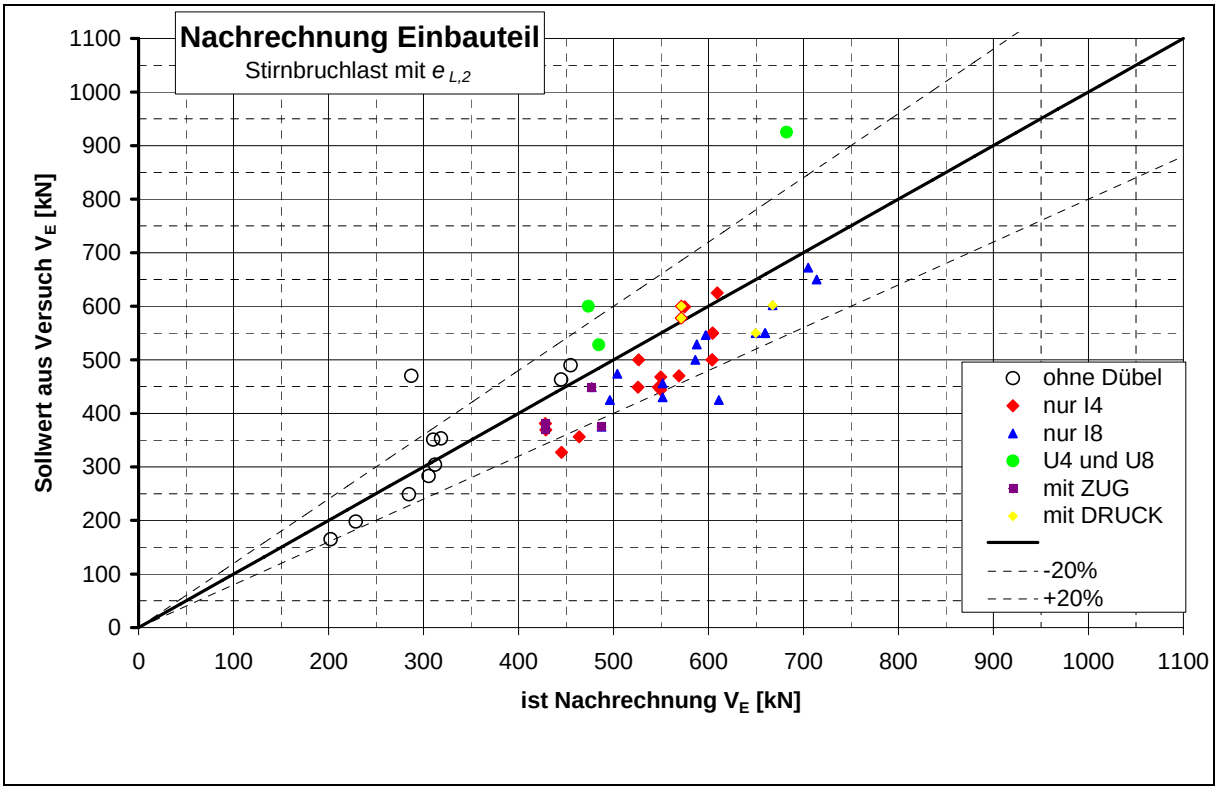


Abbildung 186: Nachrechnung der Traglast für $e^*_{Lug,2}$

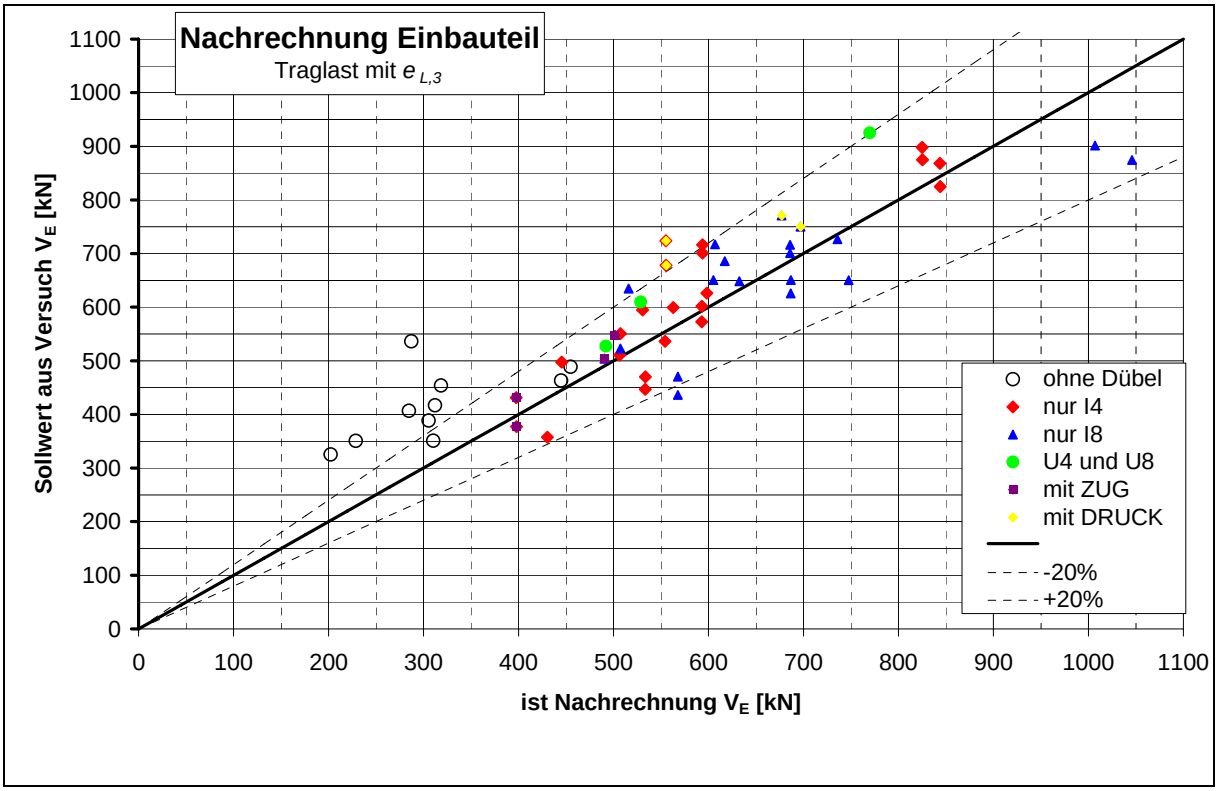


Abbildung 187: Nachrechnung der Stirnbruchlasten für $e^*_{Lug,3}$

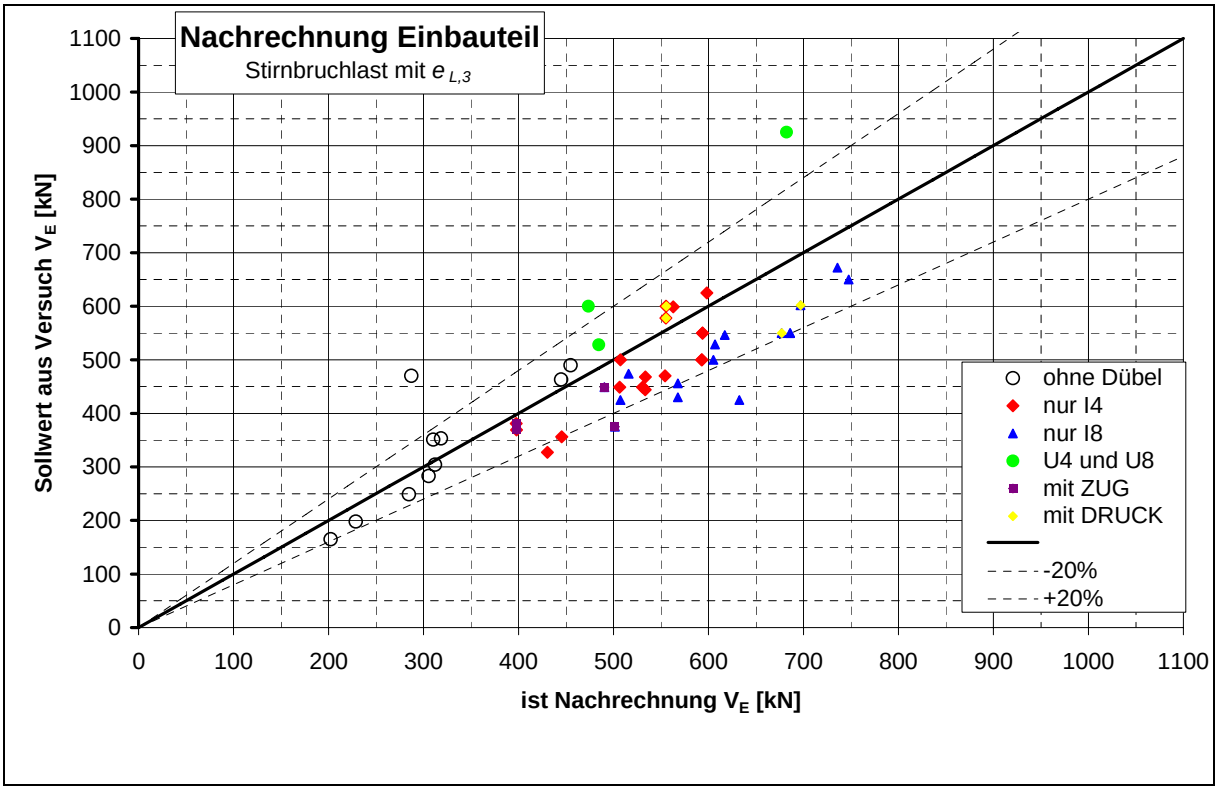


Abbildung 188: Nachrechnung der Traglast für $e^*_{Lug,3}$

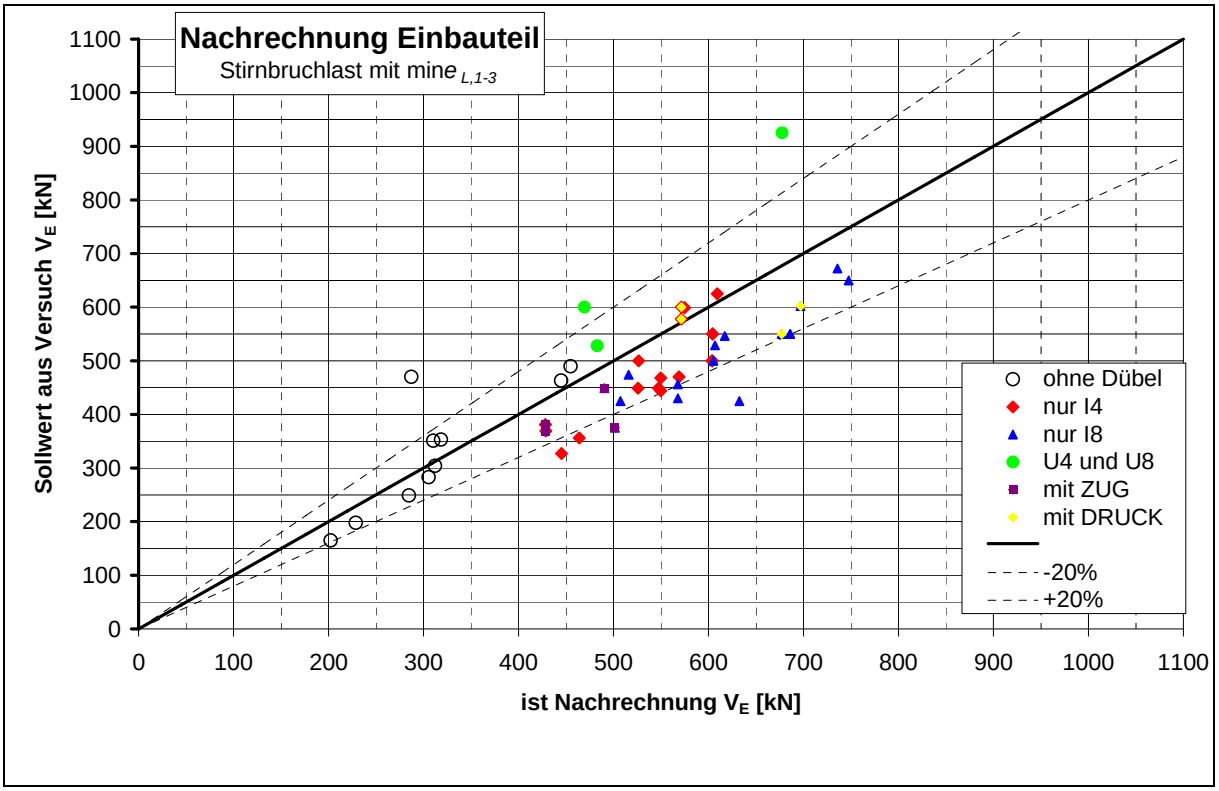


Abbildung 189: Nachrechnung der Stirnbruchlasten für min $e^*_{Lug,1\text{-}3}$

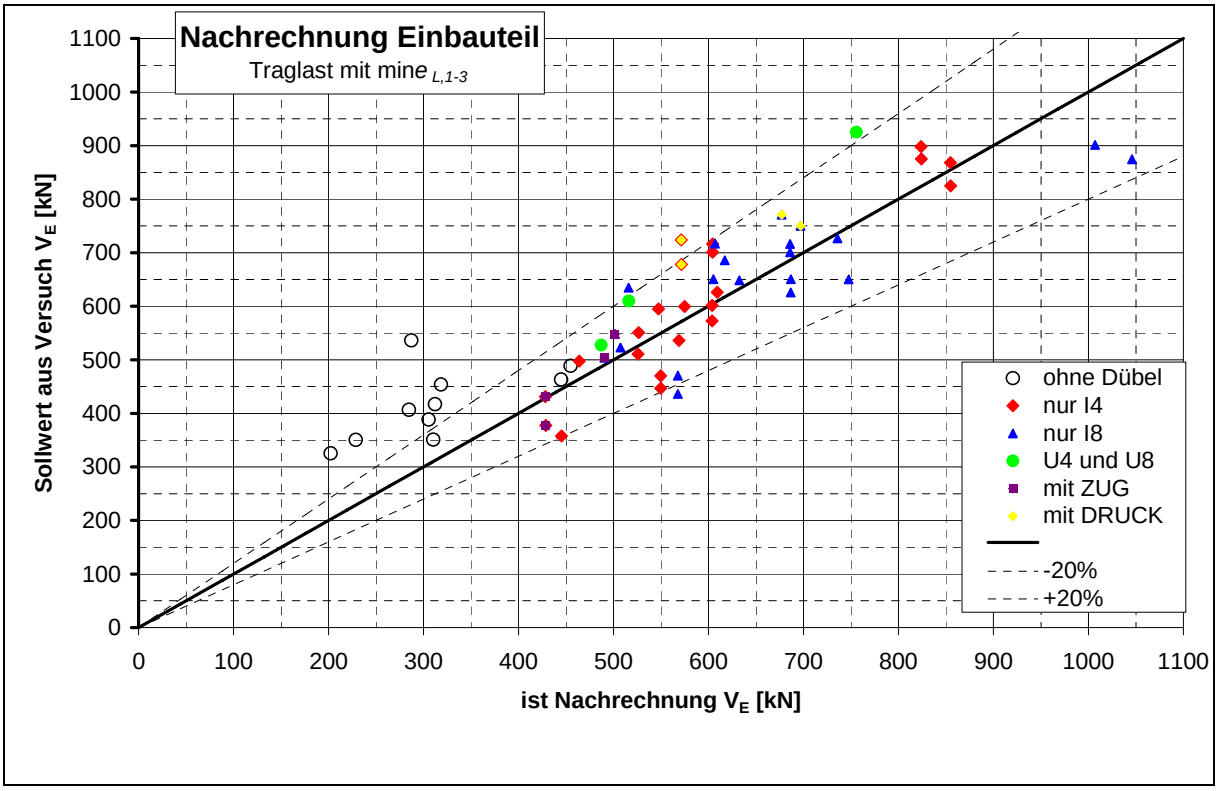


Abbildung 190: Nachrechnung der Traglast für min $e^*_{Lug,1\text{-}3}$

A5.7 *WIEDERGABE DER TABELLENKÖPFE*

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1	**Berechnung mit Modell DUEBEL, hier Ansatz mit Streckenlasten am Dübel**																						
2	**Werte aus "Einbau"**						Parameter Geometrie + Material + Last																aus Base
3																							
4	**geprüft 16.11.2004**																						alles aus Base
5				3D-Faktor	Reibung	Δl_{Kopf}	$h_{Dübel}$	$t_{Dübel}$	$b_{Dübel}$	a_{Lug}	a_{Anchor}	a1	a2	b_{Base}	$EI_{Dübel}$	$GA_{Dübel}$	L/EA	f_c	E_c	e_v	N_E	M_E	$F_{A,RBase}$
6				[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[Nmm²]	[Nmm²]	[mm/kN]	[N/mm²]	[N/mm²]	[mm]	[kN]	[kNm]	[N]
7																							
8																							

	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP
1	**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Ber**
2	Grundwerte													nur Spannung					
3					Lastangriff am Lug									für u_{iz}^*					
4	$h_{Dübel,max}$		R_L^*			Empirisch 1			P/R				Wahl			v_L^*			
5	h_L^*	$R_{L,1}$	$R_{L,2}$	R_L^*	$e_{1,Lug}$	α	β	$e_{L,1}^*$	$e_{L,2}^*$	η	k	$e_{L,3}^*$	e_L^*	h_2^*	$v_{L,max}$	$v_{L,xu}$	v_L^*	$\tan \Phi_{Grenz}$	
6	**[mm]**	[kN]	[kN]	**[N]**	[mm]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[mm]	**[mm]**	[mm]	[mm]	[mm]	**[mm]**	[-]	
7																			
8																			

	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO	BP
1	**echnung**		**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**		
2	Iteration F_A, Schritt 1																									
3	nue=	0,2	(für alle weiteren Schritte)												aus A(	$v_{3,1}$ ohne R_R		$v_{2,1}$ mit Rechteck		hilfe:	0,75			2,000		
4	β=	0,8	(für alle weiteren Schritte)													hinter dem Lug		vor dem Lug						1,666		
5	h_L^*	R_L^*	e_L^*	v_L^*	$V_{E0,Lug}$	F_{L0}	F_{A0}	R_{Ro}	$u_{A,FA0}$	$u_{L,FA0}$	u_{iz}^*	α_1	$\tan \Phi$	$v_{1,1}$	h_2	$v_{3,1}$	$R_{Rear,1}$	$v_{2,1}$	X1	X2	$\Delta R_{2,i}$	$F_{Lug,1}$	$V_{E1,Lug}$	a_{Ro}	$F_{A1,all}$	
6	**[mm]**	**[N]**	**[mm]**	**[mm]**	[N]	[N]	[N]	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[N]	[N]	[mm]	[N]	
7																		#DIV/0!								
8																										

	BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW	BX	BY	BZ	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI
1	**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Ber**
2	Iteration F_A, Schritt i =			2															
3									$v_{3,i}$ ohne R_R		$v_{2,i}$ mit Rechteck R_L^* und R_R								
4									hinter dem Lug		vor dem Lug								
5	$F_{Ro,i-1}$	$u_{A,FA,i-1}$	$u_{L,FA,i-1}$	u_{iz}^*	α_1	$\tan \Phi$	$R_{Rei,i-1}$	$v_{1,i}$	$v_{3,i}$	$R_{Rear,i}$	$v_{2,i}$	$x1_i$	$x2_i$	$\Delta R_{2,i}$	$F_{Lug,i}$	$V_{E,i}$	$a_{Ro,i-1}$	$F_{A,i}$	
6	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[N]	[mm]	[mm]	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[N]	[N]	[mm]	[N]	
7																			
8																			

	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CZ	DA	DB
1	**echnung**		**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**	
2	Iteration F_A, Schritt i =			3															
3									$v_{3,i}$ ohne R_R		$v_{2,i}$ mit Rechteck R_L^* und R_R								
4									hinter dem Lug		vor dem Lug								
5	$F_{Ro,i-1}$	$u_{A,FA,i-1}$	$u_{L,FA,i-1}$	u_{iz}^*	α_1	$\tan \Phi$	$R_{Rei,i-1}$	$v_{1,i}$	$v_{3,i}$	$R_{Rear,i}$	$v_{2,i}$	$x1_i$	$x2_i$	$\Delta R_{2,i}$	$F_{Lug,i}$	$V_{E,i}$	$a_{Ro,i-1}$	$F_{A,i}$	
6	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[N]	[mm]	[mm]	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[N]	[N]	[mm]	[N]	
7																			
8																			

	DC	DD	DE	DF	DG	DH	DI	DJ	DK	DL	DM	DN	DO	DP	DQ	DR	DS	DT	DU
1		**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**			**Berechnung**		
2	Iteration F_A, Schritt i =			4															
3									$v_{3,i}$ ohne R_R		$v_{2,i}$ mit Rechteck R_L^* und R_R								
4									hinter dem Lug		vor dem Lug								
5	$F_{Ro,i-1}$	$u_{A,FA,i-1}$	$u_{L,FA,i-1}$	u_{iz}^*	α_1	$\tan \Phi$	$R_{Rei,i-1}$	$v_{1,i}$	$v_{3,i}$	$R_{Rear,i}$	$v_{2,i}$	$x1_i$	$x2_i$	$\Delta R_{2,i}$	$F_{Lug,i}$	$V_{E,i}$	$a_{Ro,i-1}$	$F_{A,i}$	
6	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[N]	[mm]	[mm]	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[N]	[N]	[mm]	[N]	
7																			
8																			

Abbildung 191: Vollständige Kopfzeilen und Gliederung Modul "DUEBEL" – Teil 1

	DV	DW	DX	DY	DZ	EA	EB	EC	ED	EE	EF	EG	EH	EI	EJ	EK	EL	EM	EN
1	Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Ber
2	Iteration F_A, Schritt i =			5															
3									$v_{3,i}$ ohne R_R		$v_{2,i}$ mit Rechteck R_L^* und R_R								
4									hinter dem Lug		vor dem Lug								
5	$F_{Ro,i-1}$	$u_{A,FA,i-1}$	$u_{L,FA,i-1}$	u_{cz}^*	α_1	$\tan \Phi$	$R_{Rei,i-1}$	$v_{1,i}$	$v_{3,i}$	$R_{Rear,i}$	$v_{2,i}$	$x1_{,i}$	$x2_{,i}$	$\Delta R_{2,i}$	$F_{Lug,i}$	$V_{E,i}$	$a_{Ro,i-1}$	$F_{A,i}$	
6	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[N]	[mm]	[mm]	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[N]	[N]	[mm]	[N]	
7																			
8																			

	EO	EP	EQ	ER	ES	ET	EU	EV	EW	EX	EY	EZ	FA	FB	FC	FD	FE	FF	FG
1	echnung		Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung	
2	Iteration F_A, Schritt i =			6															
3									$v_{3,i}$ ohne R_R		$v_{2,i}$ mit Rechteck R_L^* und R_R								
4									hinter dem Lug		vor dem Lug								
5	$F_{Ro,i-1}$	$u_{A,FA,i-1}$	$u_{L,FA,i-1}$	u_{cz}^*	α_1	$\tan \Phi$	$R_{Rei,i-1}$	$v_{1,i}$	$v_{3,i}$	$R_{Rear,i}$	$v_{2,i}$	$x1_{,i}$	$x2_{,i}$	$\Delta R_{2,i}$	$F_{Lug,i}$	$V_{E,i}$	$a_{Ro,i-1}$	$F_{A,i}$	
6	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[N]	[mm]	[mm]	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[N]	[N]	[mm]	[N]	
7																			
8																			

	FH	FI	FJ	FK	FL	FM	FN	FO	FP	FQ	FR	FS	FT	FU	FV	FW	FX	FY	FZ
1		Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung		
2	Iteration F_A, Schritt i =			7															
3									$v_{3,i}$ ohne R_R		$v_{2,i}$ mit Rechteck R_L^* und R_R								
4									hinter dem Lug		vor dem Lug								
5	$F_{Ro,i-1}$	$u_{A,FA,i-1}$	$u_{L,FA,i-1}$	u_{cz}^*	α_1	$\tan \Phi$	$R_{Rei,i-1}$	$v_{1,i}$	$v_{3,i}$	$R_{Rear,i}$	$v_{2,i}$	$x1_{,i}$	$x2_{,i}$	$\Delta R_{2,i}$	$F_{Lug,i}$	$V_{E,i}$	$a_{Ro,i-1}$	$F_{A,i}$	
6	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[N]	[mm]	[mm]	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[N]	[N]	[mm]	[N]	
7																			
8																			

	GA	GB	GC	GD	GE	GF	GG	GH	GI	GJ	GK	GL	GM	GN	GO	GP	GQ	GR	GS
1	Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Ber
2	Iteration F_A, Schritt i =			8															
3									$v_{3,i}$ ohne R_R		$v_{2,i}$ mit Rechteck R_L^* und R_R								
4									hinter dem Lug		vor dem Lug								
5	$F_{Ro,i-1}$	$u_{A,FA,i-1}$	$u_{L,FA,i-1}$	u_{cz}^*	α_1	$\tan \Phi$	$R_{Rei,i-1}$	$v_{1,i}$	$v_{3,i}$	$R_{Rear,i}$	$v_{2,i}$	$x1_{,i}$	$x2_{,i}$	$\Delta R_{2,i}$	$F_{Lug,i}$	$V_{E,i}$	$a_{Ro,i-1}$	$F_{A,i}$	
6	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[N]	[mm]	[mm]	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[N]	[N]	[mm]	[N]	
7																			
8																			

	GT	GU	GV	GW	GX	GY	GZ	HA	HB	HC	HD	HE	HF	HG	HH	HI	HJ	HK	HL
1	echnung		Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung	
2	Iteration F_A, Schritt i =			9															
3									$v_{3,i}$ ohne R_R		$v_{2,i}$ mit Rechteck R_L^* und R_R								
4									hinter dem Lug		vor dem Lug								
5	$F_{Ro,i-1}$	$u_{A,FA,i-1}$	$u_{L,FA,i-1}$	u_{cz}^*	α_1	$\tan \Phi$	$R_{Rei,i-1}$	$v_{1,i}$	$v_{3,i}$	$R_{Rear,i}$	$v_{2,i}$	$x1_{,i}$	$x2_{,i}$	$\Delta R_{2,i}$	$F_{Lug,i}$	$V_{E,i}$	$a_{Ro,i-1}$	$F_{A,i}$	
6	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[N]	[mm]	[mm]	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[N]	[N]	[mm]	[N]	
7																			
8																			

	HM	HN	HO	HP	HQ	HR	HS	HT	HU	HV	HW	HX	HY	HZ	IA	IB	IC	ID	IE
1		Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung		
2	Iteration F_A, Schritt i =			10															
3									$v_{3,i}$ ohne R_R		$v_{2,i}$ mit Rechteck R_L^* und R_R								
4									hinter dem Lug		vor dem Lug								
5	$F_{Ro,i-1}$	$u_{A,FA,i-1}$	$u_{L,FA,i-1}$	u_{cz}^*	α_1	$\tan \Phi$	$R_{Rei,i-1}$	$v_{1,i}$	$v_{3,i}$	$R_{Rear,i}$	$v_{2,i}$	$x1_{,i}$	$x2_{,i}$	$\Delta R_{2,i}$	$F_{Lug,i}$	$V_{E,i}$	$a_{Ro,i-1}$	$F_{A,i}$	
6	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[N]	[mm]	[mm]	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[N]	[N]	[mm]	[N]	
7																			
8																			

	IF	IG	IH	II	IJ	IK	IL	IM	IN
1	Zusammenstellung								
2									
3	Am Dübel								
4	R_{Lug}								
5	$R^*+\Delta R_{2,i}$	$e_{L,ug}$	$R_{Rear,i}$	$R_{Rei,i-1}$	$V_{E,i}$	$F_{A,i}$	$u_{A,FA,i}$	$F_{Ro,i}$	$F_{Lug,i}$
6	[N]	[mm]	[N]	[N]	[N]	[N]	[mm]	[N]	[N]
7									
8									

Abbildung 192: Vollständige Kopfzeilen und Gliederung Modul "DUEBEL" – Teil 2

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
1	Berechnung mit Modell STANZE																			Berechnung			Berechnung			Berech
2	Werte aus "Einbau"						Parameter Geometrie + Material + Last													Grundwerte						
3				Faktor	Reibung	$D/_{Kopf}$																				
4	Versuch			3D																						
5				3D-Faktor	Reibung	$\Delta l/_{Kopf}$	h_{Base}	b_{Base}	a1	a_{Anchor}	l_{Anchor}	A_{Anker}	L/EA	f_c	E_c	e_v	N_E	M_E	$a_{Ges.aus.Lug}$ $F_{A,RLug}$	σ_{Base}*	$R_{Base,a}$*	$R_{Base,b}$*	v_{Base}*	$e_{Base,a}$*	$e_{Base,b}$*	a_R*
6	geprüft 16.11.2004			[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm²]	[mm/kN]	[N/mm²]	[N/mm²]	[mm]	[kN]	[kNm]	[kN]	[N/mm²]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
7																					Gl (1.6)	0,90	(0.8)	0,5		10000
8																						0,80				

	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ
1	nung		Berechnung				Berechnung		Berechnung			Berechnung			Berechnung				Berechnung		Berechnung			Berechnung		
2							1 te Verbesserung am verformten System																			
3																							$R_{0,i}$	mit $R_{0,i-1}$		
4	$\tan\Phi_{Grenz}$	$\tan\Phi_{Grenz}$	$\tan\Phi_{Grenz}$	Φ_{Grenz}	$F_{Anchor,0}$		$u_{y\,Anker}$	$\tan\Phi$	Φ	$u_{B_oben_2}$	$u_{B_unten_2}$	h_{red}	R_{Base_2} (Gl. 1.6)			R_{Base_2}	e_B			e_B	R_{Reib}	V_E	R_0	a_R	F_A	
5	Gl (1.4)	Gl (1.1)			[kN]		[mm]	aus ist	aus ist	[mm]	[mm]	[mm]	--->	--->	--->	[kN]	--->	--->	--->	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	
6	2,00E-05				(>0)		(>0)						a	b	c		a	b	c							
7	1,000												0,5											1,00	auf f_c	
8	0,667	0,08																						1,00	x-Φ/Φ_{Grenz}	

	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT
1			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung	
2	te Verbesserung am verformten System																		
3																$R_{0,i}$	mit $R_{0,i-1}$		
4	$\tan\Phi$	Φ	$u_{B_oben_2}$	$u_{B_unten_2}$	h_{red}	R_{Base_2} (Gl. 1.6)			R_{Base_2}	e_B			e_B	R_{Reib}	V_E	R_0	a_R	F_A	
5	aus ist	aus ist	[mm]	[mm]	[mm]	--->	--->	--->	[kN]	--->	--->	--->	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	
6						a	b	c		a	b	c							
7	1,25																	auf f_c	
8																		x-Φ/Φ_{Grenz}	

	BU	BV	BW	BX	BY	BZ	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN
1		Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Be
2		3 te Verbesserung am verformten System																		
3																	$R_{0,i}$	mit $R_{0,i-1}$		
4	$u_{y\,Anker}$	$\tan\Phi$	Φ	$u_{B_oben_2}$	$u_{B_unten_2}$	h_{red}	R_{Base_2} (Gl. 1.6)			R_{Base_2}	e_B			e_B	R_{Reib}	V_E	R_0	a_R	F_A	
5	[mm]	aus ist	aus ist	[mm]	[mm]	[mm]	--->	--->	--->	[kN]	--->	--->	--->	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	
6	(>0)						a	b	c		a	b	c							
7																			auf f_c	
8																			x-Φ/Φ_{Grenz}	

	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CZ	DA	DB	DC	DD	DE	DF	DG	DH
1	rechnung		Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung		
2		4 te Verbesserung am verformten System																		
3																	$R_{0,i}$	mit $R_{0,i-1}$		
4	$u_{y\,Anker}$	$\tan\Phi$	Φ	$u_{B_oben_2}$	$u_{B_unten_2}$	h_{red}	R_{Base_2} (Gl. 1.6)			R_{Base_2}	e_B			e_B	R_{Reib}	V_E	R_0	a_R	F_A	
5	[mm]	aus ist	aus ist	[mm]	[mm]	[mm]	--->	--->	--->	[kN]	--->	--->	--->	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	
6	(>0)						a	b	c		a	b	c							
7																			auf f_c	
8																			x-Φ/Φ_{Grenz}	

	DI	DJ	DK	DL	DM	DN	DO	DP	DQ	DR	DS	DT	DU	DV	DW	DX	DY	DZ	EA	EB
1	Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung	
2		5 te Verbesserung am verformten System																		
3																	$R_{0,i}$	mit $R_{0,i-1}$		
4	$u_{y\,Anker}$	$\tan\Phi$	Φ	$u_{B_oben_2}$	$u_{B_unten_2}$	h_{red}	R_{Base_2} (Gl. 1.6)			R_{Base_2}	e_B			e_B	R_{Reib}	V_E	R_0	a_R	F_A	
5	[mm]	aus ist	aus ist	[mm]	[mm]	[mm]	--->	--->	--->	[kN]	--->	--->	--->	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	
6	(>0)						a	b	c		a	b	c							
7																			auf f_c	
8																			x-Φ/Φ_{Grenz}	

	EC	ED	EE	EF	EG	EH	EI	EJ	EK	EL	EM	EN	EO	EP	EQ	ER	ES	ET	EU	EV
1		Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Be
2		6 te Verbesserung am verformten System																		
3																	$R_{0,i}$	mit $R_{0,i-1}$		
4	$u_{y\,Anker}$	$\tan\Phi$	Φ	$u_{B_oben_2}$	$u_{B_unten_2}$	h_{red}	R_{Base_2} (Gl. 1.6)			R_{Base_2}	e_B			e_B	R_{Reib}	V_E	R_0	a_R	F_A	
5	[mm]	aus ist	aus ist	[mm]	[mm]	[mm]	--->	--->	--->	[kN]	--->	--->	--->	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	
6	(>0)						a	b	c		a	b	c							
7																			auf f_c	
8																			x-Φ/Φ_{Grenz}	

Abbildung 193: Vollständige Kopfzeilen und Gliederung Modul "STANZE" – Teil 1

	EW	EX	EY	EZ	FA	FB	FC	FD	FE	FF	FG	FH	FI	FJ	FK	FL	FM	FN	FO	FP
1	rechnung		Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung		
2	7 te Verbesserung am verformten System																			
3																	$R_{0,i}$	mit $R_{0,i-1}$		
4	$u_{y\ Anker}$	tanΦ	Φ	$u_{B_oben_2}$	$u_{B_unten_2}$	h_{red}	R_{Base_2}	(Gl. 1.6)		R_{Base_2}	e_B			e_B	R_{Reib}	V_E	R_0	a_R	F_A	
5	[mm]	aus ist	aus ist	[mm]	[mm]	[mm]	--->	--->	--->	[kN]	--->	--->	--->	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	
6	(>0)						a	b	c		a	b	c							
7																			auf f_c	
8																			$x\text{-}\Phi/\Phi_{Grenz}$	

	FQ	FR	FS	FT	FU	FV	FW	FX	FY	FZ	GA	GB	GC	GD	GE	GF	GG	GH	GI	GJ
1	Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung	
2	8 te Verbesserung am verformten System																			
3																	$R_{0,i}$	mit $R_{0,i-1}$		
4	$u_{y\ Anker}$	tanΦ	Φ	$u_{B_oben_2}$	$u_{B_unten_2}$	h_{red}	R_{Base_2}	(Gl. 1.6)		R_{Base_2}	e_B			e_B	R_{Reib}	V_E	R_0	a_R	F_A	
5	[mm]	aus ist	aus ist	[mm]	[mm]	[mm]	--->	--->	--->	[kN]	--->	--->	--->	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	
6	(>0)						a	b	c		a	b	c							
7																			auf f_c	
8																			$x\text{-}\Phi/\Phi_{Grenz}$	

	GK	GL	GM	GN	GO	GP	GQ	GR	GS	GT	GU	GV	GW	GX	GY	GZ	HA	HB	HC	HD
1		Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Be
2	9 te Verbesserung am verformten System																			
3																	$R_{0,i}$	mit $R_{0,i-1}$		
4	$u_{y\ Anker}$	tanΦ	Φ	$u_{B_oben_2}$	$u_{B_unten_2}$	h_{red}	R_{Base_2}	(Gl. 1.6)		R_{Base_2}	e_B			e_B	R_{Reib}	V_E	R_0	a_R	F_A	
5	[mm]	aus ist	aus ist	[mm]	[mm]	[mm]	--->	--->	--->	[kN]	--->	--->	--->	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	
6	(>0)						a	b	c		a	b	c							
7																			auf f_c	
8																			$x\text{-}\Phi/\Phi_{Grenz}$	

	HE	HF	HG	HH	HI	HJ	HK	HL	HM	HN	HO	HP	HQ	HR	HS	HT	HU	HV	HW	HX
1	rechnung		Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung			Berechnung		
2	10 te Verbesserung am verformten System																			
3																	$R_{0,i}$	mit $R_{0,i-1}$		
4	$u_{y\ Anker}$	tanΦ	Φ	$u_{B_oben_2}$	$u_{B_unten_2}$	h_{red}	R_{Base_2}	(Gl. 1.6)		R_{Base_2}	e_B			e_B	R_{Reib}	V_E	R_0	a_R	F_A	
5	[mm]	aus ist	aus ist	[mm]	[mm]	[mm]	--->	--->	--->	[kN]	--->	--->	--->	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	
6	(>0)						a	b	c		a	b	c							
7																			auf f_c	
8																			$x\text{-}\Phi/\Phi_{Grenz}$	

	HY	HZ	IA	IB	IC	ID	IE	IF	IG	IH
1	**Zusammenstellung**									
2										
3	**An der Grundplatte**									
4	R_{Base_2}	e_B	R_{Reib}	V_E	R_0	a_R	F_A	$u_{y\ Anker}$	Φ	
5	[kN]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[°]	
6										
7										
8										

Abbildung 194: Vollständige Kopfzeilen und Gliederung Modul "STANZE" – Teil 2