Tragverhalten von Stahlbetontragwerken

Ansätze zur Modellierung

Pascal Gitz

Freitag, 14. Juni 2024

Inhaltsverzeichnis

# 1. Einleitung

# 2. Modellvorstellung

In der Vorarbeit [[1](#ref-gitz_ansatze_2024)] zu dieser Arbeit wurde mittels der numerischen Integration der Krümmung das nicht-lineare Verformungsverhalten von unterschiedlichen Versuchen zufriedenstellend abgebildet. Um das Vorgehen auf statisch unbestimmte Systeme zu erweitern, sowie in der Geometrie der Systeme die nötige Flexiblität zu erhalten, wird versucht, basierend auf dem angewendeten Berechnungsansatz, ein Stabstatikmodell zu erstellen. Die [Abbildung 2.1](#fig-modell_drehfeder) zeigt eine Modellierung eines einfachen Balkens. Dabei sind biege- und schubsteife Stäbe mit Drehfedern gekoppelt. Dies führt dazu, dass sämtliche Deformationen des Systems aus den Federverbindungen erfolgen.

|  |
| --- |
| Abbildung 2.1: Modellierung als biegesteife Stäbe gekoppelt mit Drehfedern |

Mit der Wahl der entsprechenden Federcharakteristiken stellen sich so die passenden Resultate ein. Die Anwendung des Modells an experimentellen Versuchen wird in den folgenden Kapiteln aufgegriffen. Es lässt sich vorweggreifen, dass die Wahl der Federcharakteristik die Krux des Systems darstellt.

Alternativ zur Modellierung mittels Drehfedern lässt sich das Verhalten der Drehfeder mit einem Wegfederpaar abbilden. Dies erlaubt eine Modellierung mittels den nicht-linearen Fachwerksstäben der Software Statik-9 der Cubus AG. Dieser Ansatz wird lediglich im Einführungsbeispiel berücksichtigt.

|  |
| --- |
| Abbildung 2.2: Modellierung als biegesteife Stäbe gekoppelt mit einem Wegfederpaar |

# 3. Einführungsbeispiel

Das Einführungsbeispiel verfolgt das Ziel das Modellverhalten zu plausibilisieren. Die Eingabe der nicht-linearen Parameter in der Statiksoftware liegt im Vordergrund.

Es werden die Verformungen des fiktiven Beispiels von Hand mittels der Arbeitsgleichung, sowie numerisch mit der Stabstatik-Software ermittelt. Das statische System ist in [Abbildung 3.1](#fig-kragarm-feder) aufgezeigt. Das Beispiel ist mit einer Drehfeder versehen, welche eine nicht-lineare Federcharakteristik aufweist. Es werden zwei Laststufen betrachtet. Diese sind entsprechend gewählt, dass das nicht-lineare Verhalten der Drehfeder zu tragen kommt.

|  |
| --- |
| Abbildung 3.1: Statisches System des Kragarms |

Die folgenden Parameter fliessen in die Berechnungen ein. Beschrieben sind die Abmessungen und Materialeigenschaften, sowie die beiden Laststufen und , wie auch die Federsteifigkeiten und .

Der Rechteckquerschnitt ist in [Abbildung 3.2](#fig-qs-kragarm) aufgezeigt, dieser gilt für den gesamten Kragarm.

|  |
| --- |
| Abbildung 3.2: Fiktiver Querschnitt des Kragarms mit durchwegs linear-elastischem Materialverhalten |

Die Entsprechende Federcharakteristik ist in [Abbildung 3.3](#fig-springcharacteristic) zu sehen. Das Bilineare Verhalten gilt für positive und negative Biegemomente um die -Achse.

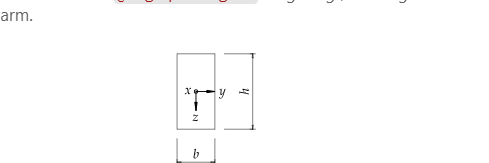


image.png

|  |
| --- |
| Abbildung 3.3: Charakteristik der Drehfeder |

## 3.1 Biegeverformung

Zunächst werden die Biegeverformungen mittels der Differentialgleichung für reine Biegeträger ermittelt. Dabei wird die Drehfeder vernachlässigt. Das statische System, gezeigt in [Abbildung 3.4](#fig-kragarm-sys) führt zu den Zustandslinien der Schnittgrössen in der [Abbildung 3.5](#fig-skkragarmreal).

|  |
| --- |
| Abbildung 3.4: Statisches System des Kragarms |

|  |
| --- |
| Abbildung 3.5: Schnittkräfte des Systems aus [Abbildung 3.4](#fig-kragarm-sys) für die Last |

Die maximale Verformung am Endpunkt des Kragarms beträgt:

Das analoge Vorgehen führt für die Laststufe zu den Zustandslinien der Schnittgrössen gemäss der [Abbildung 3.6](#fig-skkragarmreal_high).

|  |
| --- |
| Abbildung 3.6: Schnittkräfte des Systems aus [Abbildung 3.4](#fig-kragarm-sys) für die Last |

Da ein durchwegs linear-elastisches Biegeverhalten vorausgesetzt wird, entspricht der Faktor der Erhöhung des Verformung dem Quotient der beiden Laststufen.

Dabei entspricht die maximale Biegeverformung am Ende des Kragarms:

## 3.2 Verformung der Drehfeder

Zur Bestimmung der Verformung am Ende des Kragarms des Systems mit der Drehfeder wird die Arbeitsgleichung angewendet. Dazu wird an einem virtuellen System eine Einzellast eingeführt, an der Stelle an dem die Verformung bestimmt werden soll. Dargestellt ist dies in [Abbildung 3.7](#fig-kragarm-sys-virtuell).

|  |
| --- |
| Abbildung 3.7: Statisches System des Kragarms im virtuellen Kräftezustand |

Die entsprechenden Verläufe der Querkraft und des Biegemoments zeigt die [Abbildung 3.8](#fig-sk-kragarm-virtuell) für das virtuelle System.

|  |
| --- |
| Abbildung 3.8: Schnittkräfte des virtuellen Systems aus [Abbildung 3.7](#fig-kragarm-sys-virtuell) |

Die Verformung der Drehfeder kann abschliessend mit der folgenden Gleichung bestimmt werden.

Die Verdrehung lässt sich aus der Federcharakteristik mit dem Biegemoment an der Stelle der Drehfeder bestimmen. Die [Abbildung 3.9](#fig-feder-force) zeigt die Position der Laststufen im Diagramm.

|  |
| --- |
| Abbildung 3.9: Charakteristik der Drehfeder mit Bestimmung der Verdrehung anhand der Laststufen |

Angewendet auf das System der [Abbildung 3.1](#fig-kragarm-feder) folgen für die beiden Laststufen die Deformationen der Drehfeder zu:

Dazu gilt es den Anteil aus der Biegeverformung zu addieren. Die totale Verformung folgt zu:

## 3.3 Stabstatikmodell

Das statische System, gemäss [Abbildung 3.1](#fig-kragarm-feder), wird mittels der Statiksoftware AxisVM X7 modelliert. Dazu wird die Drehfeder als Federelement modelliert und in der -Dimension mit der Federcharakteristik ergänzt. Die angeschlossenen Stäbe sind mit entsprechendem Querschnitt und der entsprechenden Biegesteifigkeit modelliert.

Die Deformationen in -Richtung sind in [Abbildung 3.10](#fig-kragarm-drehfeder-10) und [Abbildung 3.11](#fig-kragarm-drehfeder-215)

|  |
| --- |
| Abbildung 3.10: Verformungen in für aus AxisVM mit Drehfedermodell |

Das Modell liefert für die erste Laststufe die Gesamtverformung von:

|  |
| --- |
| Abbildung 3.11: Verformungen in für aus AxisVM mit Drehfedermodell |

So wie für die zweite Laststufe folgt die Gesamtverformung zu:

Das Modell liefert die annähernd gleichen Resultate wie die Handrechnung. Die Genauigkeit ist zufriedenstellend.

### 3.3.1 Modellierungsalternative Wegfeder

Wie bereits in [Kapitel 2](#sec-modellvorstellung) aufgezeigt, lässt sich das Verhalten der Drehfeder mit einem Wegfederpaar abbilden. Dazu wird in einem ersten Schritt die Drehfedercharakteristik in eine Wegfedercharakteristik umgerechnet. Als Grundlage dient die Modellierung gemäss [Abbildung 3.12](#fig-verdrehung_verformung). Die Abbildung zeigt die kinematische Relation eines reinen Biegeelements.

|  |
| --- |
| Abbildung 3.12: Kinematische Relation eines reinen Biegeelements |

Mittels den folgenden Gleichungen lässt sich so die Wegfedercharakteristik bestimmen. Der Abstand zwischen dem Wegfederpaar wird mit beschrieben.

Durch die Berücksichtigung der trigonometrischen Funktion ist der Verlauf nicht exakt bilinear. Eine Approximation mit einem bilinearen Verlauf führt zu beträchtlichen Abweichungen im Bereich der zweiten Laststufe . Dies ist auf die geringe Neigung, bzw. der Drehfedercharakteristik im oberen Lastniveau zurückzuführen.

Die umgerechnete Wegfedercharakteristik ist in [Abbildung 3.13](#fig-wegfeder-force) aufgezeigt.

|  |
| --- |
| Abbildung 3.13: Charakteristik der Wegfeder |

Die Resultate mit dem Modell sind in der [Abbildung 3.14](#fig-f1-wegfeder) und [Abbildung 3.15](#fig-f2-wegfeder) gezeigt.

|  |
| --- |
| Abbildung 3.14: Verformungen in für aus AxisVM mit Wegfedermodell |

Die maximale Verformung in -Richtung ist für die Laststufe :

Und für die Laststufe :

Hier zeigt sich eine Abweichung. Diese lässt sich auf die numerisch approximierte Modellierung der Wegfederbeziehung zurückführen.

|  |
| --- |
| Abbildung 3.15: Verformungen in für aus AxisVM mit Wegfedermodell |

## 3.4 Zusammenfassung

Das Einführungsbeispiel zeigt die Präzision der Modellierung mittels dem Drehfedermodell. Sowie ermöglicht die simple Aufgabenstellung das Nachvollziehen der Resultate.

# 4. Modellverifizierung

In diesem Kapitel werden die beiden Versuche aus der Vorarbeit [[1](#ref-gitz_ansatze_2024)] mit einem Drehfedermodell, gemäss dem Beschrieb in [Kapitel 2](#sec-modellvorstellung), nachgerechnet. Dazu wird eine feine Stabunterteilung gewählt, um das Verformungsverhalten präzise abzubilden. Detaillierte Berechnungen und Versuchsbeschriebe, welche als Grundlagen für die Modellierung dienen, sind in [[1](#ref-gitz_ansatze_2024)] zu finden. Grundsätzlich gilt, dass für den Betonstahl bilineare Spannungs-Dehnungs-Beziehungen hinterlegt sind und für den Beton ein elastisch-ideal-plastisches Gesetz mit Berücksichtigung der Zugfestigkeit.

## 4.1 Dreipunktbiegeversuch

Der Dreipunktbiegeversuch ist der dritte Versuch der Serie A in der zweiten Versuchsanordnung aus [[2](#ref-jager_versuche_2006)], kurz betitelt mit A3V2. Dieser ist mit einer durchegehenden Längsbewehrung im Zugbereich bewehrt. Die Schubdübel sind nicht durchgängig verlegt. Dargestellt ist das Bewehrungslayout in der [Abbildung 4.1](#fig-bewehrung_a3v2).

|  |
| --- |
| Abbildung 4.1: Bewehrunslayout des Versuchs A3V2, Zeichnung entnommen aus [[2](#ref-jager_versuche_2006)] |

Das statische System des Versuchs ist in [Abbildung 4.2](#fig-system_a3v2) dargestellt. Das Eigengewicht wird vernachlässigt, da die Verformungsmessungen nach dem Einbau des Versuchs beginnen, bzw. erst bei Belastungsbeginn mit der Einzellast.

|  |
| --- |
| Abbildung 4.2: Statisches System des Versuchs A3V2 |

Die [Abbildung 4.3](#fig-qs_a3v2) zeigt den Querschnitt des Versuchs mit der entsprechenden Bewehrungsführung.

|  |
| --- |
| Abbildung 4.3: Querschnitt des Versuchs A3V2, Zeichnung entnommen aus [[1](#ref-gitz_ansatze_2024)] |

### 4.1.1 Drehfedercharakteristik

Als erster Eingabeparamter in das Drehfedermodell dient die Momenten-Krümmungs-Beziehung. Für den Querschnitt ist die nicht-lineare Beziehung in der [Abbildung 4.4](#fig-mchi_a3v2) gezeigt. Detaillierte Berechnungen sind in der Vorarbeit [[1](#ref-gitz_ansatze_2024)] zu finden.

|  |
| --- |
| Abbildung 4.4: Momenten-Krümmungs-Beziehung des Dreipunktbiegeversuchs, übernommen aus [[1](#ref-gitz_ansatze_2024)] |

### 4.1.2 Wegfedercharakteristik

#### 4.1.2.1 Schiebung

Als Grundlage zur Modellierung der Schubverformungen dient das Spannungsfeld-Modell in [Abbildung 4.5](#fig-spannungsfelder_a3v2). Dabei wird vorausgesetzt, dass sämtliche Dehnung des Systems in vertikaler Richtung lediglich aus der Stabdehnung der Schubbewehrung erfolgt. Das Ziel ist es ein Kraft-Verformungs-Diagramm, bzw. eine Wegfedercharakteristik zu ermitteln.

|  |
| --- |
| Abbildung 4.5: Einteilung in Spannungsfelder des Versuchs A3V2, Zeichnung entnommen aus [[1](#ref-gitz_ansatze_2024)] |

Durch die Einteilung in Spannungsfelder kann die Anzahl an mitwirkenden Schubdübeln bestimmt werden. Mit der Querschnittsfläche der mitwirkenden Dübel kann das nicht-lineare Spannungs-Dehnungs-Verhalten in ein Kraft-Verformungs-Diagramm bzw. in eine Wegfedercharakteristik umgewandelt werden. Die bekannte Dehnung aus der Stahlkennlinie wird über den Hebelarm der inneren Kräfte zu einer Verformung umgewandelt. Wichtig dabei ist die Elementlänge der biegesteifen Stäbe im FEM-Modell. Dazu wird die Verformung um den Faktor gemäss der folgenden Gleichung reduziert, bzw. die Steifigkeit der Feder um diesen Faktor erhöht.

steht für die Anzahl steifer Stabelemente

|  |
| --- |
| Abbildung 4.6: Spannungs-Dehnungs-Beziehung der Schubbewehrung, übernommen aus [[1](#ref-gitz_ansatze_2024)] |

Folgend sind die Parameter zur Bestimmung der Wegfedercharakteristik in vertikaler Richtung gezeigt. Der gewählte Neigungswinkel der Spannungsfelder gilt grundsätzlich nur im Bruchzustand. Als Approximation wird die daraus bestimmte Wegfedercharakteristik für sämtliche Laststufen angesetzt. Dies führt zu Abweichungen im Lastniveau unterhalb der Traglast, sofern die Schubverformung einen signifikanten Einfluss an der der Gesamtverformung liefern.

Die Querschnittsfläche der Schubbewehrung bestimmt sich zu:

Verschmiert über einen Meterstreifen:

Der Querkraftwiderstand mit gewählter Neigung:

Der Reduktionsfaktor bestimmt sich zu:

Die [Abbildung 4.7](#fig-wegfeder-schub-a3v2) zeigt das Kraft-Verformungs-Verhalten für die Gelenke des Stabmodells in vertikaler Richtung.

|  |
| --- |
| Abbildung 4.7: Berechnete Wegfedercharakteristik des Schubgelenks vom Versuch A3V2 |

### 4.1.3 Versuchsvergleich

Mit den bestimmten Federcharakteristiken kann die Biegelinie des Systems ermittelt werden unter Berücksichtigung der Schub- und Biegeverformungen auf nicht-linearen Grundlagen. Die [Abbildung 4.8](#fig-fwa3v2) zeigt das Last-Verformungs-Diagramm des Systems am Punkt . Das Modell beschreibt den Verformungsverlauf zufriedenstellend.

|  |
| --- |
| Abbildung 4.8: Last-Verformungs-Verlauf am Punkt mit dem Federmodell und den Versuchsmessungen |

Der Verdrehungsverlauf in [Abbildung 4.9](#fig-phi-max-a3v2) lässt sich ebenfalls direkt aus dem Modell exportieren. Durch die Ableitung des Verlaufs resultiert der Krümmungsverlauf, dargestellt in [Abbildung 4.10](#fig-chi-max-a3v2).

|  |
| --- |
| Abbildung 4.9: Verdrehungsverlauf aus dem Federmodell für die Höchstlast |

Der Krümmungsverlauf gibt Aufschluss über den Fliessbereich der Bewehrung, bzw. über den Steifigkeitenverlauf entlang der Stabachse.

|  |
| --- |
| Abbildung 4.10: Berechneter Krümmungsverlauf aus dem Verdrehungsverlauf |

## 4.2 Vierpunktbiegeversuch

Der Vierpunktbiegeversuch ist aus dem Paper [[3](#ref-tue_einfluss_2019)] entnommen. Auffallend bei diesem Versuch ist die niedrig gehaltene Schubbewehrung. Dazu sind in Längsrichtung Stäbe mit unterschiedlicher Güte verlegt.

|  |
| --- |
| Abbildung 4.11: Bewehrungslayout des Versuchs SV14, Zeichnung entnommen aus [[1](#ref-gitz_ansatze_2024)] |

Der Querschnitt ist in der [Abbildung 4.12](#fig-QS-SV14) gezeigt. Die Druckbewehrung wird vernachlässigt.

|  |
| --- |
| Abbildung 4.12: Querschnitt des Versuchs SV14, Zeichnung entnommen aus [[1](#ref-gitz_ansatze_2024)] |

Das statische System ist in der [Abbildung 4.13](#fig-system-SV14) gezeigt. Auch hier wird das Eigengewicht, wie im Versuch A3V2, vernachlässigt. Die gemessene und rechnerisch bestimmte Verformung gelten für den Mittelspunkt, beschrieben mit .

|  |
| --- |
| Abbildung 4.13: Statisches System des Versuchs SV14, Zeichnung entnommen aus [[1](#ref-gitz_ansatze_2024)] |

### 4.2.1 Schnittgrössen

### 4.2.2 Drehfedercharakteristik

Als Grundlage für die Drehfedercharakteristik gilt die Momenten-Krümmungs-Beziehung. Für den Querschnitt des Versuchs SV14 gilt die Beziehung gemäss [Abbildung 4.14](#fig-mchi_sv14). Für detaillierte Berechnungen ist die Vorarbeit [[1](#ref-gitz_ansatze_2024)] zu konsultieren.

|  |
| --- |
| Abbildung 4.14: Momenten-Krümmungs-Beziehung des Vierpunktbiegeversuchs, übernommen aus [[1](#ref-gitz_ansatze_2024)] |

### 4.2.3 Versatzmass

In diesem Kapitel wird das Versatzmass bestimmt. Bzw. im Vergleich mit der Vertiefungsarbeit [[1](#ref-gitz_ansatze_2024)] berichtigt. Es wird vom Versuch lediglich die starke Seite betrachtet, da durch Verstärkungsmassnahmen diese bis zum Versagen gebracht wird.

Die Materialeigenschaften sind in [[4](#X57b3972c7252fe2e9bdad8721f65499f7c93ef3)] ersichtlich.

Mit den Parametern, bzw. der Neigung der Betondruckdiagonale resultiert der nötige Querkraftwiderstand.

Die Spannungsfeldeinteilung ist in der [Abbildung 4.15](#fig-spannungsfelder_sv14) gezeigt. Die Feldneigung ist näherungsweise an die berechnete Neigung angepasst.

|  |
| --- |
| Abbildung 4.15: Einteilung in Spannungsfelder |

Wird nun Gleichgewicht an den entsprechenden Spannungsfeldern ausgeübt, so lässt sich der Zug- und Druckkraftverlauf bestimmen.

|  |
| --- |
| Abbildung 4.16: Schnittkörperdiagramm des zentrierten Fächers |

Die Kraft im Untergurt:

Die Kraft im Obergurt:

Der Anteil an der Schubbewehrung:

|  |
| --- |
| Abbildung 4.17: Schnittkörperdiagramm des Parallelfelds |

|  |
| --- |
| Abbildung 4.18: Schnittkörperdiagramm des zentrierten Fächers 2 |

|  |
| --- |
| Abbildung 4.19: Gurtkraftverläufe bestimmt anhand der Spannungsfelder in [Abbildung 4.15](#fig-spannungsfelder_sv14). Dargestellt ist der gesamte Gurtkraftverlauf, sowie der Anteil aus dem Biegemoment |

Wird der Anteil des Biegemoments am Gurtkraftverlauf subtrahiert und mit dem Hebelarm der inneren Kräfte multipliziert, so resultiert das Versatzmoment.

|  |
| --- |
| Abbildung 4.20: Versatzmoment dargestellt entlang der Stabachse |

### 4.2.4 Wegfedercharakteristik

#### 4.2.4.1 Schiebung

Die Wegfedercharakteristik basiert auf der Spannungsfeldmodellierung gemäss der [Abbildung 4.15](#fig-spannungsfelder_sv14). Die Einteilung in Spannungsfelder ermöglicht die Bestimmung der mitwirkenden Schubbewehrung beim Versagen des Querschnitts. Die Neigung des Feldes ist so gewählt damit der Querkraftwiderstand der Schubbewehrung der Traglast des Systems entspricht.

|  |
| --- |
| Abbildung 4.21: Spannungs-Dehnungs-Beziehung der Schubbewehrung, übernommen aus [[1](#ref-gitz_ansatze_2024)] |

Folgend sind die Parameter zur Bestimmung der Wegfedercharakteristik in vertikaler Richtung gezeigt.

Die Querschnittsfläche der Schubbewehrung und der Bewehrungsgehalt bestimmt sich zu:

Der Reduktionsfaktor bestimmt sich zu:

NameError: name 'l\_element' is not defined

NameError: name 'gamma\_E\_SV14' is not defined

NameError: name 'gamma\_E\_SV14' is not defined

Die [Abbildung 4.22](#fig-wegfeder-schub-sv14) zeigt das Kraft-Verformungs-Verhalten für die Gelenke des Stabmodells in vertikaler Richtung.

|  |
| --- |
| Abbildung 4.22: Berechnete Wegfedercharakteristik des Schubgelenks vom Versuch SV14 |

### 4.2.5 Versuchsvergleich

Mit den bestimmten Federcharakteristiken kann die Biegelinie des Systems ermittelt werden unter Berücksichtigung der Schub- und Biegeverformungen auf nicht-linearen Grundlagen. Die [Abbildung 4.23](#fig-l-w-sv14) zeigt das Last-Verformungs-Diagramm des Systems am Punkt . Der Verformungsverlauf zeigt Abweichungen zu den gemessenen Resultate. Dies ist auf das Unterschlagen der Längszugkraft aus Querkraft zurückzuführen.

|  |
| --- |
| Abbildung 4.23: Last-Verformungs-Verlauf am Punkt , für das Federmodell und den Versuch |

# 5. Vorgespannter Träger

Die folgende Versuchsnachrechnung zeigt die Möglichkeiten des Modells im Bezug mit einer Vorspannung.

## 5.1 Versuchsbeschrieb

In diesem Kapitel wird der vorgespannte Träger T6 nach dem Versuchsbericht [[5](#ref-sigrist_versuche_1993)] mit dem Drehfedermodell nachgerechnet. Es handelt sich um einen einfachen Balken mit einer Auskragung. Die Geometrie des Versuchs in Längsrichtung ist in [Abbildung 5.1](#fig-geometrie_t6) gezeigt.

|  |
| --- |
| Abbildung 5.1: Geometrie des Versuchsträgers T6, entnommen aus [[5](#ref-sigrist_versuche_1993)] |

Der dazugehörige Querschnitt ist in [Abbildung 5.2](#fig-geometrie_qs_t6) gezeigt.

|  |
| --- |
| Abbildung 5.2: Geometrie des Querschnitts des Versuchsträgers T6, entnommen aus [[5](#ref-sigrist_versuche_1993)] |

Die Lastsituation zeigt die [Abbildung 5.3](#fig-last_t6). Am Ende des Kragarms greift eine Einzellast an. Mit wird eine Streckenlast simuliert. Der Träger ist an den Punkten und einfach gelagert.

|  |
| --- |
| Abbildung 5.3: Lagerung und Laststellung des Versuchsträgers T6, entnommen aus [[5](#ref-sigrist_versuche_1993)] |

Die verlegte schlaffe Bewehrung in Längsrichtung ist in der [Abbildung 5.4](#fig-bewehrung_laengs_t6) gezeigt.

|  |
| --- |
| Abbildung 5.4: Bewehrungslayout in Längsrichtung des Versuchsträgers T6, entnommen aus [[5](#ref-sigrist_versuche_1993)] |

Das Bewehrungslayout im Querschnitt zeigt die [Abbildung 5.5](#fig-bewehrung_qs_t6).

|  |
| --- |
| Abbildung 5.5: Bewehrungslayout im Querschnitt des Versuchsträgers T6, entnommen aus [[5](#ref-sigrist_versuche_1993)] |

Die Führung der Vorspannung ist in der [Abbildung 5.6](#fig-vorspannung_t6) gezeigt.

|  |
| --- |
| Abbildung 5.6: Vorspannungslayout des Versuchsträgers T6. Horizontaler Abstand [m] und vertikale Position [mm], gemessen von der Unterkante des Trägers, entnommen aus [[5](#ref-sigrist_versuche_1993)] |

## 5.2 Modellierung

## 5.3 Parameter

In diesem Abschnitt werden die allgemein verwendeten Parameter aufgelistet. Gegliedert nach den einzelnen Aspekten des Versuchs.

### 5.3.1 Vorspannung

Die Parameter der Vorspannung sind die Folgenden. Es ist die Initiale Vorspannkraft, sowie die entsprechenden Querschnittseigenschaften aufgezeigt:

### 5.3.2 Beton

Die Parameter sind Mittelwerte aus Betonwürfel- und Betonzylinderproben.

Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Betons ist in der [Abbildung 5.7](#fig-sigma_epc_t6) dargestellt. Definiert ist das Verhalten im positiven Spannungsbereich bis zum Erreichen der Betonzugfestigkeit . Das Verhalten im negativen Spannungsbereich wird mit einem linear-elastischem ideal-plastischem Verhalten approximiert.

|  |
| --- |
| Abbildung 5.7: Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Betons |

### 5.3.3 Betonstahl

Mittelwerte der Zugproben.

Die entsprechende Spannungs-Dehnungs-Beziehung ist in [Abbildung 5.8](#fig-sigma_eps_t6) gezeigt. Als Annahme gilt, dass die Stäbe lediglich unter Zug belastet werden. Die Druckbewehrung wird bei der Bestimmung der Momenten-Krümmungs-Beziehung vernachlässigt. Das Verhalten wird mit einem Bilinearem Verhalten approximiert.

|  |
| --- |
| Abbildung 5.8: Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Längsbewehrung |

### 5.3.4 Geometrie

#### 5.3.4.1 Querschnitt

Die Parameter der Geometrie des Querschnitts beziehen sich auf die [Abbildung 5.2](#fig-geometrie_qs_t6).

#### 5.3.4.2 Längsrichtung

Der Abschluss des Querschnitts wird nicht mehr weiter verfolgt. Vereinfacht wird der I-Querschnitt als konstant über die Länge betrachtet.

Die beschriebenen Abmessungen sind jeweils vom Stabanfang gemessen.

#### 5.3.4.3 Lasten

## 5.4 Momenten-Krümmungs-Beziehung

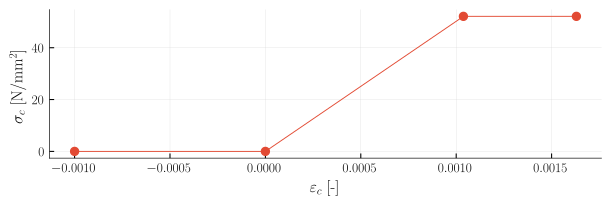
Die Momenten-Krümmungs-Beziehung zeigt bei diesem Versuch eine gewisse Komplexität. Grundsätzlich gilt es für jede Abstufung der Bewehrung eine separate Momenten-Krümmungs-Beziehung herzuleiten.

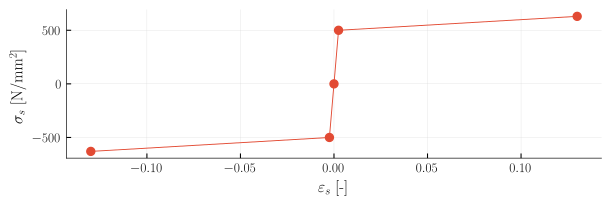
Wird bei der Vorspannung Spannkraftverluste berücksichtigt, so wirkt der Restquerschnitt des Spannstahls als schlaffe Bewehrung bei Belastung mit. Dies hat Einfluss auf das Momenten-Krümmungs-Verhalten. Durch die parabolische Geometrie des Spannkabels, gilt es die Momenten-Krümmungs-Beziehung unter Variation der Spannkabellage zu definieren, was die Komplexität der Momenten-Krümmungs-Beziehung erhöht.

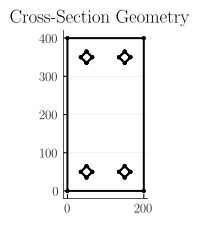
Um den Rechenaufwand gering zu halten wird lediglich ein qualitatives Verhalten der Momenten-Krümmungs-Beziehung angestrebt. Dabei wird der Querschnitt beim Fliessen der Zugbewehrung betrachtet, sowie wird der Biegewiderstand bestimmt. Diese Punkte werden linear mit einander verbunden. Des Weiteren wird die Druckbewehrung stehts vernachlässigt.

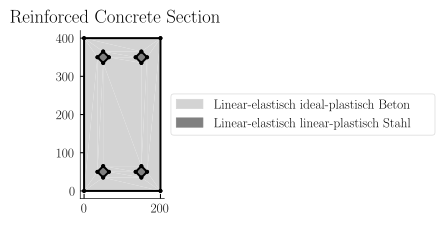
|  |
| --- |
| Abbildung 5.9: Querschnittsanalyse mit Fliessen der Zugbewehrung und elastischer Betondruckzone, qualitativer Verlauf |

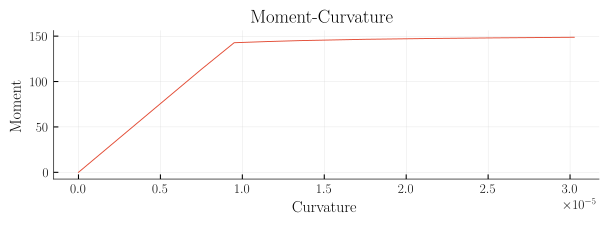
|  |
| --- |
| Abbildung 5.10: Querschnittsanalyse mit erreichter Zugfestigkeit in der Bewehrung und vollständig plastifizierter Betondruckzone, qualitativer Verlauf |











## 5.5 Schiebungs-Beziehung

## 5.6 Versuchsresultate

|  |
| --- |
| Abbildung 5.11: Verformungsverlauf des Versuchsträgers T6, entnommen aus [[5](#ref-sigrist_versuche_1993)] |

|  |
| --- |
| Abbildung 5.12: Last-Verformungs-Verhalten des Versuchsträgers T6, entnommen aus [[5](#ref-sigrist_versuche_1993)] |

# 6. IdeaStatica

In diesem Kapitel wird darauf abgezielt, das Verformungsverhalten der behandelten Versuche mit einer kommerziellen Software zu bestimmen. Das Ziel ist es die Resultate der Software auf Präzision zu prüfen, sowie die Eingabe des Modells zu verstehen.

Dabei wird die Modellaufbereitung beschrieben, sowie einzelne Eingabeparameter diskutiert.

# Literatur

1. Gitz P (2024) Ansätze zur Verformungsberechnung. HSLU Technik & Architektur

2. Jäger T, Marti P (2006) Versuche zum Querkraftwiderstand und zum Verformungsvermögen von Stahlbetonplatten. IBK Bericht 294. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005195576>

3. Tue NV, Ehmann R, Betschoga C, Tung ND (2019) Einfluss geringer Querkraftbewehrung auf die Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetonbalken unterschiedlicher M/V-Kombinationen. Beton- und Stahlbetonbau 114(4):217–230. https://doi.org/<https://doi.org/10.1002/best.201800075>

4. Marienhütte [Produktdatenblatt\_B550B.pdf](https://www.marienhuette.at/wp-content/uploads/Produktdatenblatt-B550B.pdf)

5. Sigrist V, Marti P (1993) Versuche zum Verformungsvermögen von Stahlbetonträgern. Birkhäuser, Basel Boston Berlin