



Benutzeranleitung

25.10.2004

E. Anderheggen
C. Pedron
A. Volkwein

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	2
2	Installation und Programmstart	2
3	Arbeiten mit Dateien	2
	Arbeiten mit EasyStatics Dateien	
	Dokumente auf dem Server speichern	
	Bilder erzeugen	
	Hintergrundbilder	
4	Benutzeroberfläche	3
	Standardbenutzeroberfläche	
	Einstellung von Rastermass und Massstab	
	Eingabe von Zahlenwerten	
5	Modelleingabe	5
	Modellschaltflächen	
6	Lastfälle und Lastkombinationen	7
7	Querschnittseigenschaften und Nachweise	8
	Querschnittswahl und Materialeigenschaften	
	Zuweisung der Stabeigenschaften	
	Moment-Normalkraft-Interaktionsdiagramme	
	Korrekturfaktoren für Knicken und Biege-Drill-Kippen	
	Tragfähigkeitsnachweise für eine gegebene Lastkombination	
	Überprüfungsfaktor (Check-Faktor) für die Querschnittsbeanspruchungen M und N	
8	Auswahl des mechanischen Modells	11
9	Auswahl des Rechenverfahrens	12
	Elastische Berechnungen nach Theorie 1. Ordnung	
	Stabilitätsberechnung	
	Elastische Analyse nach Theorie 2. Ordnung	
	Dynamik	
	Starr-plastische Traglastberechnung	
	Einflusslinien für M, N und V	
10	Ausgabe von Berechnungsergebnissen	14
	Graphische und numerische Ausgabe	
	Vergleichsmodus	
	Spannungsfelder und Kraftresultierende	
	Fachwerkmodelle für Stahlbetonbalken	
11	Modell kopieren	17
12	Berechnungszustände	17
13	Extras	18
	Kommentare hinzufügen	
	Erzeugung von HTML-Dateien	
	EasyStatics Webseite	
	Beispiele	

1 Einführung

Das auf der Methode der finiten Elemente basierende Computerprogramm *EasyStatics* hilft, die wesentlichen Grundzüge der Baustatik ebener Stabtragwerke zu verstehen. In der dazugehörigen Begleitliteratur '*EasyStatics: Ein Werkzeug für die Tragwerkslehre*' von Prof. E. Anderheggen und Dr. P. Steffen¹ werden seine theoretischen Grundlagen erörtert. Versteht man diese, so ist das Programm, das zusätzlich verschiedene Hilfsfunktionen enthält, einfach zu benutzen. Innerhalb dieser Benutzeranleitung beziehen sich die in eckigen Klammern gegebenen Referenzen auf Kapitel und Abschnitte jenes Buches.

Die hier vorliegende Benutzeranleitung beschreibt eine in Vergleich zur Version vom März 2004 weiterentwickelte Version von *EasyStatics*.

2 Installation und Programmstart

Das Programm kann über das Internetportal www.easystatics.ethz.ch unter *Installation* für alle heute gängigen Betriebssysteme kostenlos bezogen werden. Dafür lädt man sich das passende Installationsprogramm herunter und startet dieses. Der Installationsassistent führt einen durch die Programmsinstallation.

Möchte man eine bereits installierte Version von *EasyStatics* durch eine aktuellere ersetzen, so kann man einfach die installierte Datei *EasyStatics.jar* durch die aktuellere Version ersetzen. Erfahrene Anwender können *EasyStatics* auch über die etwa 2.7MB grosse Jar-Datei starten, sofern eine Java Virtual Machine (JVM) mit Java 1.4 oder höher auf dem Rechner installiert ist.

Der Start des Programms erfolgt wie üblich durch die eingerichtete Verknüpfung oder die ausführbare Dateien *EasyStatics.exe* bzw. *EasyStatics.bin*. Unter Microsoft Windows wird zudem die Dateierweiterung *.est* mit *EasyStatics* verknüpft, sodass das Programm durch einen Doppelklick auf Dateien mit dieser Endung gestartet werden kann.

3 Arbeiten mit Dateien

Zur Öffnung und Speicherung von *EasyStatics*-Dateien und damit zusammenhängenden Dokumenten und Bildern dient das *Datei*-Menü.

3.1 Arbeiten mit *EasyStatics* Dateien

EasyStatics-Dateien können entweder vom eigenen Rechner (*Datei > Öffnen*) oder von der Serverdatenbank (*Datei > Öffnen vom Server*) geöffnet werden. An beiden Orten können sie dann auch gespeichert werden und dies lokal entweder unter ihrem ursprünglichen (*Datei > Speichern*) oder einem neuen zu wählenden Namen (*Datei > Speichern als*). Beim Speichern auf dem Server muss der Dateiname jedesmal erneut angegeben werden.

Die aktuellen *EasyStatics*-Dateien sind mit denen der vorigen Version 0.2.0 vom März 2004 nicht kompatibel.

1. Englische Version: *EasyStatics: A Tool for Teaching Structural Design*

3.2 Dokumente auf dem Server speichern

Beliebige Dokumente, die lokal auf dem eigenen Rechner gespeichert sind, insbesondere solche, welche mit dem in *EasyStatics* integrierten HTML-Editor erzeugt wurden (siehe Abschnitt 13.2), können auf dem Internet-Server ähnlich wie *EasyStatics*-Dateien gespeichert werden.

3.3 Bilder erzeugen

Klickt man auf *Datei > Bild erzeugen*, so wird auf der Arbeitsfläche ein schwarzes Rechteck gezeichnet, welches den gewünschten Bildausschnitt definiert. Durch Verschieben der zwei markierten Eckpunkte mit der Maus werden Grösse und Lage des Rechtecks variiert. (Ausnahme: Ist das Auswahlfenster für Stabquerschnitte geöffnet (siehe Kapitel 7), so wird automatisch dessen ganzer Inhalt als zu speicherndes Bild selektiert).

Die Bildausschnittswahl wird durch Drücken der Taste *Enter* oder durch einen Klick mit der rechten Maustaste (Mac OS: ALT-Taste) beendet, wonach man den Bildschirmausschnitt über einen Dateiauswahldialog lokal in einem der Standard-Formate *.png*, *.gif*, *.jpg* oder *.bmp* speichern kann.

3.4 Hintergrundbilder

EasyStatics bietet die Möglichkeit, ein beliebiges Bild als Hintergrund zu verwenden, sodass auf dieser Schablone 'gezeichnet' werden kann. Dazu wähle man im Menü *Datei > Hintergrundbild ein* und dann im Dateiauswahlfenster das gewünschte Hintergrundbild. Es werden die Bildformate *.png*, *.gif* oder *.jpeg* unterstützt. Mit dem Menüpunkt *Datei > Hintergrundbild aus* lässt sich das Bild wieder ausblenden.

4 Benutzeroberfläche

4.1 Standardbenutzeroberfläche

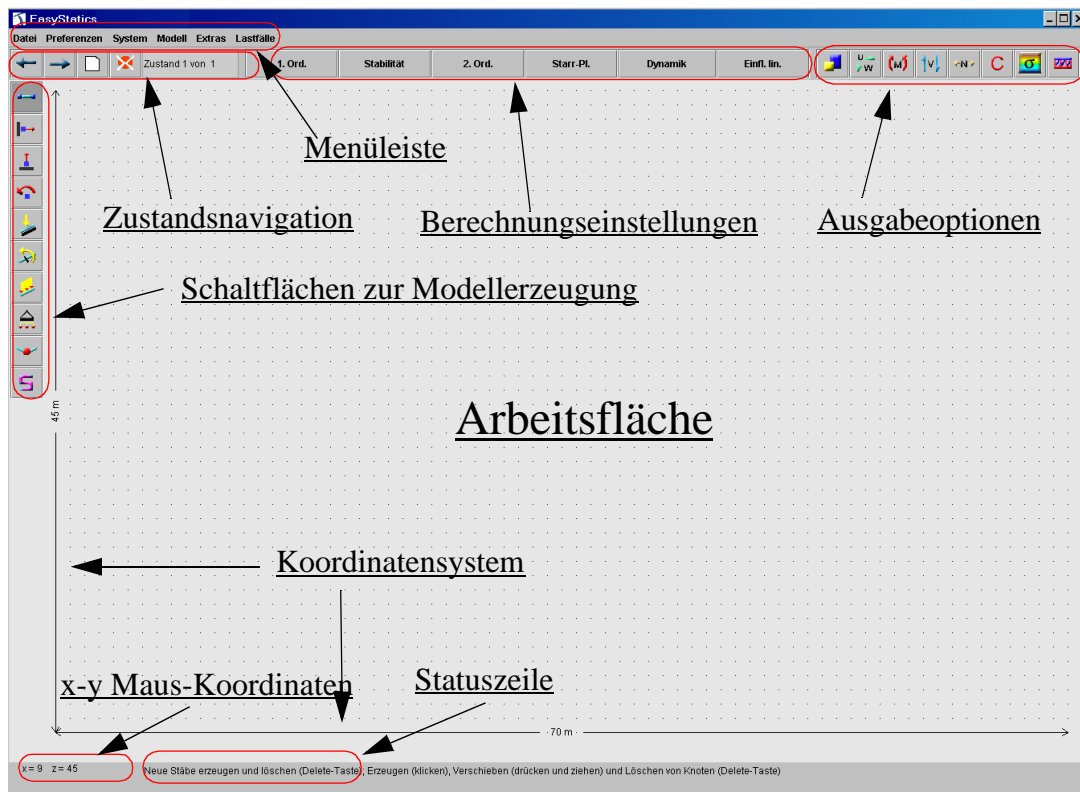
Abb. 1 zeigt die Standardbenutzeroberfläche von *EasyStatics* mit allen seinen Funktionen. Bewegt man den Mauszeiger über eine Schaltfläche, so erhält man durch einen eingeblendeten Hinweis Informationen über deren Funktionalität.

4.2 Einstellung von Rastermass und Massstab

Mit dem Programmstart erscheint ein Dialogfenster für die Einstellung des Koordinatenrasters (*fein*, *mittel* oder *grob*) und der Maschenweite zur Festlegung des Zeichenmassstabs. Die voreingestellten Werte können verändert werden, solange der Dialog noch nicht mit *OK* bestätigt worden ist. Die Abmessungen der Arbeitsfläche in Meter [m] werden anschliessend gemäss Abb. 1 angezeigt.

Die Lage der Knoten des Finite-Element-Modells können mit der Maus nur in den Rasterpunkten spezifiziert werden, es sei denn, ein vorhandener Stab wird durch Einfügen von Zwischenknoten in zwei einzelne Stäbe unterteilt. Doppelklickt man jedoch auf einem Knoten, dann eröffnet sich ein Dialogfenster mit dem dessen x-y-Koordinaten numerisch eingegeben bzw. abgeändert werden können.

Abb. 1: *EasyStatics*-Benutzeroberfläche mit allen Funktionen



4.3 Farben ändern, Sprache auswählen und im Optionsmodus arbeiten

Die Farben vieler graphischer Objekte, die Ausgabesprache des Programms sowie die aktivierten Schaltflächen und damit die Funktionalität von *EasyStatics* können den persönlichen Bedürfnissen angepasst werden.

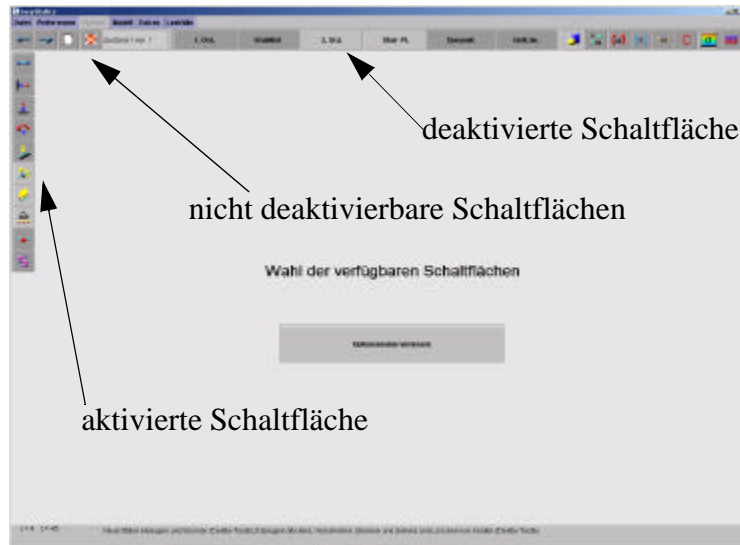
Zum Ändern der Farbe eines graphischen Objekts klicke man im Menü auf *Optionen > Farben*. Es erscheint ein Fenster mit einer Liste graphischer Objekte zusammen mit ihrer aktuellen Farbe. Ein Doppelklick auf eine der nun angezeigten Farben ermöglicht die Auswahl dieser in einem separaten Dialog.

Im Menü *Optionen > Sprache* hat man die Auswahl zwischen Englisch, Deutsch, Italienisch und Französisch.

Die neu spezifizierten Farb- und Spracheinstellungen werden von *EasyStatics* unmittelbar übernommen und im Benutzerprofil des Anwenders lokal gespeichert. Ein erneuter Programmstart erfolgt dann mit den so gesetzten Einstellungen.

Es ist zudem möglich, den Bedienungsumfang und damit die Funktionalität von *EasyStatics* zu verändern. Dies dürfte vor allem für Dozenten interessant sein, die *EasyStatics* mit reduzierter Funktionalität einsetzen möchten. Mit einem Klick auf *Optionen > Funktionen*. ändert sich die Benutzeroberfläche wie in Abb. 2 dargestellt. Die hier selektierten Schaltflächen stehen in *EasyStatics* nach Verlassen des Optionsmodus (= Klick auf die Schaltfläche in der Fenstermitte) zur Verfügung. Die aktivierten Schaltflächen werden zusammen mit der *EasyStatics*-Datei gespeichert und nicht wie die Farb- oder Spracheinstellungen über die Benutzereinstellungen definiert. Um diese Einstellungen vornehmen zu können, darf nur ein Modell im Programmfenster zu sehen sein, d.h. der Modellkopier-Modus darf nicht aktiv sein (siehe Kap. 11).

Abb. 2: *EasyStatics*-Benutzeroberfläche im Optionsmodus



4.4 Eingabe von Zahlenwerten

Diverse Dialogfenster innerhalb von *EasyStatics* erfordern die Eingabe von Zahlenwerten. Diese werden erst dann übernommen, wenn die Eingabe in dem jeweiligen Feld mit der *Return*- oder *Tab*-Taste oder durch Setzen des Cursors in ein anderes Eingabefeld bestätigt wird.

5 Modelleingabe

5.1 Modellschaltflächen

Ist die oberste Schaltfläche am linken Bildschirmrand (siehe Tab. 1) selektiert, so werden die Knoten und Elemente des Finite-Element-Modells durch Mausklicks erzeugt. Mit der *Alt*- oder *Return*-Taste oder durch einen Klick mit der rechten Maustaste beendet man diese Art der Eingabe. Mit gedrückter Maustaste kann ein Knoten verschoben werden. Befindet sich der Mauszeiger über einem Knoten oder Element, so ist dieses Element entsprechend markiert (siehe Abb. 3) und kann mit der *Delete*- oder *Backspace*-Taste wieder gelöscht werden. Löscht man einen Knoten, so werden alle damit verbundenen Elemente ebenfalls gelöscht.

Analog dazu lassen sich nach Aktivierung der jeweiligen Schaltfläche Auflager und konzentrierte und verteilte Lasten erzeugen, in ihrer Richtung resp. Grösse verschieben oder entfernen. Ist die entsprechende Schaltfläche ausgewählt, so kann man mit einem Doppelklick auf ein Auflager oder eine Last die Richtung und Grösse der vorgeschriebenen Auflagerverschiebung bzw. der konzentrierten oder verteilten Last durch numerische Eingabe anpassen.

Ein Doppelklick auf eine Lastschaltfläche dagegen ermöglicht die Änderung der Standardvorgaben für die Lastintensität und -richtung des entsprechenden Lasttyps. Der Zeichenmassstab für die Lasten wird dabei ebenfalls festgelegt.

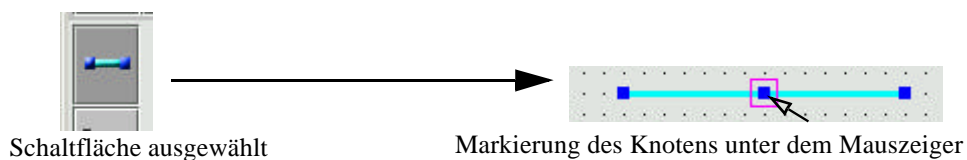
Biegeelenke innerhalb eines Stabes werden nach Aktivierung der entsprechenden Schaltfläche durch einen Klick auf den entsprechenden Stab eingeführt oder mit der *Delete*- oder *Backspace*-Taste entfernt. Die so spezifizierten Gelenke werden jedoch nur bei Rahmentragwerken berücksichtigt. Bei Fachwerkberechnungen werden sie ignoriert. Sie würden nämlich zu lokalen Instabilitäten führen, weil bei jedem Fachwerkstab zwei Gelenke am Stabanfang und -ende angenommen werden.

Mit der Eigengewicht-Schaltfläche wird die Berücksichtigung des Lastfalls Eigengewicht bei den nachfolgenden Berechnungen aktiviert bzw. deaktiviert.

Tab. 1: Modellschaltflächen

Modell-schaltfläche	Funktion bei einmaligem Klick Doppelklick für die numerische Eingabe
	Erzeugen und Verschieben von Knoten und Elementen
	Erzeugen oder Auswählen horizontaler Auflager
	Erzeugen oder Auswählen vertikaler Auflager
	Erzeugen oder Auswählen von Rotationsauflagern
	Erzeugen oder Auswählen konzentrierter Kräfte
	Erzeugen oder Auswählen konzentrierter Momente
	Erzeugen oder Auswählen verteilter Stablasten
	Berücksichtigen/nicht berücksichtigen des Eigengewichts
	Erzeugen oder Auswählen von Gelenken bei ebenen Rahmen
	Eingabe von Querschnitts- und Materialeigenschaften

Abb. 3: Graphische Markierung eines ausgewählten Modellelements



6 Lastfälle und Lastkombinationen

Es können zwei Lastfälle spezifiziert werden, welche jeweils aus verschiedenen verteilten und konzentrierten Lasten bestehen können. Das Eigengewicht, falls berücksichtigt, gehört immer zum 1. Lastfall.

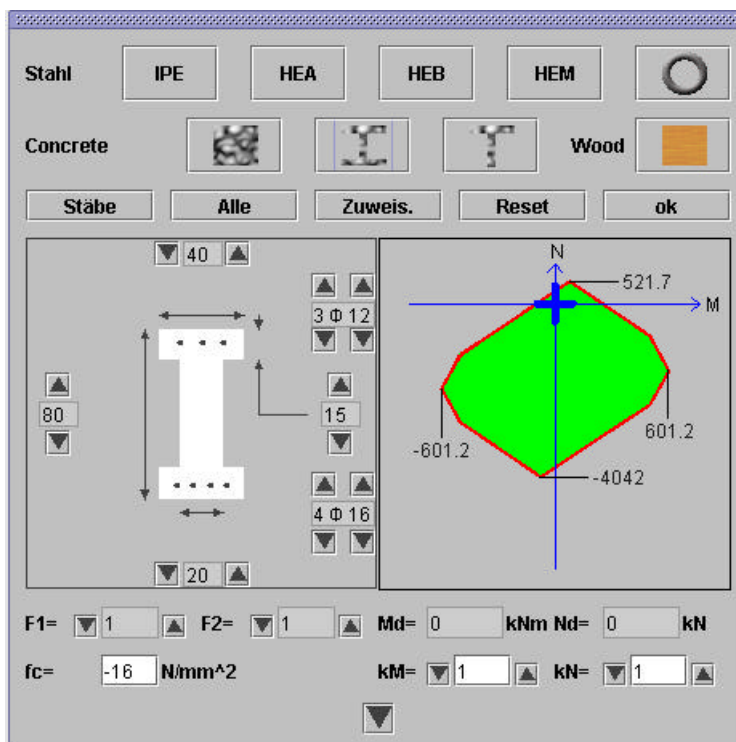
Abb. 4: Dialogfenster zur Spezifikation der Eingabe und Ausgabe der zwei Lastfälle.



Durch die Selektion von einem der beiden Lastfälle gehören alle anschliessend eingegebenen verteilten und konzentrierten Lasten zu diesem Lastfall. Das als *Kombination* bezeichnete Feld dient zur Steuerung der Ausgabe. Ist dieses deaktiviert, so beziehen sich alle elastisch berechneten Resultate auf den momentan aktiven Lastfall.

Ist der Menüpunkt zur Lastfallkombination selektiert oder führt man eine starr-plastische Berechnung durch, so werden alle Lasten der Lastfälle 1 und 2 mit den Lastfaktoren $F1$ bzw. $F2$ multipliziert. Die Resultate beziehen sich dann auf die Lastkombination. Die Lastfaktoren $F1$ und $F2$ (mit $0 \leq F1, F2 \leq 2$ bei standardmässig $F1 = F2 = 1$) werden ebenfalls für die Tragfähigkeitsnachweise am Querschnitt eingesetzt. Die Lastfaktoren $F1$ und $F2$ werden über das Querschnitteingabefenster (siehe nächster Abschnitt) durch den Benutzer eingegeben und gelten für alle Querschnitte des Tragwerkes.

Abb. 5: Querschnittsfenster



7 Querschnittseigenschaften und Nachweise

Wenn noch keine Querschnitte spezifiziert wurden, nimmt EasyStatics für alle Stäbe standardmässig ein rechteckiges Holzprofil mit den Abmessungen 50 x 60 cm an. Ein Klick auf die Schaltfläche zum Setzen der Querschnitts- und Materialeigenschaften (*SEC* = Section = Stabquerschnitt), gefolgt von einem Doppelklick auf einen Stab oder auf erneut die *SEC*-Schaltfläche, erzeugt ein Dialogfenster (siehe Abb. 5) mit dem die Art und die Dimensionen der Stabquerschnitte (Stahl in *mm*, Holz und Stahlbeton in *cm*) sowie alle notwendigen Materialparameter spezifiziert werden können. Die setzbaren Parameter können in vielen Fällen auch mit Hilfe der benachbarten Pfeilschaltflächen verändert werden.

7.1 Querschnittswahl und Materialeigenschaften

Folgende Arten von Stabquerschnitten sind möglich:

- Stahlwalzprofile der Standardtypen IPE, HEA, HEB und HEM sowie halbe Profile IPE, HEA, und HEB (siehe Auswahl Schaltflächen in Abb. 5)
- Stahlrohre mit wählbarer Wandstärke und Aussendurchmesser (beide in [mm]). Ist die Wandstärke zu gross, so wird ein runder Vollquerschnitt angenommen.
- Rechteckige, Doppel-T- und T-förmige Stahlbetonquerschnitte mit oberer und unterer Bewehrung. Die (einschichtigen) Bewehrungslagen werden automatisch festgelegt (3 cm Betondeckung, gemessen vom oberen bzw. unteren Querschnittsrand).
- Rechteckige Holzquerschnitte.

Numerisch können folgende Werteeingegeben bzw. verändert werden:

- bei Stahlquerschnitten die Stahlflussspannung f_Y für Zug und Druck (Vorgabe: $f_Y = 355 \text{ N/mm}^2$),
- bei Stahlbetonquerschnitten die Fliessspannung f_Y der Stahlbewehrung in Zug und Druck (Vorgabe: $f_Y = 460 \text{ N/mm}^2$) und die Betondruckfestigkeit f_C (Vorgabe: $f_C = -16 \text{ N/mm}^2$),
- bei Holzquerschnitten die maximal aufzunehmabaren Normalspannungen für Zug f_T und Druck f_C (Vorgabe: $f_T = 20$, $f_C = -15 \text{ N/mm}^2$).

Durch einen Klick auf die einzelne Schaltfläche mit dem Pfeil nach unten, erhält man Details zum gewählten Querschnitt. Hier können durch direkte numerische Eingabe auch der Elastizitätsmodul E und das Gewicht pro Laufmeter verändert werden.

7.2 Zuweisung der Stabeigenschaften

Der beim Öffnen des Querschnittsdialog ausgewählte Stab sowie alle andere Stäbe mit dem gleichen Querschnitt gelten als automatisch als „gewählt“ und werden entsprechend markiert. Will man diese Auswahl ändern, so klicke man die Schaltfläche „*Stäbe*“ wonach man einzelne Stäbe durch Einzelklicks auswählen kann. Ein Klick auf die Schaltfläche „*Alle*“ wählt dementsprechend alle Stäbe aus, womit sie alle den gleichen Querschnitt erhalten. Die jeweils gewählten Stäbe werden mit einer speziellen Farbe markiert.

Damit die neu eingegebenen Querschnittseigenschaften für die nachfolgenden Berechnungen berücksichtigt werden, müssen diese den ausgewählten Stäben noch zugewiesen werden. Dazu klickt man auf eine der Schaltflächen „*Zuweisen*“ oder „*OK*“. Mit „*OK*“ wird zudem das Fenster geschlossen. In beiden Fällen wiederholt *EasyStatics* automatisch die zuletzt ausgeführte Berechnung mit den nun neuen Querschnittsdaten. Klickt man auf „*Reset*“, so kehrt man zum Querschnitt zurück, der zu Beginn der Eingabe gesetzt war. Vorher durch „*Zuweisen*“ oder „*OK*“ zugewiesene Querschnitte bleiben jedoch für die nachfolgende Berechnungen gültig.

7.3 Moment-Normalkraft-Interaktionsdiagramme

Auf der rechten Seite des Querschnittsfensters aus Abb. 5 erscheint das für den links dargestellten Querschnitt gültige M-N-Interaktionsdiagramm als polygonale grüne Fläche mit 8 oder, bei Holzquerschnitten; 4 Vertexpunkten in einem M-N-Koordinatensystem. Liegen die Schnittkräfte M und N , welche den Querschnitt beanspruchen, innerhalb dieser Fläche, dann gelten sie als zulässig. Liegen sie ausserhalb, dann gilt der Widerstand des Querschnitts als überschritten. Die Tragfähigkeit eines durch ein Biegemoment M_d und eine Normalkraft N_d beanspruchten Querschnitts wird damit sofort sichtbar (Die Querkraft V bleibt allerdings unberücksichtigt!).

Die M-N-Koordinaten eines Vertexpunktes werden bestimmt, indem eine entsprechende Dehnungsverteilung angenommen wird. Aus der daraus resultierenden Verteilung der Normalspannung σ berechnen sich die dazugehörigen Werte von M und N des Vertexpunktes. Abb. 6 zeigt die für Doppel-T-Querschnitte angenommenen Verteilungen der Dehnung ε (in grün) mit ihren neutralen Achsen ($\varepsilon = 0$) und der zugehörigen Spannungen $\sigma_{\text{MAX}} > 0$ (rot) und $\sigma_{\text{MIN}} < 0$ (blau) in der Annahme, dass das Material sich starr-plastisch verhält [Abschnitt 2.3.2].

Starr-plastisches Materialverhalten wird für Stahl inklusive Bewehrungsstahl (mit $\sigma_{\text{MAX}} = \sigma_{\text{MIN}} = f_Y = \text{Stahlfliessspannung}$) und für Beton (mit $\sigma_{\text{MAX}} = 0$; $\sigma_{\text{MIN}} = b_C = \text{Betondruckfestigkeit}$) angenommen. Für Holz wird ein linear-elastisches Materialverhalten angenommen. Dabei bestimmt sich das Interaktionsdiagramm aus den Bedingungen, dass die Normalspannungen σ_{oben} und σ_{unten} am oberen bzw. unteren Querschnittsrand innerhalb der maximal aufnehmbaren Normalspannungen f_T für Zug und f_C für Druck liegen: $f_T \leq \sigma_{\text{oben}} \leq f_C$ bzw. $f_T \leq \sigma_{\text{unten}} \leq f_C$.

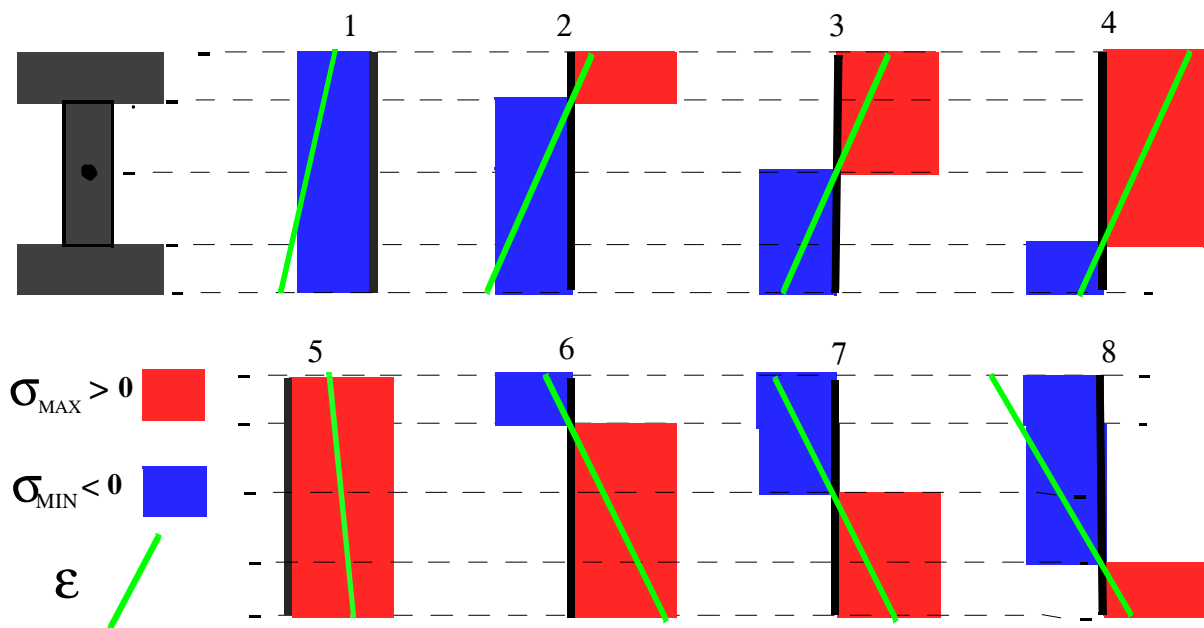
Die in Abb. 6 gezeigten Dehnungsverteilungen gelten für Doppel-T-Querschnitte. Bei anderen Querschnittsarten gelten folgende leicht abgeänderten Voreinstellungen:

- Bei Stahlrohren und rechteckigen Stahlbetonquerschnitten liegen die neutralen Achsen der Dehnungsverteilungen 2, 4, 6 und 8 (siehe Abb. 6) in den Viertelpunkten der Querschnittshöhe.
- Bei T-Profilen aus Stahlbeton liegt die neutrale Achse der Dehnungsverteilungen 3 und 7 (siehe Abb. 6) im Schwerpunkt des einfach symmetrischen Querschnitts. Bei den Dehnungsverteilungen 4 und 8 liegt sie auf halber Distanz zwischen dem Querschnittsschwerpunkt und dem unteren Querschnittsrand.
- Bei rechteckigen Holzquerschnitten genügen vier Dehnungsverteilungen (und damit vier Vertexpunkte). Diese entsprechen den in Abb. 6 den mit den Nummern 1, 3, 5 und 7 bezeichneten Verteilungen. Wie oben erwähnt werden bei Holz die Interaktionsdiagramme aufgrund einer elastischen Spannungsverteilung bestimmt.

7.4 Korrekturfaktoren für Knicken und Biege-Drill-Kippen

In den Baunormen wird verlangt, dass bei hohen Querschnitten und vor allem bei Stahlprofilen, die in Querrichtung eine geringe Steifigkeit aufweisen, die zulässigen Beanspruchungen zu reduzieren sind. Dies erfolgt durch die Spezifikation der Faktoren $\kappa_M \leq 1$ für die Momente und $\kappa_N \leq 1$ für die Drucknormalkräfte, mit denen die Form des Integrationsdiagramms durch Reduktion der aufnehmbaren Momente bzw. Drucknormalkräfte abgeändert werden kann. Mit k_M kann das Biege-Drill-Kippen, mit k_N das Knicken des Stabes in der meistens schwächeren Querrichtung näherungsweise berücksichtigt werden. Die Bestimmung der dafür einzusetzenden Werte und deren Eingabe sind Aufgabe des Programmbenutzers.

Abb. 6: M-N-Interaktionsdiagramm: Spannungsverteilungen mit Dehnungsebene



7.5 Tragfähigkeitsnachweise für eine gegebene Lastkombination

Zur Querschnittsbemessung ist nachzuweisen, dass die Schnittkräfte M_d und N_d , die sich infolge einer bestimmten Lastkombination ergeben (der Index „d“ steht für „Design“ oder „Dimensionierung“), innerhalb der zulässigen polygonalen Fläche vom Interaktionsdiagramm liegen.

Die Lastkombination wird durch die eingegebenen verteilten und konzentrierten Lasten der Lastfälle 1 und 2 (das Eigengewicht, falls berücksichtigt, gehört zum Lastfall 1) gebildet, multipliziert mit den dazugehörigen Lastfaktoren $F1$ und $F2$ (siehe Kap. 6). Dabei gilt

$$M_d = F1 * M_1 + F2 * M_2$$

$$N_d = F1 * N_1 + F2 * N_2,$$

wobei M_1 , M_2 , N_1 und N_2 die Momente bzw. Normalkräfte infolge der Lasten des 1. bzw. 2. Lastfalls darstellen. Die Lastfaktoren $F1$ und $F2$ werden über den Querschnitteingabedialog eingegeben und gelten für alle Querschnitte des Tragwerks.

Wählt man bei geöffnetem Querschnitteingabedialog einen Stab durch einen Klick, so wählt man gleichzeitig auch den Querschnitt, dessen Tragfähigkeit nachzuweisen ist. Der entsprechende Stab wird mit einem roten Querstrich markiert. Gleichzeitig erscheint im M-N-Koordinatensystem des Interaktionsdiagramms ein graphischer Hinweis zur Angabe der berechneten Werte von M und N im gewählten Querschnitt. Ein blaues oder rotes Kreuz kennzeichnet, ob sich M und N innerhalb der zulässigen Fläche befinden oder nicht. Liegt der Punkt ausserhalb der Zeichenfläche, dann zeigt ein roter Pfeil in die Richtung, in der die Grenzen des Interaktionsdiagramms überschritten sind.

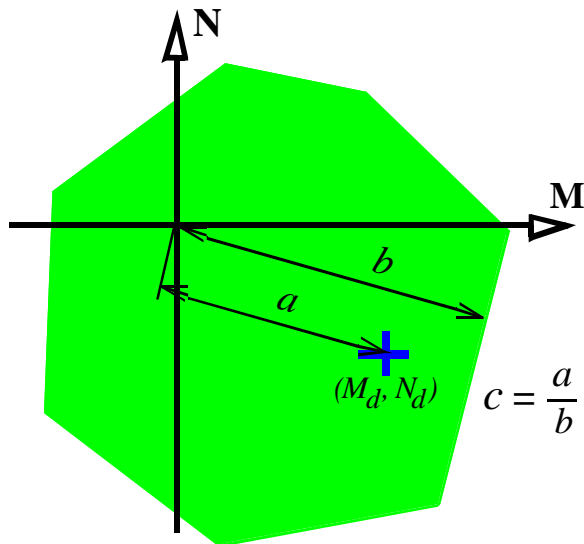
Die Schnittkräfte M_d und N_d , die man für den Tragsicherheitsnachweis benötigt, können nach der elastischen Theorie 1. oder 2. Ordnung oder auch nach der idealen Plastizitätstheorie [Kap. 6] berechnet werden (siehe Kap. 9).

7.6 Überprüfungsfaktor (Check-Faktor) für die Querschnittsbeanspruchungen M und N

Zur Beurteilung der Tragreserven bzw. der Tragfähigkeitsüberschreitungen nicht nur eines einzelnen Stabquerschnitts sondern, auf einen Blick, des gesamten Tragwerks, wird in allen Stäben und Querschnitten der sogenannte „Check-Faktor“ berechnet und auf Verlangen (siehe Kap. 10) als Diagramm entlang aller Stäben ausgegeben.

Abb. 7 zeigt, wie der Wert $c = a/b$ des Check-Faktors bestimmt wird. Dafür werden die Abstände „a“ und „b“ bestimmt, gemessen senkrecht zur massgebenden Seite des Interaktionsdiagramms. Man sieht, dass c kleiner als Eins ist, wenn der Schnittpunkt (M_d, N_d) innerhalb der zulässigen Fläche des Interaktionsdiagramms liegt (die Check-Faktor-Linie wird dann blau gezeichnet). Ist c grösser als Eins, so überschreiten die berechneten Schnittkräfte die Tragfähigkeit des Querschnitts (die Check-Faktor-Linie wird rot gezeichnet). Der Abstand der gezeichneten Check-Faktor-Linie von der Stabachse entspricht dem Wert von c (wobei für alle $c > 1$ ein logarithmischer Masstab verwendet wird). Wie bei allen graphisch dargestellten Grössen wird auch der Wert des Check-Faktors c durch ein Anhalten der Maus an der gewünschten Stelle numerisch auf den Bildschirm ausgegeben.

Abb. 7: Bestimmung des Check-Faktors



8 Auswahl des mechanischen Modells

Im Menü *System* kann man auswählen, ob das modellierte System als *Fachwerk* oder als *Rahmen* berechnet wird. Während der Programmausführung kann man jederzeit zwischen den beiden Varianten wechseln. Fachwerkstäbe werden wie Rahmenstäbe mit je zwei Stabendgelenken behandelt, weitere vom Benutzer spezifizierte Gelenke (die zu einer Instabilität des Tragwerks führen würden!) werden jedoch ignoriert. Alle Arten von Lasten können, wie bei den Rahmenstäben, innerhalb der Fachwerkstäbe wirken.

9 Auswahl des Rechenverfahrens

Ein Modell lässt sich nur dann berechnen, wenn es stabil gelagert ist. Ist das nicht der Fall, so zeigt das Programm eine mögliche Starrkörperverschiebung des Modells an, welche durch passende Auflagerbedingungen oder Modellergänzungen unterbunden werden muss.

9.1 Elastische Berechnungen nach Theorie 1. Ordnung

Ein Klick auf die Schaltfläche *1. Ordnung* aktiviert die elastische Berechnung nach Theorie 1. Ordnung [Kapitel 3].

9.2 Stabilitätsberechnung

Bei einem Klick auf die Schaltfläche *Stabilität* werden zuerst die Normalkräfte in allen Stäben nach Theorie 1. Ordnung ermittelt. Diese gelten dann als initiale Normalkräfte für die nachfolgende Bestimmung des zugehörigen Traglastfaktors λ_{krit} und der Knickfigur [Abschnitt 4.4].

9.3 Elastische Analyse nach Theorie 2. Ordnung

Bei einem Klick auf die Schaltfläche *2. Ordnung* [Abschnitt 4.3] wird auf die gleiche Weise wie bei der Stabilitätsberechnung zuerst der Traglastfaktor λ_{krit} ermittelt. Ein Dialogfenster ermöglicht dann die Eingabe eines Faktors β (siehe Abb. 8) mit dem die initialen Normalkräfte (nur diese und nicht die sie erzeugende Lasten!) in allen Stäben für die nachfolgende Analyse nach Theorie 2. Ordnung multipliziert werden.

Bei der Programmvorgabe $\beta=1$ werden die nach der Theorie 1. Ordnung berechneten Normalkräfte als initiale Normalkräfte ohne Anpassungen verwendet.

Gibt man $\beta=\lambda_{\text{krit}}$ oder $\beta>\lambda_{\text{krit}}$ ein, so wird das System instabil [siehe Abschnitt 4.6], womit die Analyse nach der Theorie 2. Ordnung nicht durchgeführt werden kann. Effekte 2. Ordnung werden am besten ersichtlich, wenn man einen Faktor β spezifiziert, der etwas kleiner ist als λ_{krit} , z.B. $\beta = 0.9 * \lambda_{\text{krit}}$.

Abb. 8: Dialogfenster für Berechnungen nach Theorie 2. Ordnung



9.4 Dynamik

Bei einem Klick auf die Schaltfläche *Dynamik* bestimmt *EasyStatics* die ersten vier dynamischen Eigenformen mit den kleinsten Eigenfrequenzen [Kapitel 5].

Bei Rahmen mit weniger als vier Knoten können jedoch höchstens soviele Eigenformen bestimmt werden, wie das System Knoten hat. Bei Fachwerken mit weniger als acht Knoten nur halb so viele. Dies muss bei einfachen Systemen mit wenig Knoten beachtet werden, da hier die dynamischen Berechnungen nur grobe Approximationen für die höheren Eigenformen liefern können. Selbstverständlich kann die Anzahl Knoten sehr einfach durch Stabunterteilung erhöht werden. Die Genauigkeit der am gleichen System, aber mit verschiedenen Unterteilungen erhaltenen Lösungen kann damit beurteilt werden..

9.5 Starr-plastische Traglastberechnung

Ein Klick auf die Schaltfläche *Starr-Pl.* berechnet das System unter Annahme eines starr-plastischen Materialverhaltens [Abschnitt 2.3.2 und Kapitel 6]. Bei Fachwerken gilt nach wie vor die Annahme der gelenkigen Anschlüsse. Als äussere Lasteinwirkungen gelten immer die mit den Lastfaktoren $F1$ und $F2$ (siehe Kap. 6 & 7.5) definierten Lastkombinationen.

Zur Erfüllung der Plastizitätsbedingungen werden die gleichen linearen Ungleichungen formuliert, die im Interaktionsdiagramm der Abb. 5 die zulässige grüne Fläche definieren. Linearisierte Plastizitätsbedingungen werden auf diese Weise am Anfang und Ende eines jeden Stabs erfüllt (jedoch nicht notwendigerweise innerhalb der Stäbe). Bei der Lösung des linearen Programms (Abschnitte [6.6] und [6.7]) sind somit für Stahl- oder Stahlbetonquerschnitte pro Stab 16 lineare Ungleichungen, 8 für den Anfangsquerschnitt und 8 für den Endquerschnitt, zu berücksichtigen. Bei Holzstäben halb so viele. (**Bemerkung:** Die in [Abschnitt 6.2] angegebenen Querschnittswiderstände gelten für die hier beschriebene verbesserte *EasyStatics* Version nicht mehr!).

Der Traglastfaktor λ_{krit} , die Form des Kollapsmechanismus und die gewünschten Schnittkräfte werden angezeigt. Bei den Elementen, an deren Anfang oder Ende sich plastische Verformungen ergeben, werden diese graphisch angezeigt. Der ebenfalls graphisch darstellbare Check-Faktor (siehe Abschnitt 7.6) zeigt die Stellen an, wo die Plastizitätsbedingungen erfüllt sind (am Stabanfang und Ende ist dies immer der Fall!) oder nicht erfüllt sind (allenfalls innerhalb einzelner Stäbe).

Wird der Check-Faktor überall in blau dargestellt, d.h. liegen die Schnittkräfte M_d und N_d überall im zulässigen M-N-Bereich, dann stellen die mit λ_{krit} multiplizierten Lasten der betrachteten Lastkombination den theoretisch richtigen Wert der Kollapslast dar. Wird der Check-Faktor stellenweise in rot gezeichnet, dann stellt λ_{krit} einen oberen Grenzwert des richtigen Wertes dar [Abschnitt 6.8].

Mit der Anzeige des Kollapsmechanismus erscheint auch ein Dialogfenster mit der Abfrage, ob der ermittelte Traglastfaktor für eine anschliessende elastische Berechnung nach Theorie 1. Ordnung als zusätzlicher Lastfaktor verwendet werden soll (siehe Abb. 9). Wählt man *ja*, so werden alle Lasten der Lastkombination für die nachfolgende elastische Berechnung mit dem vorher bestimmten starr-plastischen Traglastfaktor λ_{krit} multipliziert. Die beiden Lösungen lassen sich damit direkt vergleichen (siehe auch Abschnitt 10.2).

Abb. 9: Dialogfenster für die starr-plastische Traglastberechnung











9.6 Einflusslinien für M, N und V

Ein Mausklick auf die Schaltfläche *Einfl.lin.* führt zur Ermittlung von Einflusslinien für Momente, Normal- oder Querkräfte. Ein Mausklick auf einen Stab erzeugt einen mit der Maus verschiebbaren farbigen Kreis, der die Stelle markiert, für welche die Einflusslinie ermittelt wird. Einflusslinien basieren auf der elastischen Theorie 1. Ordnung.

10 Ausgabe von Berechnungsergebnissen

Tab. 2: Ausgabeschaltflächen

Schaltfläche	Ausgabeart
	Vergleichsmodus
	Ausgabe der Verschiebungen in Horizontal und Vertikalrichtung
	Ausgabe der Biegemomente
	Ausgabe der Querkräfte
	Ausgabe der Normalkräfte
	Querschnittreserven überprüfen
	Spannungsfelder und Kraftresultierende
	Fachwerkmodell eines Stahlbetonbalkens

10.1 Graphische und numerische Ausgabe

Klickt man eine der in Tab. 2 dargestellten Ausgabeschaltflächen, wird die graphische Ausgabe der entsprechenden Grösse aktiviert. Läuft man nun mit der Maus ohne weitere Mausklicks entlang der gezeichneten Diagramme (z.B. der Momentenlinie), so wird der Wert der entsprechenden Grösse numerisch ausgegeben. Dies gilt auch bei Auflagerkräften oder Lasten.

Durch einen Mausklick kann man dann bewirken, dass die so ausgegebenen numerischen Werte nicht verschwinden. Damit sind sie z.B. in den anschliessend erzeugten und getrennt gespeicherten Bildern (siehe Abschnitt 3.3) weiterhin sichtbar. Sie verschwinden nur, wenn das Modell abgeändert oder eine andere Ausgabeoptionen gewählt wird.

10.2 Vergleichsmodus

Ist der Vergleichsmodus inaktiv, dann werden Verschiebungen, Momente, Quer- oder Normalkräfte für jedes Bild mit jeweils aktualisierten, der Bildschirmgrösse angepassten Massstäben gezeichnet. Wird der Vergleichsmodus jedoch bei elastischen Berechnungen nach den Theorien 1. oder 2. Ordnung aktiviert, dann ändern sich die Massstäbe zwischen nachfolgenden Berechnungen nicht mehr. Dies erlaubt, den Einfluss von Modellveränderungen (z.B. durch eine Last- oder Knotenverschiebung) visuell zu beurteilen, ohne die entsprechenden numerischen Werte vergleichen zu müssen.

Bei einer starr-plastischen Berechnung wird der Vergleichsmodus deaktiviert. Verlangt man jedoch, dass der Traglastfaktor als Lastfaktor für eine nachfolgende elastische Berechnung nach Theorie 1. Ordnung benützt wird (siehe Abschnitt 9.5), so werden die dabei erhaltenen Schnittkräfte mit dem gleichen Zeichenmassstab dargestellt wie bei der starr-plastischen Berechnung, d.h. wie wenn der Vergleichsmodus aktiv wäre. Dies erlaubt einen direkten Vergleich der beiden Berechnungsarten.

10.3 Spannungsfelder und Kraftresultierende

Bei Berechnungen nach Theorie 1. Ordnung [Abschnitt 3.8] kann die Verteilung der Normalspannungen σ von ausgewählten Stäben graphisch über die Länge und die Querschnittshöhe mit Hilfe einer Farbskala gezeigt werden. Ein Mausklick auf die entsprechende Ausgabeschaltfläche ersetzt die übliche Benutzeroberfläche durch eine andere speziell dafür konzipierte graphische Darstellung (siehe Abb. 10).

Tab. 3: Ausgabeschaltflächen für Spannungsfelder und Fachwerkmodelle





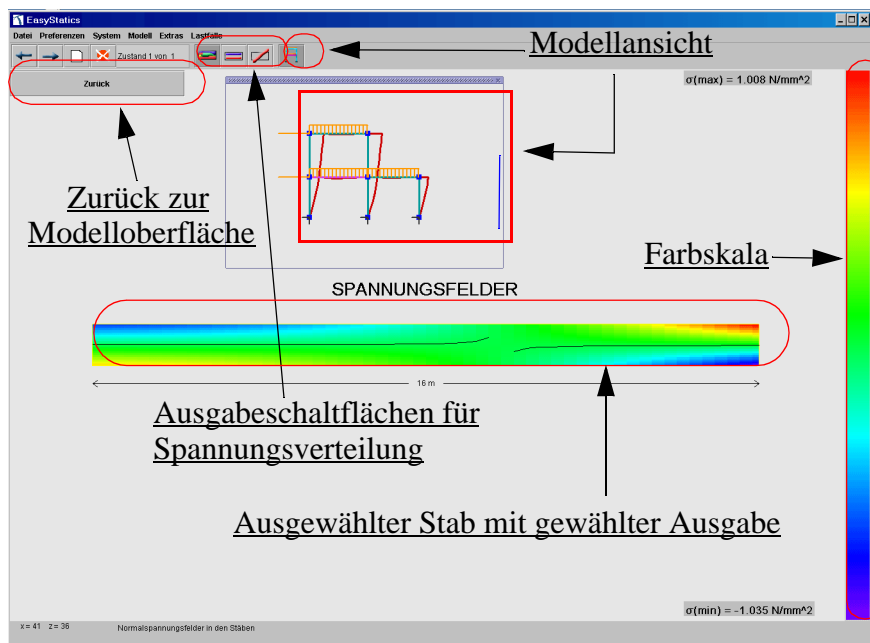
Schaltfläche	Ausgabeoptionen im Spannungsverteilungsmodus
	Verteilung der Normalspannung σ
	Zug-Druck-Resultierende
	Gesamtresultierende (= Normalkraft)
	Modellansicht in verkleinerter Masstab

Abb. 10: Verteilung der Normalspannungen



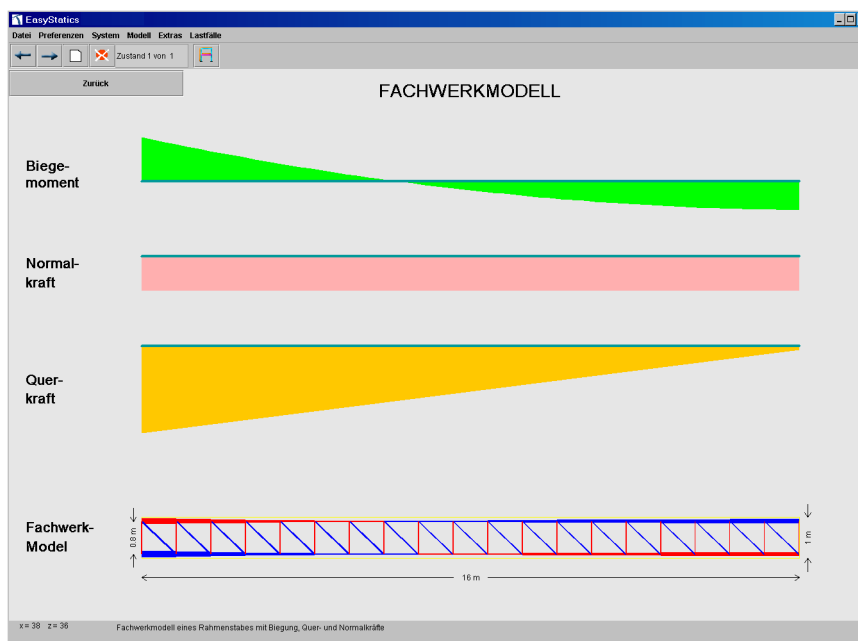
Neben den Spannungen σ können auch die Kraftresultierende der positiven (rot) und negativen (blau) Spannungen sowie die der Normalkraft N entsprechenden Gesamresultierende (rot oder blau je nach Vorzeichen) ausgegeben werden. Diese Kräfte werden in ihrer richtigen Lage, d.h. mit der richtigen Exzentrizität bezüglich der Stabachse, gezeichnet. Auch hier werden entsprechende numerische Werte durch klickfreies Bewegen des Mauszeigers über den gezeichneten Objekten angezeigt und durch einen weiteren Klick fixiert.

10.4 Fachwerkmodelle für Stahlbetonbalken

Bei der Berechnung ebener Rahmen nach Theorie 1. Ordnung kann auch nach [Abschnitt 3.8] das Fachwerkmodell eines Stahlbetonbalkens angezeigt werden (siehe Abb. 11). Ein Mausklick auf die dazugehörige Ausgabeschaltfläche führt zuerst zu einem Dialogfenster, über welches der gewünschte Stab auszuwählen ist. Die übliche Benutzeroberfläche wird dann durch eine speziell dafür angepasste ersetzt (siehe Abb. 11).

Beim Fachwerkmodell ist die Neigung der Diagonalstäbe mit ca. $+45^\circ$ oder -45° jeweils so gewählt, dass die zur Aufnahme der Querkräfte notwendigen Diagonalstäbe immer nur auf Druck beansprucht sind. Damit zeigen sie die Tragwirkung des Betons. Dementsprechend sind die Fachwerkstäbe in Querrichtung wie die Bügel eines Stahlbetonbalkens immer nur auf Zug beansprucht. Auch hier lassen sich die numerischen Werte durch klickfreies Bewegen des Mauszeigers über den gezeichneten Fachwerkstäben anzeigen.

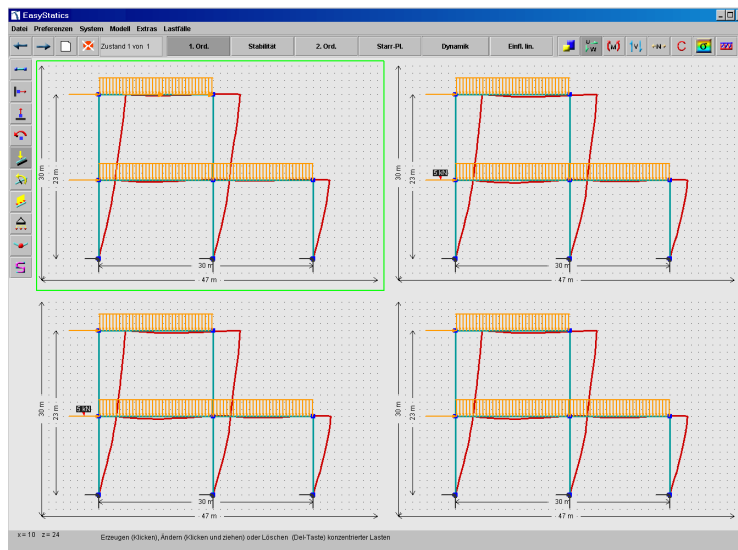
Abb. 11: Fachwerkmodell eines Stahlbetonbalkens



11 Modell kopieren

Bis zu vier Kopien des aktuellen Modells können gleichzeitig auf dem Bildschirm dargestellt werden. Dazu klickt man im Menü *Modell > Kopieren* (siehe Abb. 12). Jede Kopie kann unabhängig von den anderen bearbeitet werden. So wird der Einfluss von strukturellen Änderungen in nebeneinander gezeichneten Modellen visualisiert. Aktiviert man den Vergleichmodus, so gilt dieser für alle Modelle. Durch einen Klick auf ein bestimmtes Modell wird dieses durch eine grüne Umrandung gekennzeichnet und kann weiter modifiziert werden. Mit dem Menüeintrag *Modell > Nur 1. Modell* kehrt man zum einzigen links oben gezeigten Modell zurück.





Abb. 12: Vier Kopien eines Modells



12 Berechnungszustände

Bei jeder Berechnung können verschiedene, nacheinander erzeugte Berechnungszustände definiert und gespeichert werden. Mit einem Klick auf eine der in Tab. 4 gezeigten Zustandsschaltflächen werden innerhalb einer *EasyStatics*-Datei solche momentanen Berechnungszustände neu erzeugt oder gelöscht. Der Benutzer kann dann zwischen den einzelnen Zuständen hin- und herwechseln.

Tab. 4: Zustand-Schaltflächen

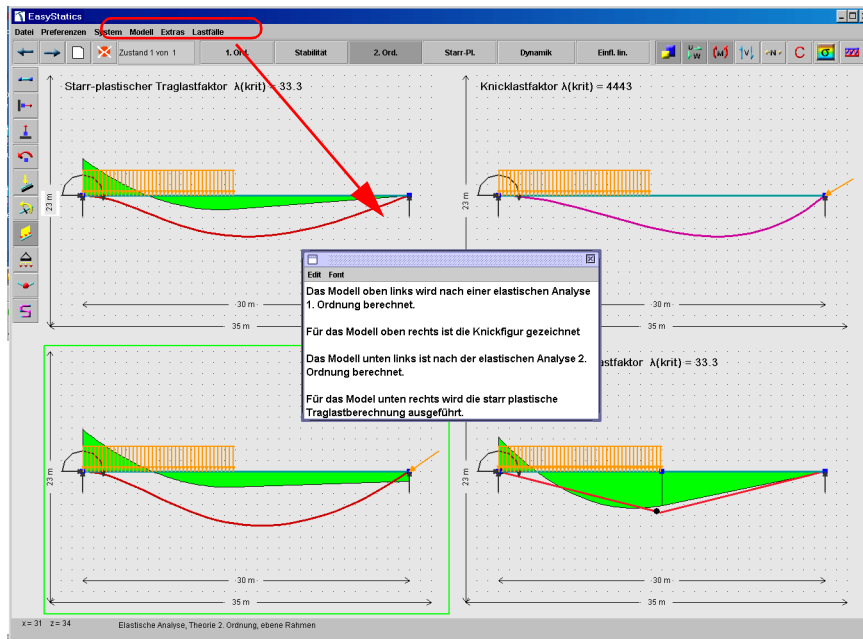
Schaltfläche	Zustandssteuerung
	Neuen Zustand erzeugen
	Aktuellen Zustand löschen
	Zum vorherigen Zustand wechseln
	Zum nächsten Zustand wechseln

13 Extras

13.1 Kommentare hinzufügen

Will man den aktuellen Zustand einer Berechnung mit beliebigen Kommentaren versehen, so wählt man den Menüeintrag *Extras > Kommentar*. Damit erscheint ein entsprechendes Editorfenster, in dem ein beliebiger Text in verschiedenen frei wählbaren Formaten und Farben geschrieben werden kann. Die so erzeugten Kommentare werden in der *EasyStatics*-Datei mit abgespeichert.

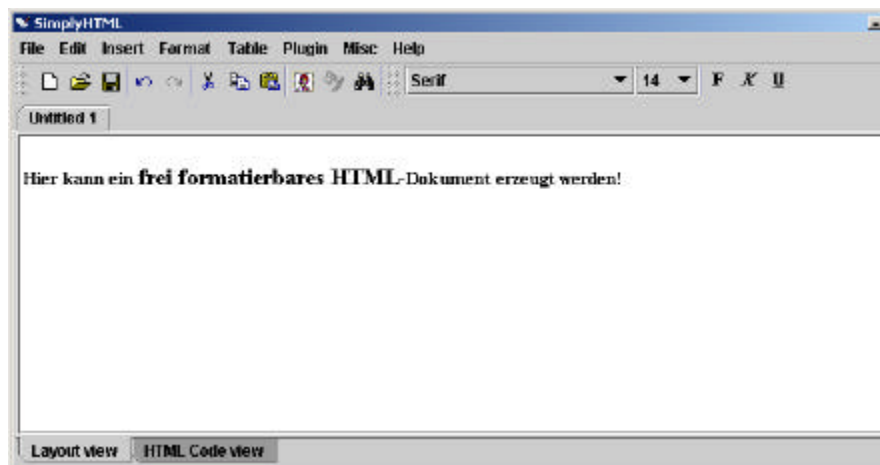
Abb. 13: Schreiben von Kommentaren im Editor



13.2 Erzeugung von HTML-Dateien

Es besteht die Möglichkeit, von *EasyStatics* aus HTML-Dateien bestehend aus Text und Bildern zu erzeugen und sie extern zu speichern, so dass man sie später drucken oder weiter verarbeiten kann (z.B. kann das HTML-Dokument in ein MS-Word Dokument umgewandelt werden).

Abb. 14: Schreiben von Kommentaren im Editor





Klickt man auf *Extras > HTML Dokument erstellen* so wird der in das Programm integrierte HTML-Editor *SimplyHTML* gestartet. Dieser erlaubt es, Texte im HTML Format zu schreiben und mit *EasyStatics* erzeugte Bilder oder sonstige Bilder einzubinden. Der Editor arbeitet wie ein externes Programm, das heisst, die damit erzeugten HTML-Dateien müssen unabhängig von den *EasyStatics* Dateien lokal gespeichert werden.

Lokal gespeicherte Bilder (siehe Abschnitt 3.3) können in das HTML-Dokument eingebunden werden. Diese werden dabei automatisch in den Ordner *images* kopiert, der sich wiederum im Ordner des HTML-Dokuments befindet. (Z. B.: Das Dokument *Uebung1.html* liege im Verzeichnis *ErsteUebung*. Die Bilder, die in *Uebung1.html* eingebettet wurden, werden im Verzeichnis *ErsteUebung/images* gespeichert).

Eine detaillierte Benutzeranleitung von *SimplyHTML* findet sich unter <http://www.lightdev.com>

13.3 EasyStatics Webseite

Der Menüpunkt *Extras > Webseite* bietet eine Verknüpfung zum *EasyStatics*-Webportal www.easystatics.ethz.ch.

13.4 Beispiele

Über das Internetportal www.easystatics.ethz.ch haben auch nicht eingeschriebene Benutzer auf der Seite *Gäste* die Möglichkeit, sich einige Beispiel-Dateien herunterzuladen oder direkt über *EasyStatics* zu starten.