

STATISCHE BERECHNUNG

NEUBAU STADTHALLE
TUTTLINGEN

hier

DRUCKSTREBE HOLZDECK
UNTERSUCHUNG DES MONTAGESTOSSES

Auftraggeber :

Metallbau Fa. Oschwald GmbH
Industriestraße 2
Tel.: 07575 / 9225-0

88605 Meßkirch
Fax : 07575 / 9225-15

Statik :

Dipl.-Ing. Marc Quint VDI
Kaiserstraße 85
Tel.: 07121 / 339245

72764 Reutlingen
Fax: 07121 / 339123

Stand :

Februar 2002

System

Als Grundlage für die vorliegende Berechnung dienen die CAD-Angaben die ebenfalls der Erstellung des Planes 106/4 WERKSTATTZEICHNUNG HOLZDECK zugrunde liegen.

Diese wurden im 3D entsprechend extrudiert und zu Volumenkörpern erweitert (s. Bild 1) .

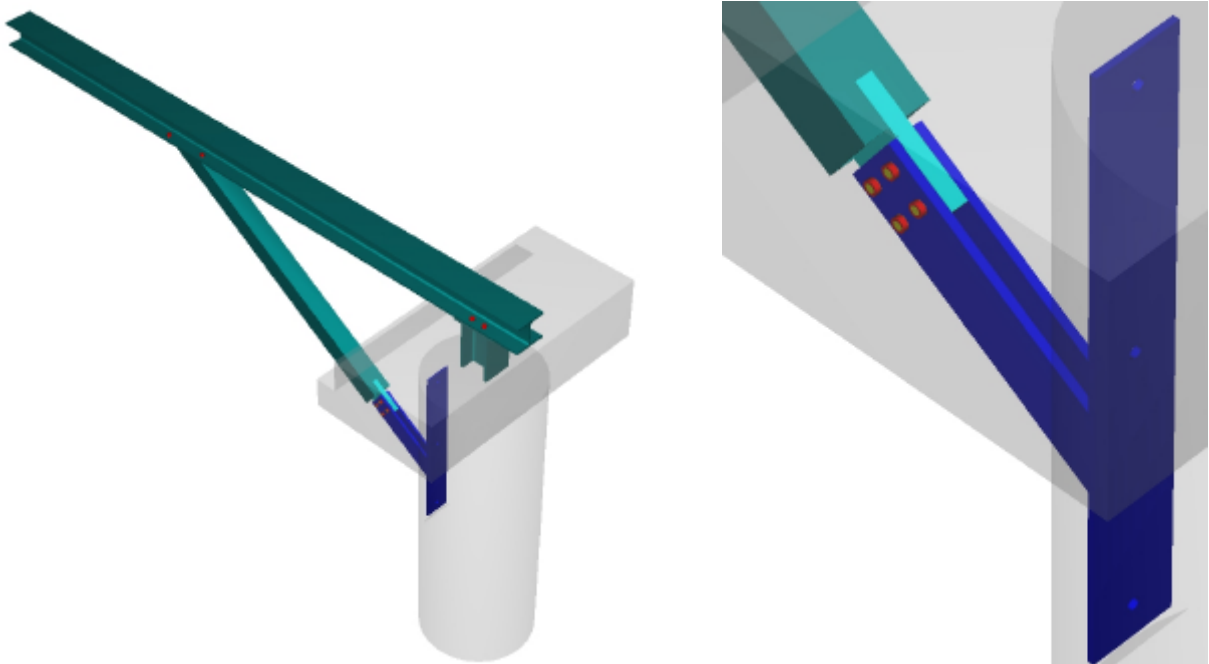


Bild 1 : 3D-CAD Modell der Struktur entwickelt aus dem 2D-Konstruktionsplan mit Detailausschnitt des Stoßes

Über die Exportfunktion des CAD-Programms MegaCAD wurden diese Körper als ACIS-Körper an den Pre- und Postprozessor FEMAP zur Vernetzung und weiteren Bearbeitung übertragen.

Die so erhaltene Geometrie repräsentiert die Lage und Größe der Komponenten als präzise Soll-Konstruktion.

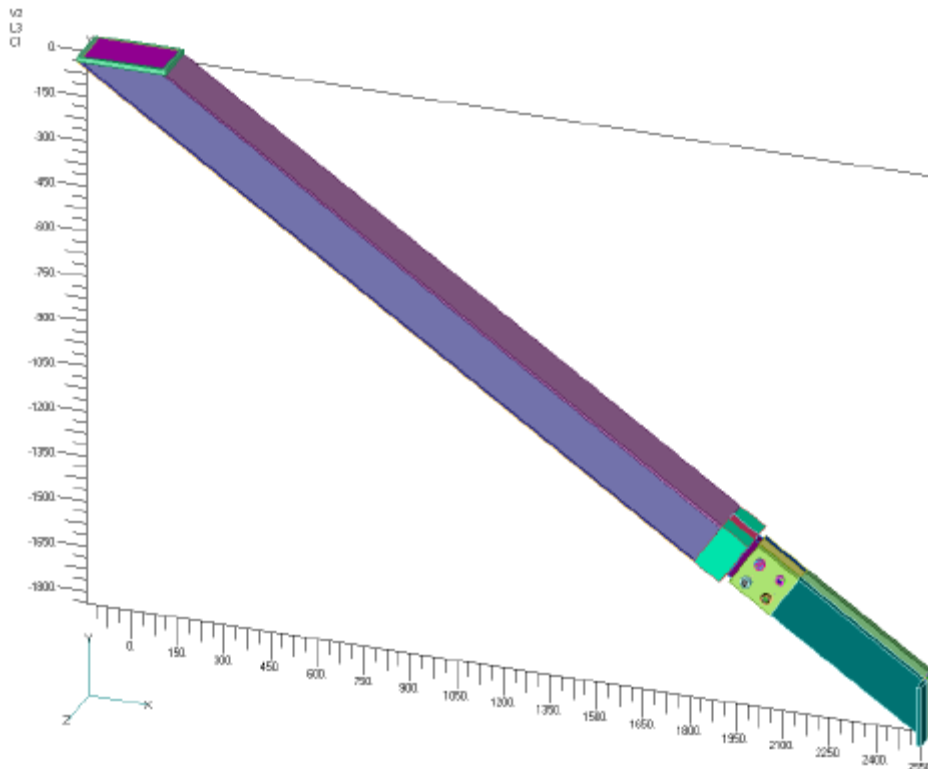


Bild 2 : ACIS-Körper nach Übertragung in den Pre- und Postprozessor FEMAP

Der Abstand von ½ mm um die Schraubenschäfte in den Bohrlöchern herum sowie der Abstand von 1mm zwischen den Blechen mit t=20mm und dem Blech mit t=40mm blieben somit erhalten.

Diese Geometrie wurde nun als reines Hexaeder-Netz vernetzt. Nur in einzelnen Stellen blieben geometriebedingt einige wenige Pentaeder übrig.

Material

Für die Bauteile in Schwarzstahl (Kopfplatte, Strebe MSH160x8.0, BL40) wurden gem. DIN 18800 die um 10% verringerten Festigkeitswerte für ST37-2 bzw. S235JR verwendet. Die Edelstahlteile der Bleche wurden mit Werten für einen Edelstahl 1.4571 Festigkeitsklasse 235 ebenfalls um 10% verringert angesetzt. Die Schrauben der Güte 8.8 wurden vereinfacht mit denselben Festigkeiten wie der Schwarzstahl berücksichtigt. Eine genauere Betrachtung der Beanspruchung der Schrauben der Mindestgüte 8.8 sowie der Lochrandspannungen in den Blechen sind nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung, da diese - wie bereits gezeigt - weit unter den zulässigen Werten liegen. Als Einheitensystem für alle Eingaben wurden [N] und [mm] verwendet.

Auszug aus dem Listing des Pre- und Postprozessor-Programms FEMAP :

Material 1 - Stahl ST37-2 red.

Type	ISOTROPIC	Color 104	Layer 1	#Prop 1	Density 7850.	Damping 0.	Ref Temp 0.
STIFFNESS	E 190909.		G 73636.	Nu 0.3			
STRENGTH	Tension 2400.		Compress 2400.	Shear 1380.56			
THERMAL	Alpha 0.000012		K 0.	SpecHeat 0.	HtGen 0.		
OPTICAL	Front Off		Reverse Off				

Material 2 - Edelstahl 1.4571 red.

Type	ISOTROPIC	Color 104	Layer 1	#Prop 1	Density 7850.	Damping 0.	Ref Temp 0.
STIFFNESS	E 154545.		G 59454.	Nu 0.3			
STRENGTH	Tension 2000.		Compress 2000.	Shear 1150.5			
THERMAL	Alpha 0.000012		K 0.	SpecHeat 0.	HtGen 0.		
OPTICAL	Front Off		Reverse Off				

Material 3 - Schrauben 8.8 red.

Type	ISOTROPIC	Color 104	Layer 21	#Prop 1	Density 0.	Damping 0.	Ref Temp 0.
STIFFNESS	E 190909.		G 73636.	Nu 0.3			
STRENGTH	Tension 6400.		Compress 6400.	Shear 3695.			
THERMAL	Alpha 0.000012		K 0.	SpecHeat 0.	HtGen 0.		
OPTICAL	Front Off		Reverse Off				

Elementeigenschaften / Properties und Diskretisierung

Im folgenden sind die Elementeigenschaften samt der Definition der GAP-Elemente für die Kontaktbedingungen angegeben. Im wesentlichen handelt es sich für alle volumenbehafteten Bauteile um isotropische Solid-Elemente mit i.d.R. 8 Knoten.

Die Kopfplatte oben besteht aus 10x10 Elementen über die Fläche und 2 Elementen über die Dicke. Sie wurde unter Vernachlässigung der Bohrlöcher modelliert, um die Eintragung der Vertikallast und die Verdrehsteifigkeit (Wölbfeder) für das Hohlprofil der Druckstrebe abzubilden.

Die Druckstrebe wurde aufgrund ihres Querschnitts und der Beanspruchung nur mit einem Element über die Querschnittsdicke und je 10 Elementen pro Kante diskretisiert.

Das Blech mit Dicke t=40mm hat 4 Elemente über die Dicke und die seitlich angeschlossenen Bleche mit t=20mm jeweils 3 Elemente über die Dicke. Eine zu erwartende Biegetragwirkung der Bleche kann somit hinreichend genau wiedergegeben werden.

Die Fußplatte wurde als BL20 mit Abmessungen 200x193 mm abgebildet und mittels 10x16 Elementen in der Fläche und 3 Elementen in der Dicke diskretisiert.

Auszug aus dem Listing des Pre- und Postprozessor-Programms FEMAP :

Property 1 - Baustahl ST37-2

Type SOLID Color 110 Layer 1 CoordSys 0 #Elem 3852
Material 1 Integration Net 0 Material Aligned to Coordinate System

Property 2 - Edelstahl V4A

Type SOLID Color 110 Layer 1 CoordSys 0 #Elem 4344
Material 2 Integration Net 0 Material Aligned to Coordinate System

Property 3 - Schrauben 8.8

Type SOLID Color 20494 Layer 21 CoordSys 0 #Elem 1312
Material 3 Integration Net 0 Material Aligned to Coordinate System

Property 4 - GAP BL20-BL40

Type GAP Color 19 Layer 109 CoordSys 0 #Elem 940
Compression 1000000. Tension 100. Transverse 0.
Y Friction 0. Z Friction 0.
Initial Gap 0. Preload 0.
NAS Max Pen 0.02 Max Adjust 0. Min Pen Rat 0.
Interface X 0. Y 0. Z 0.
IF Width 0.

Property 5 - GAP BL20/40-Kopf

Type GAP Color 24 Layer 99 CoordSys 0 #Elem 96
Compression 1000000. Tension 100. Transverse 0.
Y Friction 0. Z Friction 0.
Initial Gap 0. Preload 0.
NAS Max Pen 0.02 Max Adjust 0. Min Pen Rat 0.
Interface X 0. Y 0. Z 0.
IF Width 0.

Property 6 - GAP BL20/40-Schaft

Type GAP Color 24 Layer 99 CoordSys 0 #Elem 624
Compression 1000000. Tension 100. Transverse 0.
Y Friction 0. Z Friction 0.
Initial Gap 0.5 Preload 0.
NAS Max Pen 0.02 Max Adjust 0. Min Pen Rat 0.
Interface X 0. Y 0. Z 0.
IF Width 0.

Da die Bolzen M20 8.8 in der Sollage präzise in Bohrlochmitte liegen, wurde der Initial-Abstand der GAP-Elemente entsprechend mit $\frac{1}{2}$ mm berücksichtigt. Der Abstand der restlichen GAP-Elemente die den Kontakt sowohl von Schraubenkopf zu den BL20 sowie den Kontakt zwischen den BL20 und den BL40 abbilden wurde mit 0 mm angesetzt. Dies soll dem Umstand Rechnung tragen, dass die Schrauben zwar planmäßig mit 0,5 Fv vorgespannt wurden und die Bleche „knirsch“ anliegen aber die Vorspannung selbst unberücksichtigt bleibt. Das Abbilden der Vorspannung ist nur mit großem Aufwand als Vorlaufberechnung zu gewährleisten und ist wie später gezeigt wird für das maßgebliche Tragverhalten und den Nachweis der ausreichenden Tragsicherheit nicht erforderlich.

Die GAP-Elemente für die anschließende nichtlineare Berechnung im Penalty-Verfahren mit dem Programm NASTRAN V70.7 erhalten den beschriebenen Anfangsabstand und eine hohe Steifigkeit im geschlossenen Zustand ('Compression' = 1000 kN/mm) zur Übertragung der Kontaktkräfte. Der Wert wurde iterativ durch wiederholtes Verändern und Kontrolle der Penetration bzw. Konvergenz im Rechenverfahren bestimmt. Zur numerischen Stabilität wurde für der Wert unter Zug für das Öffnen mit 100 N/mm angesetzt. Wie man an den Ergebnissen sieht, hat dies keine wesentlichen Auswirkungen auf die Ergebnisse, beschleunigt jedoch die Konvergenz der Ergebnisse bei der Ermittlung der Versagenslast und der Spannungen unter Bemessungslast erheblich.

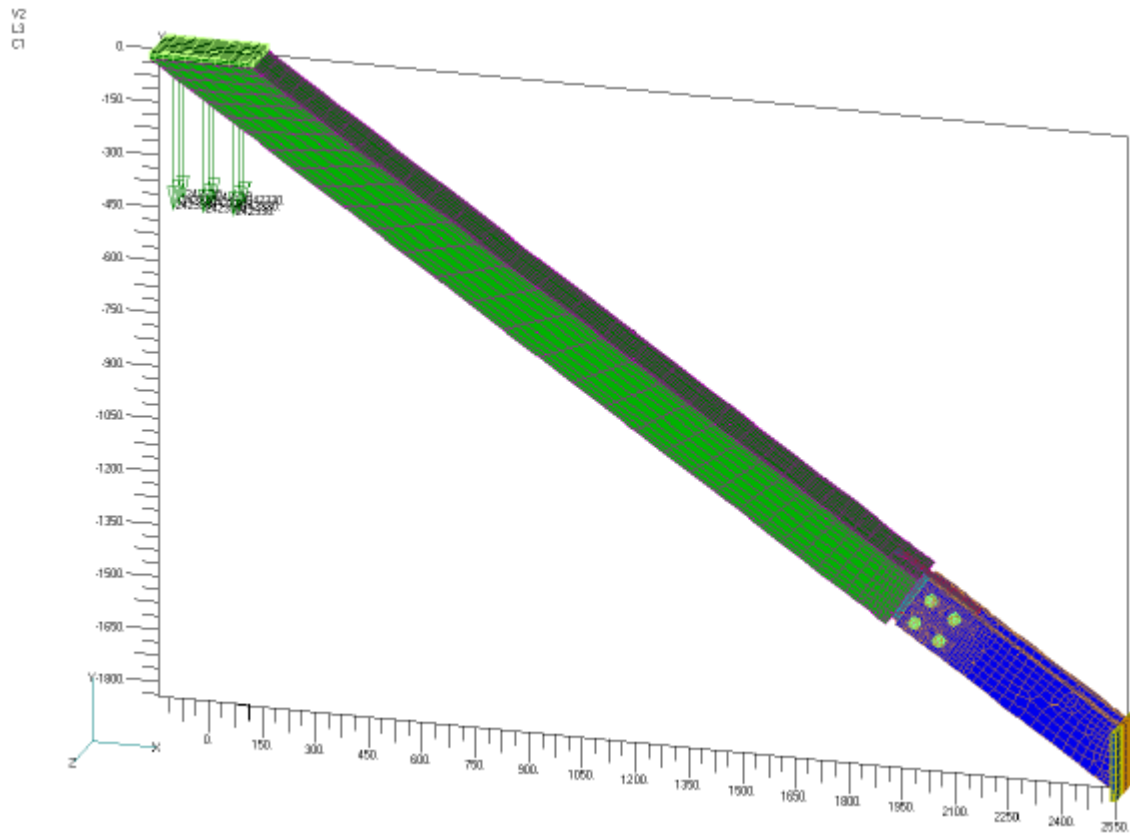


Bild 3 : Gesamtsystem (11176 Elemente, 14641 Knoten)

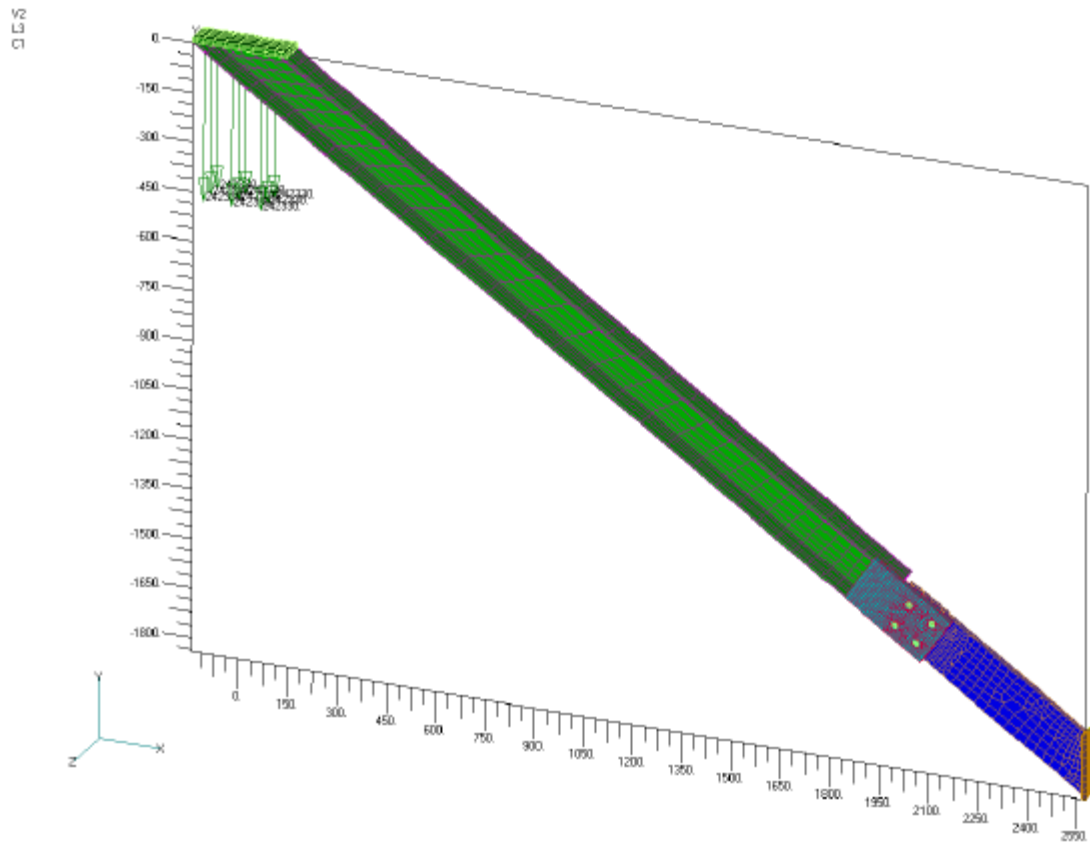


Bild 4 : Gesamtsystem -aufgeschnitten

Um diese Zusammenhänge besser zu erkennen wurde in Bild 5 das gesamte System längs durchgeschnitten und in Bild 6 der Bereich einer Schraube mit BL40, BL20 und nur BL20 dargestellt. Mit der so realisierten Modellierung können sich in der anschließenden Berechnung die Kräfte der Druckstrebe über den Schraubkontakt am Schaft über die Bolzen hin zu den Edelstahlblechen der Fußplatten-Konsole übertragen und gleichzeitig ein Spreizen bzw. gegenseitiges „Abdrücken“ der Querschnittsteile durch das Auseinanderfallen der Querschnittsachsen einstellen. Zur einfacheren Modellierung haben die Schraubenköpfe einen Abstand von 0,5 mm im Modell aber ebenfalls einen Anfangsabstand von 0 mm rechnerisch. So können die Schrauben zwar Druckkräfte über die Berührungsfuge zu den Blechen übertragen, jedoch keine Zugkräfte.

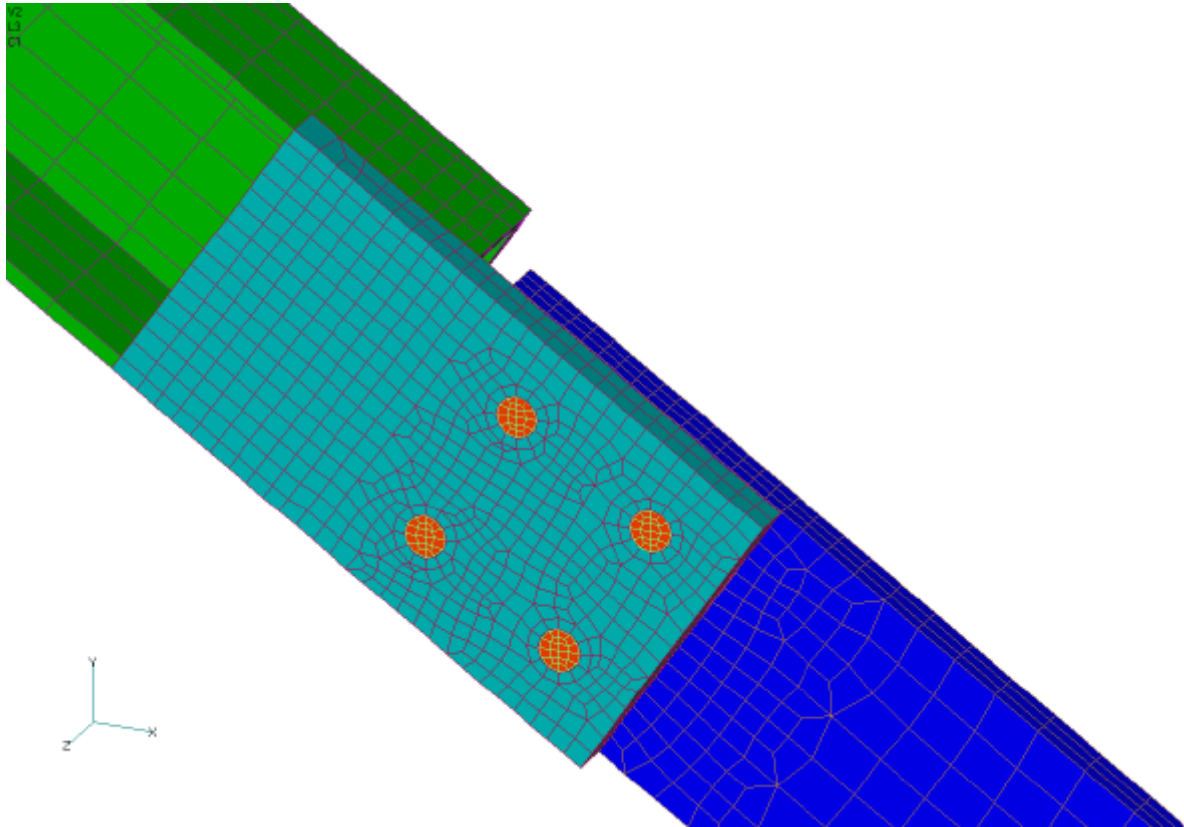


Bild 5 : Detail Schraubstoß –aufgeschnitten

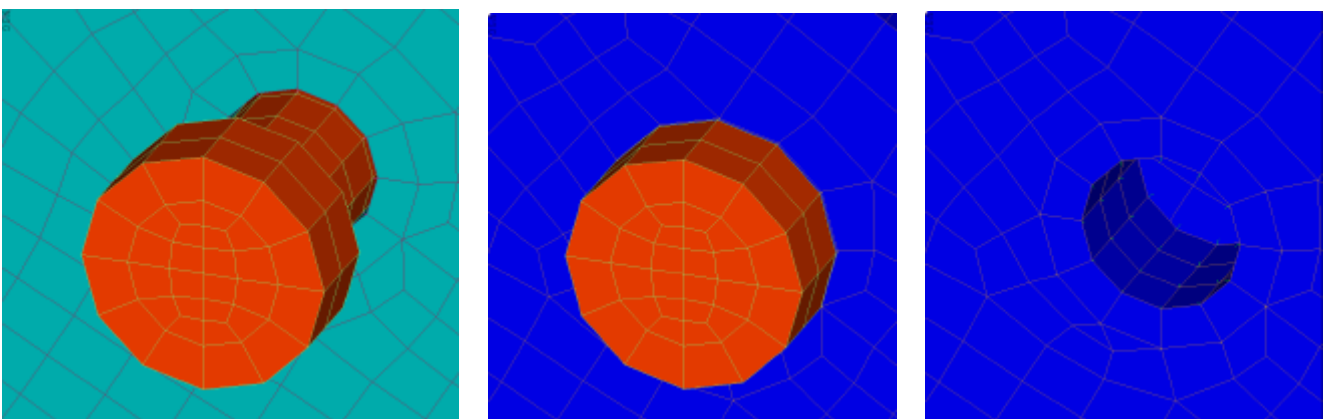


Bild 6 : Schraube mit Diskretisierung und BL40, BL20 und nur BL20

Die Diskretisierung ist im allgemeinen für die später ermittelten Verformungen und Spannungen ausreichend fein gewählt. Eine Übertragung von lokalen Einflüssen sowie der Möglichkeit Biegespannungen zu repräsentieren ist ausreichend gegeben.

Lagerungsbedingungen und Lasten

Zur Berücksichtigung der Lagerung der Bauteile werden die Knoten an der Oberseite der Kopfplatte sowohl in x- als auch in z-Richtung festgehalten. Somit ist eine Senkung in Lastrichtung (y-Richtung) und eine Verdrehung um die x- und z-Achse möglich (siehe auch verformtes System unter Last). Dies stellt eine gute Näherung der Befestigung der Strebe über diese Kopfplatte mit dem Riegel aus einem HE220B und rechtwinklig hierzu angeordneten HE160B zur Auflagerung der Holzroste dar.

Die Fußplatte, die einen Ausschnitt der real viel längeren Fußplatte idealisiert wiedergibt, wird in allen drei Hauptachsrichtungen festgehalten. Obwohl ein Ablösen unter Verdrehung der „Schwerter“ möglich wäre, wird später gezeigt, daß aufgrund der hohen Druckbeanspruchung der Lagerfuge mit ca. 360 kN die geringfügigen Biegemomenteneinflüsse überdrückt werden und somit eine Berücksichtigung als Kontaktfläche analog zu den Blech-Blech Bereichen der Gesamtstruktur entfallen kann. Für die „Schwerter“ stellt dies eine Einspannung am Fußpunkt dar.

Es sei noch angemerkt, daß zur Verhinderung der Drehung der Schrauben um ihre jeweilige Längsachse (innere Kinematik) eine Behinderung der Verdrehung mittels Kopplung zweier Knoten in der Schraubenkopffläche zum Mittelpunkt (MPC - Multi Point Constraints bzw. RBE2 – Rigid Body Elements) und Behinderung der Verdrehung dieses Zentralknotens realisiert wurde. Ein Einfluß auf die Rechenergebnisse wird nicht beobachtet, wie man unschwer an den symmetrischen Anfangsgrößen erkennen kann. Diese müßten ansonsten durch die unsymmetrische Randbedingung gestört werden.

Da es sich bei der maßgeblichen Beanspruchung um die Berücksichtigung mehrerer ungünstiger Einwirkungen handelt, werden diese im folgenden auf Grundlage der Angaben der Büros Breinlinger bzw. Zoller nochmals zur Ermittlung der Bemessungslast als Vertikallast aufgeführt :

aus Eigengewicht $V_g = 24,2 \text{ kN}$ -Gebrauchslast

aus Verkehr $p=5 \text{ kN/m}^2$ $V_p = 130,5 \text{ kN}$ -Gebrauchslast

aus Schnee $s=0,95 \text{ kN/m}^2$ $V_s = 24,8 \text{ kN}$ -Gebrauchslast

Hiermit ergibt sich die Bemessungslast zu $V_d = 1,35 \times (24,2 + 130,5 + 24,8) = 242,33 \text{ kN}$ ($\rightarrow D = 431 \text{ kN}$)

Die Kombination $1,35 \times V_g + 1,5 \times V_p$ liefert nur $228,42 \text{ kN}$ und ist nicht maßgebend.

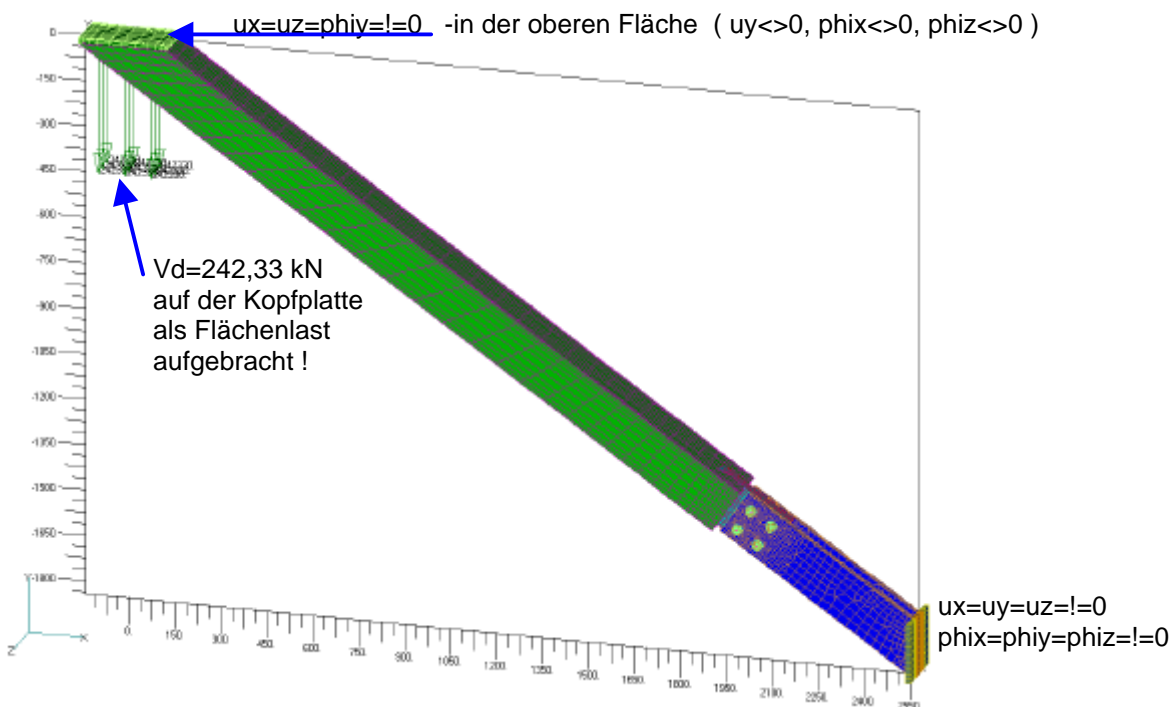


Bild 7 : Lagerungsbedingungen und Belastung

Ermittlung des niedrigsten Eigenwertes (Versagenslast) mit Eigenform

Zur Ermittlung der niedrigsten Versagenslast mit Eigenform des beschriebenen Systems wird das Programm NASTRAN V70.7 benutzt. Dies ist in der Lage eine nichtlineare statische Berechnung des Gesamtsystems unter Berücksichtigung der bereits beschriebenen Kontaktbedingungen (GAP-Elementen im Penalty-Verfahren) gemäß Theorie II. bzw. III. Ordnung (LGDISP) durchzuführen.

Programmtechnisch wird zur Suche der Verzweigungs- bzw. Versagenslast eine Last vorgeben die oberhalb der gesuchten liegt und man sich iterativ der Lösung (singuläre Gesamtsteifigkeitsmatrix) nähert indem man die Last „langsam anfährt“. Der Berechnungsalgorithmus geht dabei so vor, daß bei Erreichen einer divergenten Lösung der letzte Lastschritt geteilt wird (Bisection) und sich die Lösung allmählich der gesuchten Verzweigungslast annähert.

Die Bemessungslast von 242,33 kN wird im vorliegenden Fall 4-fach gesteigert ($V=4 \times 242,33=969,32\text{kN}$) als Vorgabelast berücksichtigt bzw. aufgebracht. Im Rechenlauf hat nun das Programm einen kritischen Lastfaktor von 0,701875 ermittelt, womit sich die Versagenslast zu $0,701875 \times 969,32 = 680,34\text{ kN}$ ermittelt.

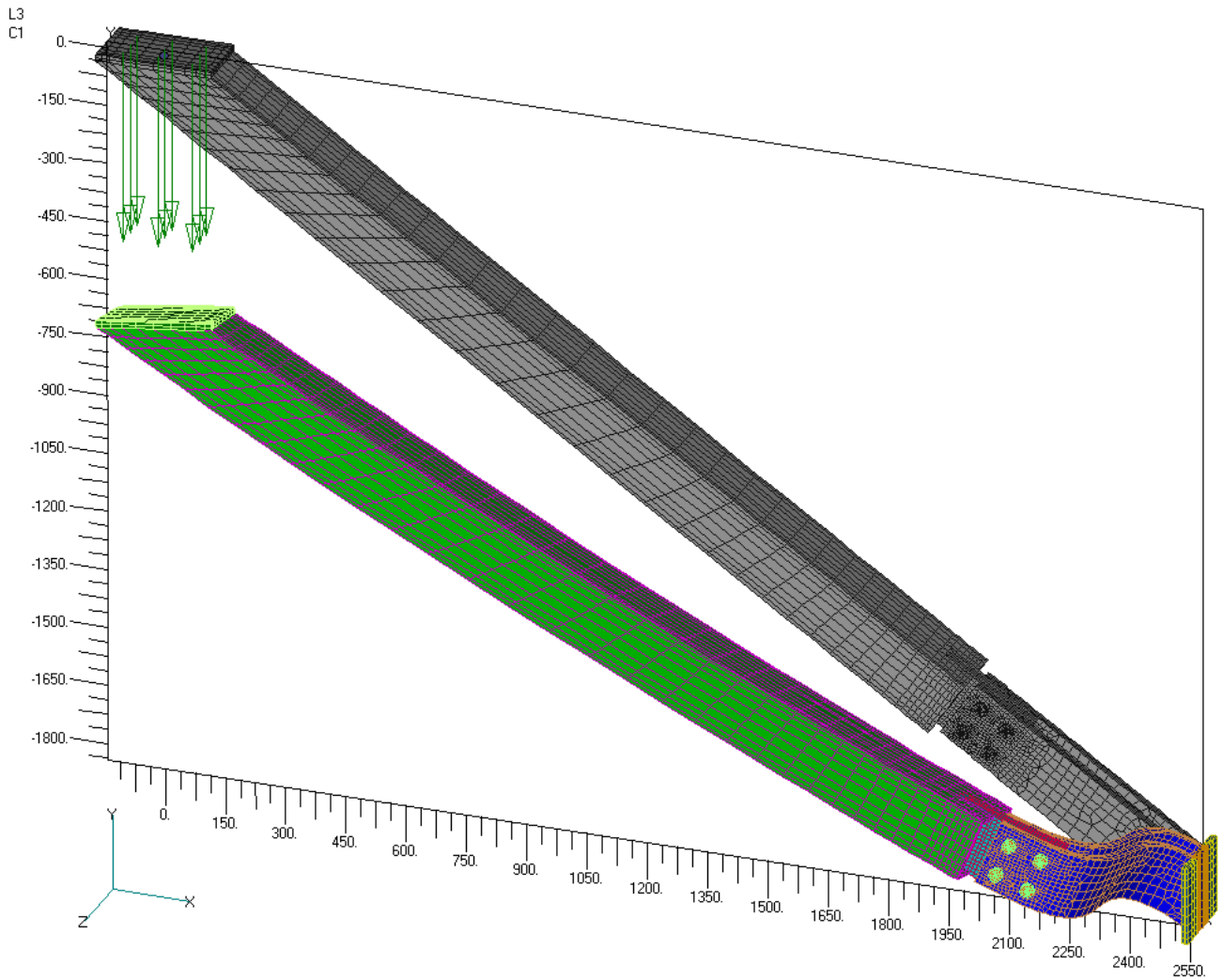
Dies ist die letzte konvergente Laststufe unter der sich bei Berücksichtigung ideeller elastischer Querschnittswerte ein Gleichgewicht erzielen läßt. Die zugehörige Verformungsfigur wurde entsprechend abgespeichert.

Ausschnitt aus der Ergebnisdatei (*.F06) zur Suche der Versagenslast :

```
FEBRUARY 15, 2002 MSC.NASTRAN 3/14/00 PAGE 459
NON - LINEAR ITERATION MODULE OUTPUT
STIFFNESS UPDATE TIME 36.31 SECONDS SUBCASE 1
ITERATION TIME 2.93 SECONDS LOAD FACTOR 0.7018750
- - - CONVERGENCE FACTORS - - - - - LINE SEARCH DATA - - -
ITERATION EUI EPI EWI LAMBDA DLMAG FACTOR E-FIRST E-FINAL NQNV NLS ENIC NDV MDV
23 1.8050E-04 8.2866E-02 2.2095E-07 1.0000E-01 4.0576E-02 1.0000E+00 3.5918E-01 3.5918E-01 0 0 0 0 1
24 3.8716E-04 1.2121E-01 5.2173E-07 7.8137E-01 4.7082E-02 1.0000E+00 3.4400E-01 3.4400E-01 1 0 0 0 1
25 1.1270E-03 1.4249E-01 1.6584E-06 9.7682E-01 5.5307E-02 2.0000E+00 5.9171E-01 1.8341E-01 2 1 21 0 1
*** USER INFORMATION MESSAGE 6194 (NCONVG)
*** STOPPED ITERATIONS DUE TO REACHING MAXIMUM ITERATION LIMIT WITHOUT CONVERGENCE ***
*** USER INFORMATION MESSAGE 6193 (NCONVG)
*** MAXIMUM NUMBER OF BISECTIONS OR MINIMUM LOAD STEP HAS BEEN REACHED.
*** USER INFORMATION MESSAGE 6189 (NCONVG)
*** REPEAT ITERATION, STOPPING AT LOWEST ERROR
23 1.8050E-04 8.2866E-02 2.2095E-07 1.0000E-01 4.0576E-02 1.0000E+00 3.5918E-01 3.5918E-01 0 0 0 0 1
*** USER INFORMATION MESSAGE 6189 (NCONVG)
*** BEST ATTAINABLE SOLUTION HAS BEEN FOUND ***
SUBID 1 LOOPID 93 LOAD STEP 0.702 LOAD FACTOR 0.70187500
*** USER INFORMATION MESSAGE 4550 (NLITER)
*** NEW STIFFNESS MATRIX IS REQUIRED BY GAP FOR PENALTY VALUE ADJUSTMENT ***
PENALTY VALUES ARE ADJUSTED BY 1.000000D+00 FOR ELID = 4879
PENALTY VALUES ARE ADJUSTED BY 9.999999D-01 FOR ELID = 5269
PENALTY VALUES ARE ADJUSTED BY 1.000000D+00 FOR ELID = 5323
PENALTY VALUES ARE ADJUSTED BY 1.000000D+01 FOR ELID = 10873
*** USER INFORMATION MESSAGE 9005 (NLSTATIC)
^^^ THE SOLUTION FOR LOOPID= 93 IS SAVED FOR RESTART
```

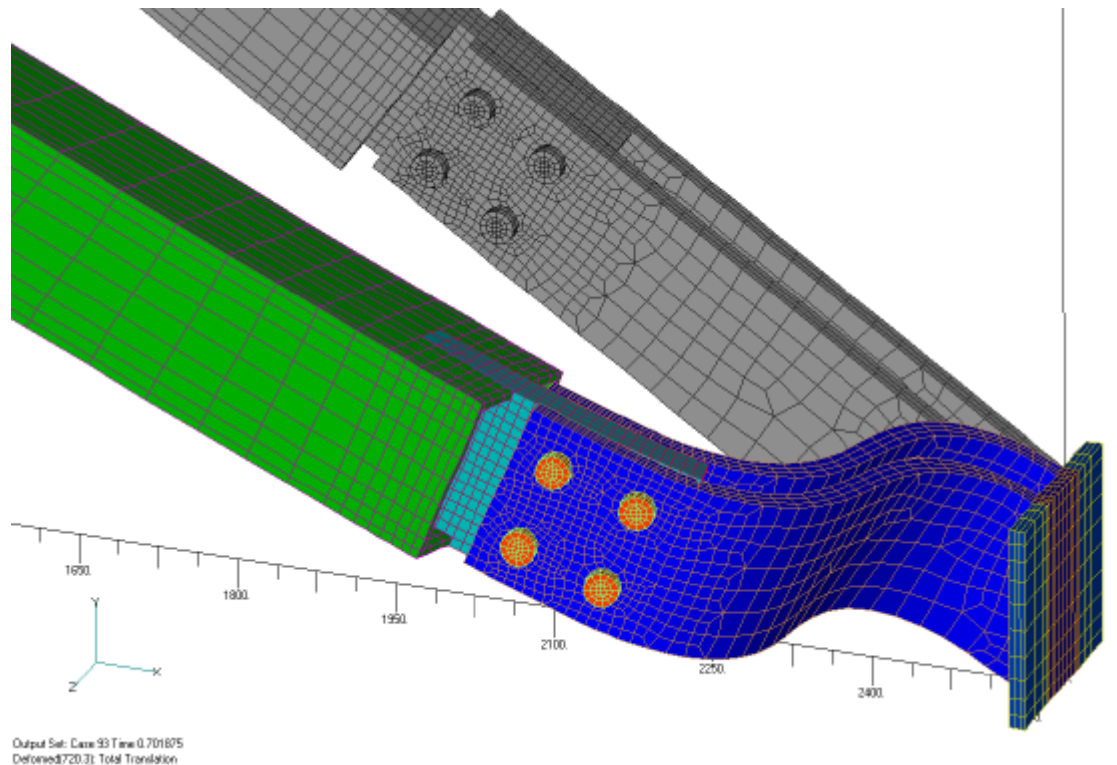
Da im folgenden das Bemessungskonzept Elastisch-Elastisch konsequent durchgeführt wird, wurde die Frage nach der Versagensform unter Berücksichtigung von Plastizieren nicht weiter verfolgt. Alle Grundlagen der DIN 18800 und der darin enthaltenen Angaben geben keinen Hinweis geschweige denn einen Anlaß über die durchgeführte Berechnung hinaus auch noch eine Streckgrenze und einen Sekantenmodul der Festigkeit in die Ermittlung der Eigenform bzw. Versagenslast einzuführen. Dies sollte im vorliegenden Fall ohnehin keine großen

Änderungen bedingen, da wie man in Bild 8 erkennen kann, ein laterales Ausweichen (z-Richtung) der Gesamtstruktur die zu erwartende maßgebliche Versagensform darstellt. Bild 9 zeigt den Ausschnitt der Fußplatte bis zum Schraubstoß. Dies ist der Bereich der das versagen offensichtlich auslöst. Die Starke Biegung (1-fach Überhöhung) macht deutlich, dass die Bleche seitlich ausweichen und das Hohlprofil des oberen Teile sich nahezu wie ein Starrkörper verhält und nicht dem Ausweichen der Bleche entgegenwirkt.



Output Set: Case 93 Time 0.701875
 Deformed(720.3): Total Translation

Bild 8 : Verformungsfigur bei Erreichen der Versagenslast ($V=680,34 \text{ kN}$)



Output Set: Case 93 Time 0.701875
 Deformed(720.3): Total Translation

Bild 9 : Detailausschnitt des Stoßbereiches (Verformungen 1-fach überhöht)

Imperfektionen

In Analogie zu DIN 18800 soll nun die ermittelte Eigenform skaliert als spannungslose Vorverformung berücksichtigt werden.

Hierzu werden die Knotenkoordinaten der Gesamtstruktur um einen Betrag derart räumlich verschoben, daß die maximale laterale Verformung (z-Richtung) der anzusetzenden Imperfektion nach DIN 18800 entspricht.

Bei dem vorliegenden System schließt dies „Stabkrümmungen“ oder „-verdrehungen“ bereits ein, da diese in der zu skalierenden Eigenform enthalten sind.

Da die Knicklänge s_k am vorliegenden System nicht trivial zu ermitteln ist, wird diese aus der Beziehung $P_{cri} = \pi^2 \times E \times I / s_k^2$ abgeleitet und ergibt sich zu $s_k = \text{SQRT} (\pi^2 \times E \times I / P_{cri})$.

P_{cri} ist bei einer Neigung der Druckstrebe von $34,2^\circ$ und der vertikalen Versagenslast $V_{cri}=680,34$ kN näherungsweise mit $P_{cri} = V_{cri} / \sin 34,2^\circ = 680,34 / \sin 34,2^\circ = 1210,39$ kN zu ermitteln.

In die Berechnung wurden zwei unterschiedliche E-Moduli eingeführt. Da aber das Versagen von den Edelstahl-Blechen ausgeht, wird mit dem kleineren der beiden E-Module (190.909 bzw. 154.545 N/mm²) gerechnet.

Als Trägheitsmoment ist hier ebenfalls das der beiden BL20 unter Berücksichtigung sowohl der Eigenträgheitsanteile sowie der Steiner-Anteile zu berücksichtigen. Dies begründet sich zum einen aus dem lateralen Ausweichen der Gesamtstruktur als Versagensursache sowie aus der Tatsache dass mit den Eigenträgheitsmomenten der Teilquerschnitte eine sehr kleine Knicklänge ermittelt wird.

Für die beiden Bleche ergibt sich $I = 2 \times b \times d^3 / 12 + b \times d \times e^2 = 2 \times 160 \times 20^3 / 12 + 160 \times 20 \times 62^2 = 213.333 + 12.300.800 = 12.514.133$ mm⁴.

Setzt man dies in die o.a. Bestimmungsgleichung ein erhält man die Knicklänge näherungsweise zu $s_k = \text{SQRT} (\pi^2 \times 154.545 \times 12.514.133 / 1.210.390) = \text{SQRT} (15.769.944) = 3972,7$ mm. Dies entspricht ungefähr der tatsächlichen Stablänge mit 3152mm in Stabachse gemessen. Für diese Versagensform (Ausweichen des Gesamtsystems) ist gem. DIN 18800 ein Maß von $v_o = s_k / 500 = 3972,7 / 500 = 7,945$ mm vorzusehen. Dieses ist beim Nachweis elastischer Spannungen (E-E) nochmals auf 2/3 zu verringern. Es ist somit eine seitliche Ausmitte von $v_{o,z} = 7,945 \times 2/3 = 5,297$ mm anzusetzen.

Bei der maximalen seitlichen Verformung von $v_z = 441,1$ mm (z-Richtung) bei Erreichen der Versagenslast ergibt sich ein Skalierungsfaktor von $f = 5,297 / 441,1 = 0,0120071$. In den Bildern 10 und 11 ist die vorverformte Lage zu sehen.

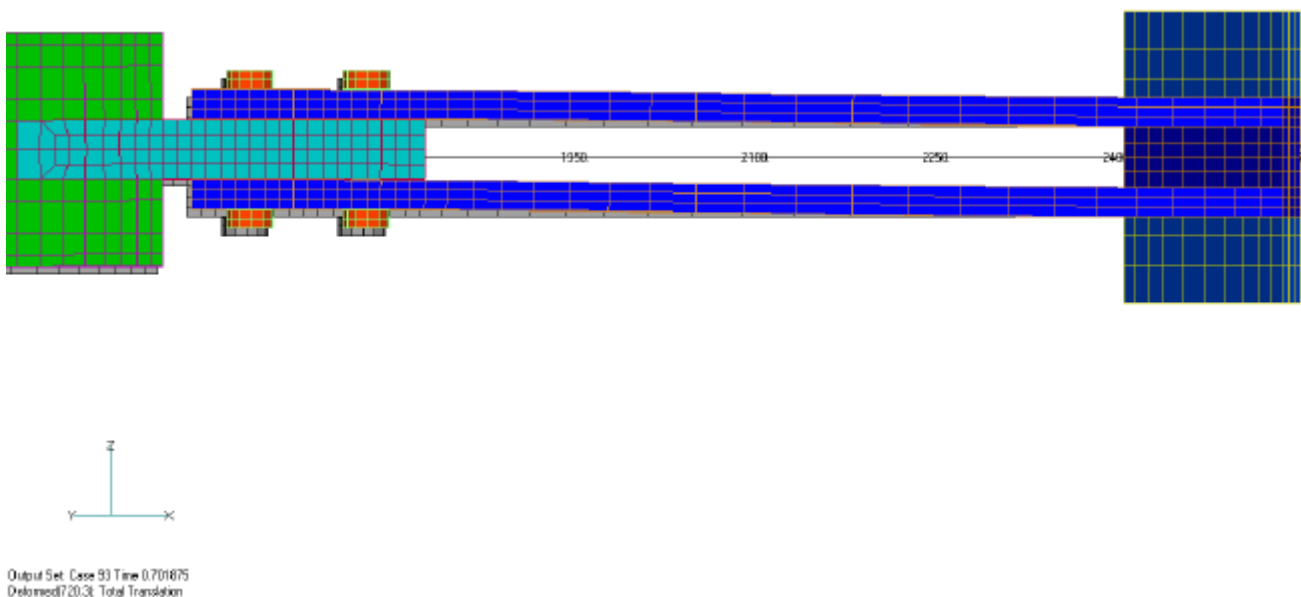


Bild 10 : Unverformte Lage (grau) und skalierte ($f=0,0120071$) Vorverformung

Als Anhalt für die Richtigkeit der Skalierung kann man erkennen, daß der Versatz in z-Richtung nahezu 1/3 der Blechdicke der BL20 beträgt. Dies entspricht 6,7mm und ist ca. 25% größer als die vorher ermittelte anzusetzende Imperfektion.

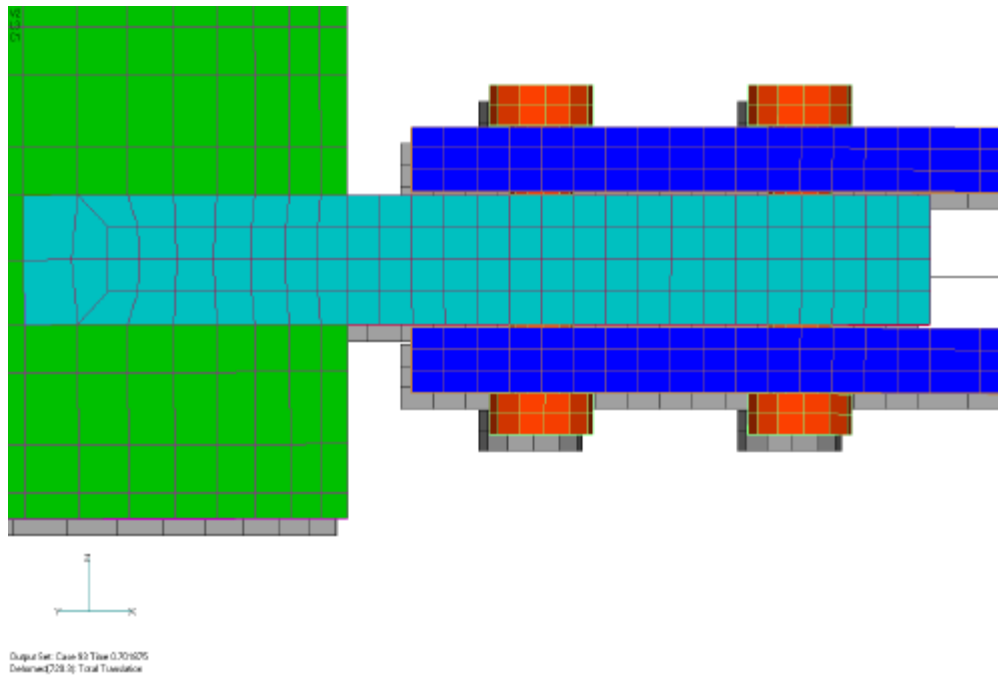


Bild 11 : Bereich des Schraubstoßes mit unverformter Lage und skaliertem Vorverformung

Würde man die Knicklänge vom Einzelversagen der BL20 ableiten, wäre näherungsweise das Eigenträgheitsmoment beider Bleche ohne Steiner-Anteile einzusetzen. Dies setzt ein gleichmäßiges Aufteilen der Druckkraft auf die beiden Querschnittsteile voraus, was sich allerdings bei Betrachtung der Versagensform voraussetzen läßt.

Es würde sich dann eine Knicklänge $s_k = \text{SQRT} (\text{Pi}^2 \times 154.545 \times 213.333 / 1.210.390) = \text{SQRT} (268.836) = 518,7\text{mm}$ ergeben. Hierfür wäre eine spannungslose Vorverformung von $v_o = s_k / 200 = 2,594\text{mm}$ maßgebend und könnte wieder für den Nachweis Elastisch-Elastisch mit 2/3 auf 1,729mm abgemindert werden. Man erkennt, daß dies zu wesentlich kleineren Zusatzbeanspruchungen führen würde und wird nicht weiter verfolgt.

Spannungsberechnung

In Bild 12 ist nun die bereits um die Vorverformung verschobene Ausgangsstruktur zu erkennen. Die verschobene Lage kann an der Lage der Bezugsebene (Linie mit Maßen) erkannt werden und entspricht der in der vorangegangenen Betrachtung.

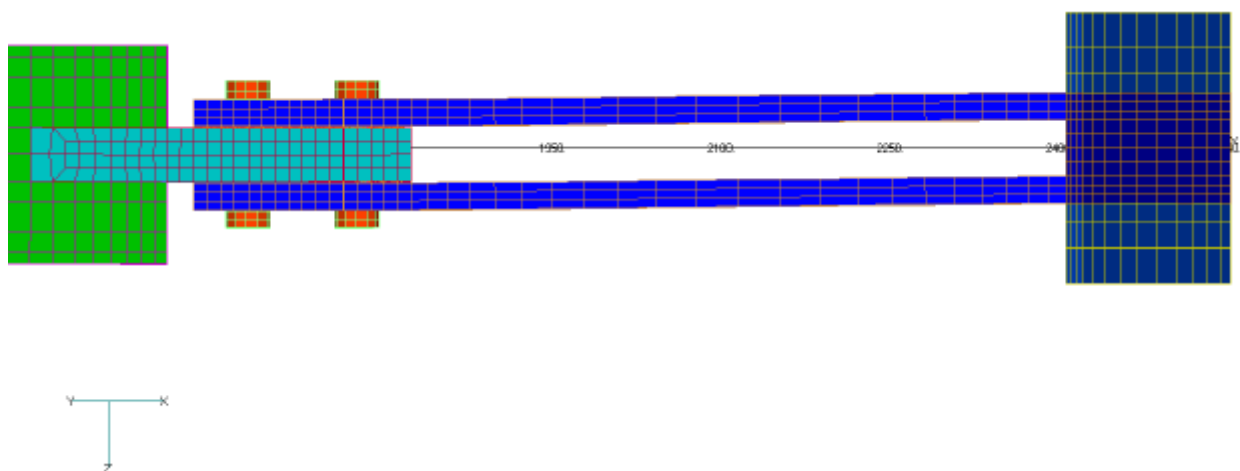


Bild 12 : Verformtes System als spannungslose Grundlage der Spannungsber. Theorie II. Ordnung

Auf dieses System wird nun die Bemessungslast von 242,33 kN als flächige Vertikallast aufgebracht und unter Berücksichtigung der Kontaktbedingungen werden die Verformungen und Spannungen bestimmt. Dies erfolgt wiederum als nichtlineare Berechnung Theorie II. bzw. III. Ordnung (LGDISP).

In Bild 13 ist die verformte Struktur in 25-facher Überhöhung dargestellt. Sie entspricht erwartungsgemäß der Form der vorgegebenen Imperfektion bzw. der zuvor ermittelten Versagensform.

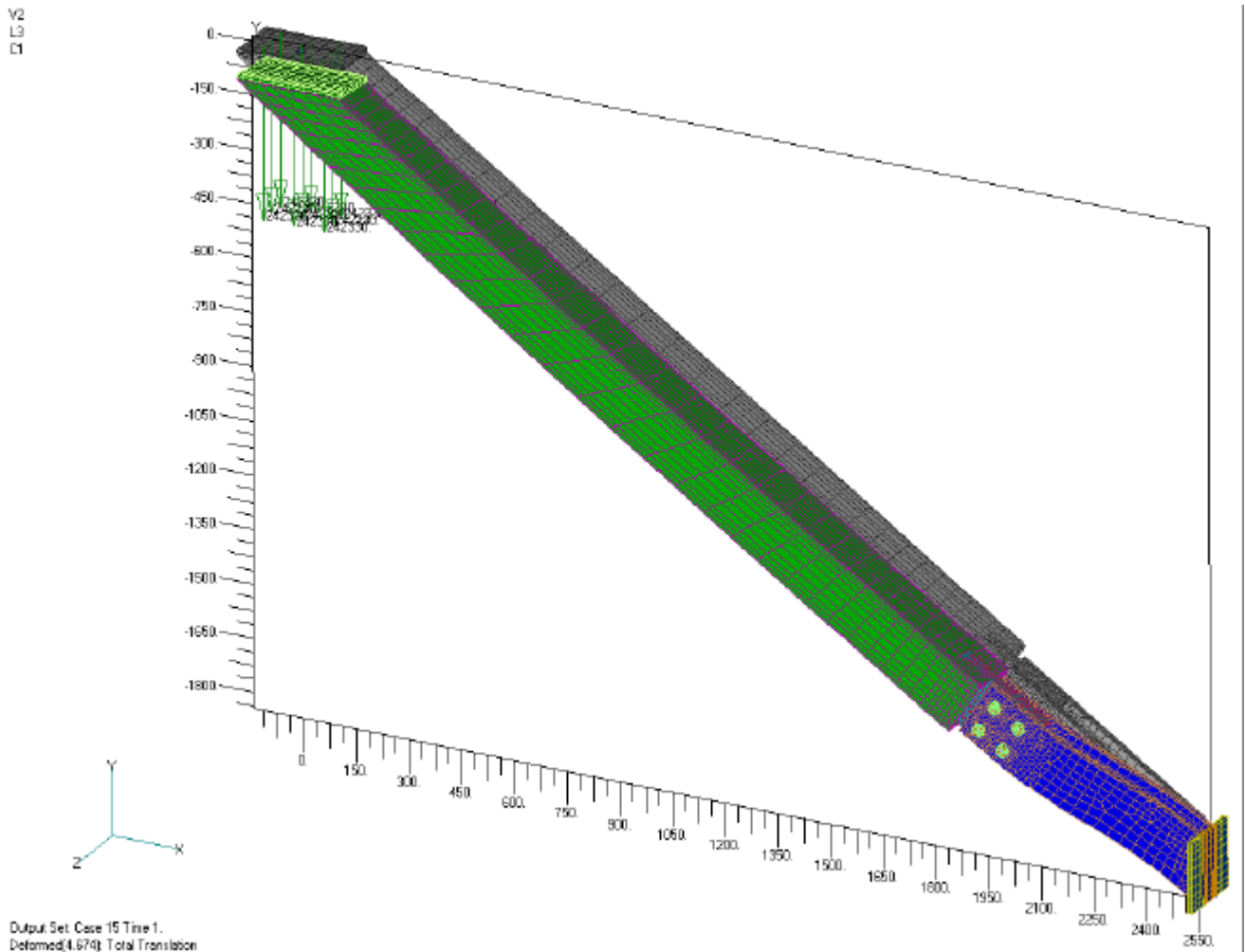


Bild 13 : Verformtes System (25-fach überhöht)

In Bild 14 sind die Auflagerkräfte in Horizontalrichtung (x-Richtung) dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, daß die gelben und roten Bereiche mit Zugkräften nur ganz klein und begrenzt auftreten. Die ist ausschließlich im Bereich der Zugseite der BL20 der Fall und würde selbst bei Lösen der Lagerungsbedingung $v_x \neq 0$ nur zu einer geringfügigen Umlagerung und Verformungszunahme führen.

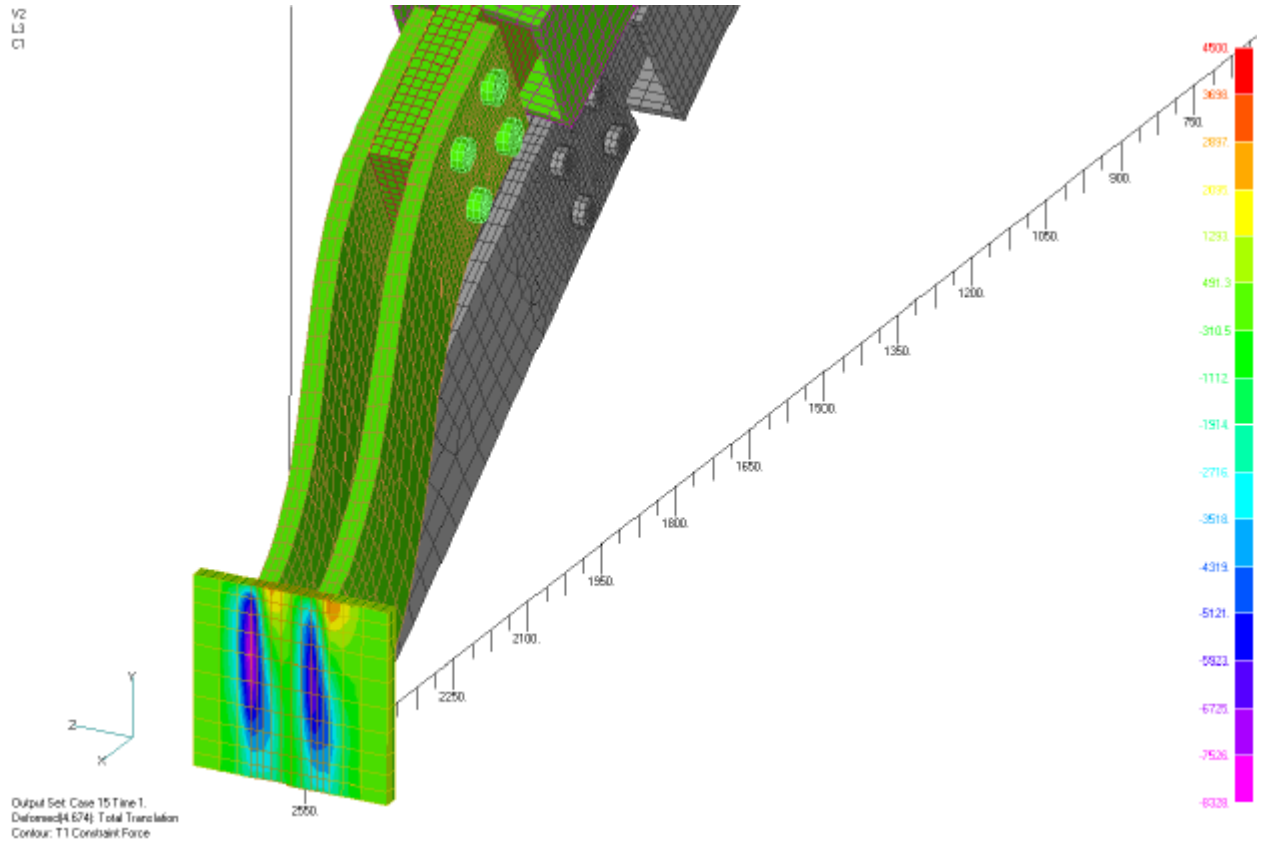


Bild 14 : Auflagerkomponente Px (Verformung 25-fach überhöht)

Die Spannungen wurden als ideal elastische Spannungen ohne Plastizieren ermittelt. In den folgenden Darstellungen wurde die Ausgabe als Vergleichsspannungen gemäß der Vergleichsspannungshypothese von Mises gewählt. Wie man deutlich erkennt, sind die derart ermittelten Spannungen, außer im Lochrandbereich bzw. den Schrauben, im elastischen Bereich unterhalb der abgeminderten Streckgrenze $f_{y,d}$ von $218,2 \text{ N/mm}^2$. Senkt man das Niveau der maximalen Spannungen auf z.B. $200 \text{ N/mm}^2 / 1,1 = 181,8 \text{ N/mm}^2$ ab, was einer Streckgrenze eines „sonstigen“ Materials der Festigkeitsklasse 235 entsprechen würde, sind nur geringfügige Bereiche höherer Spannungen erkennbar.

Die Bilder 17 bis 20 stellen die Edelstahlbleche mit den maßgeblichen Spannungen in allen Bereichen dar. Man kann bei der Darstellung bezogen auf das Spannungsniveau $181,8 \text{ N/mm}^2$ deutlich die Beanspruchungszonen erkennen.

Eine Umlagerung der sehr kleinen plastizierenden Bereiche in direkt angrenzende Nachbarbereiche scheint ohne weiteres möglich. Die Bereiche größter Spannungen liegen nicht im Bereich der Schweißnähte.

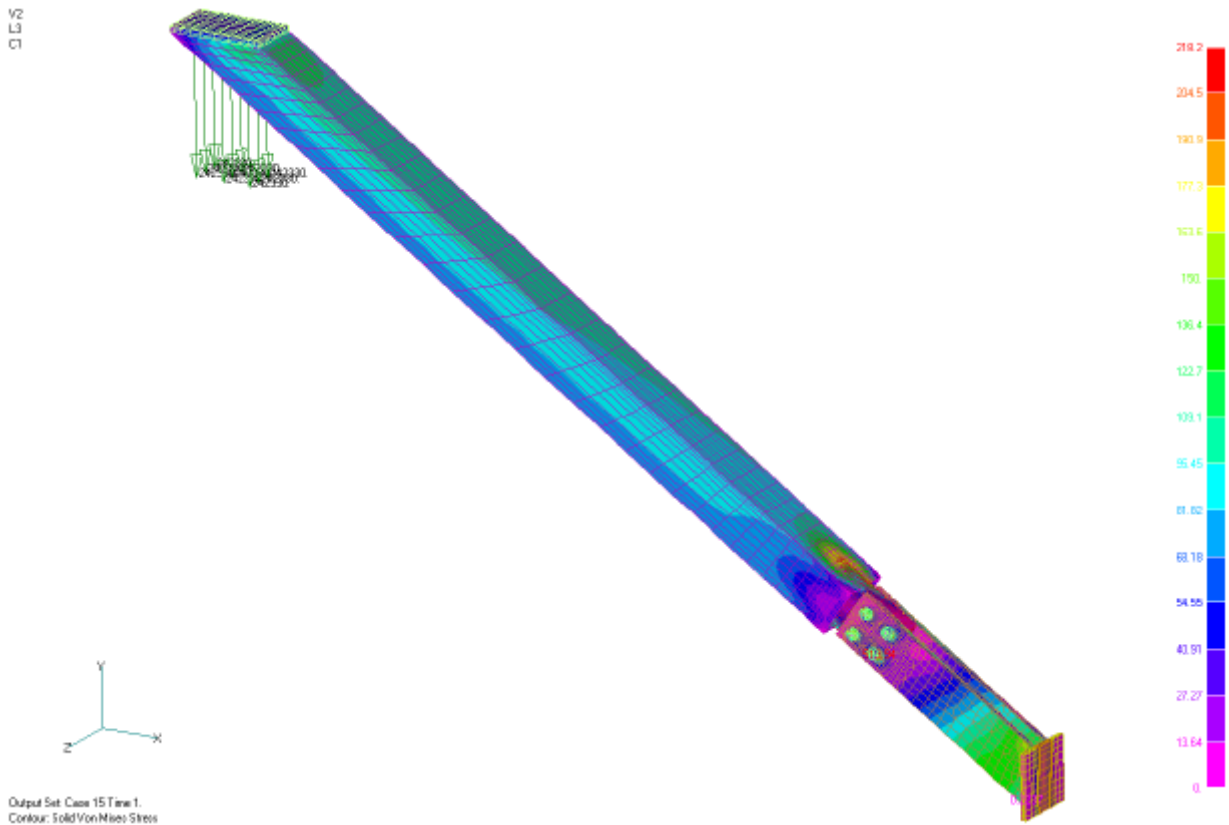


Bild 15 : Elastische Spannungen am vorverformten System unter $V=242,33$ kN

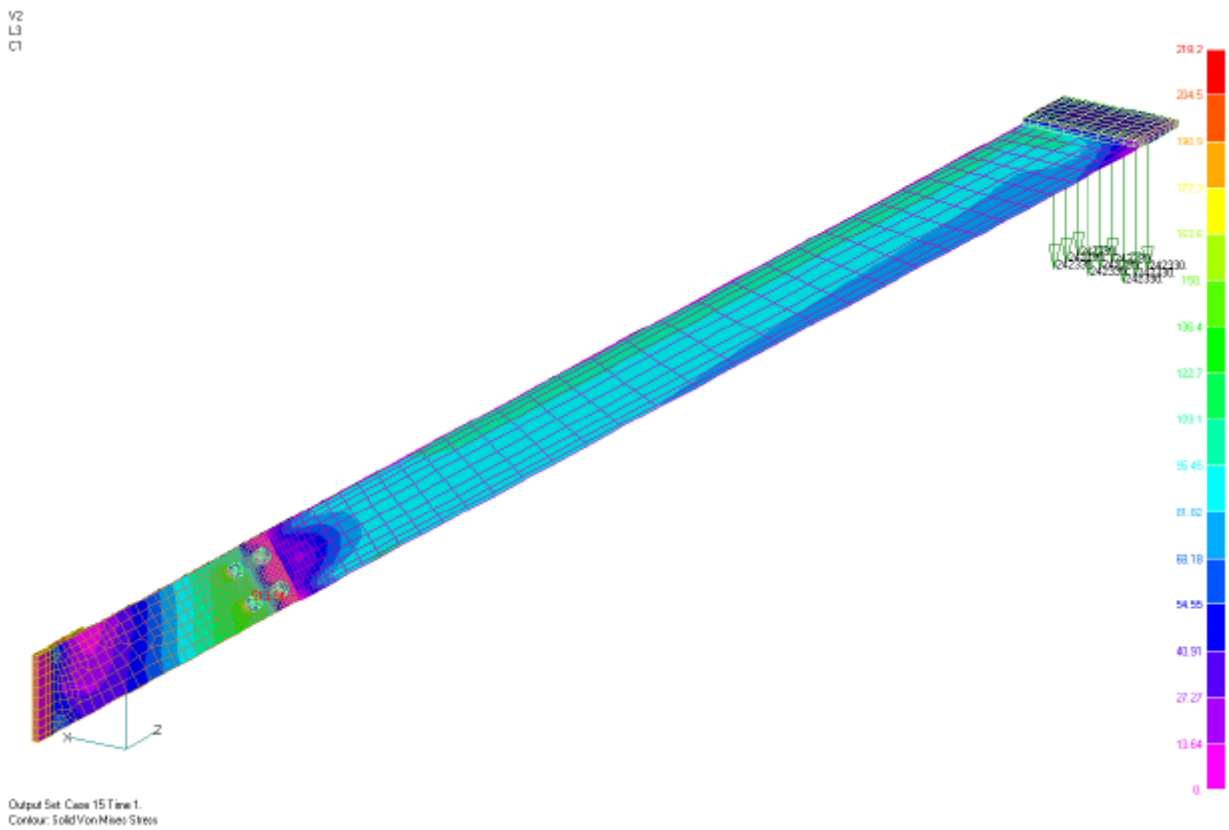


Bild 16 : Elastische Spannungen am vorverformten System unter $V=242,33$ kN

V2
L3
C1

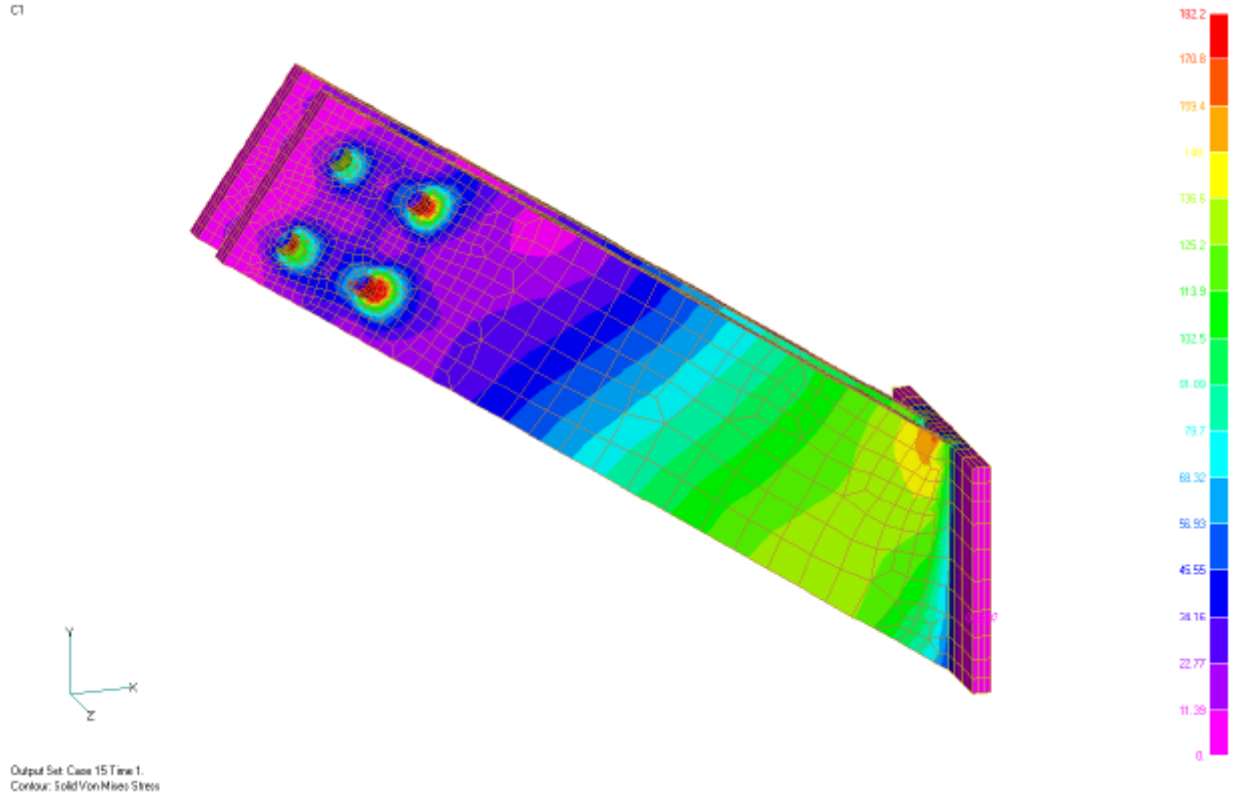


Bild 17 : Elastische Spannungen am „vorderen“ Edelstahlblech unter $V=242,3$ kN

V2
L3
C1

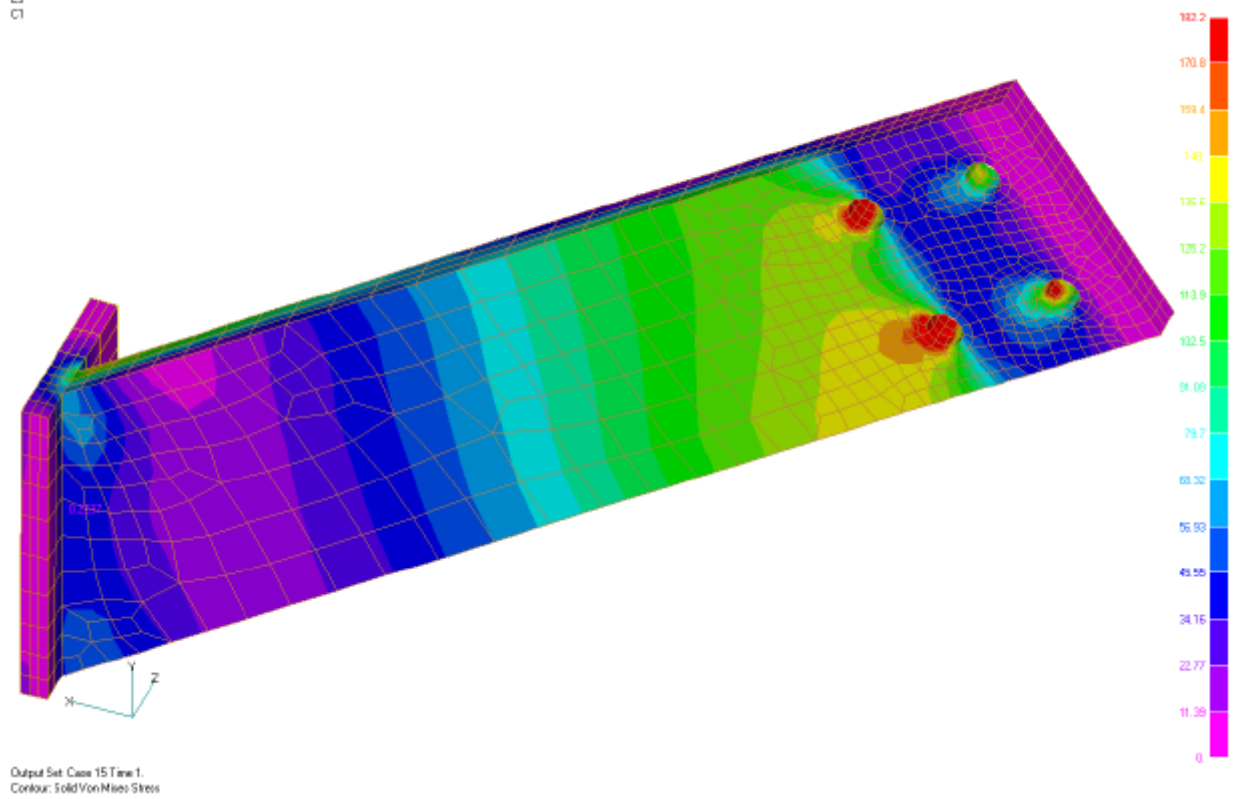


Bild 18 : Elastische Spannungen am „vorderen“ Edelstahlblech unter $V=242,3$ kN

V2
L3
C1

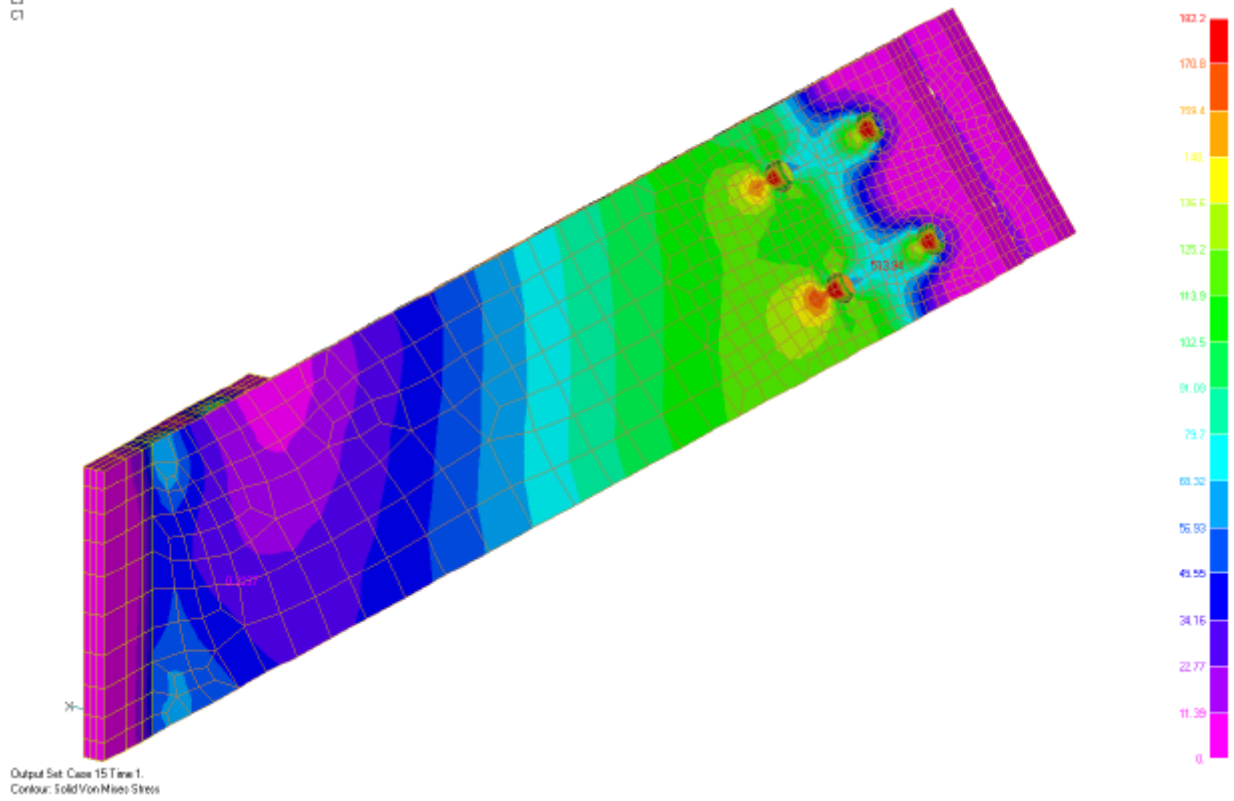


Bild 19 : Elastische Spannungen am „hinteren“ Edelstahlblech unter $V=242,3$ kN

V2
L3
C1

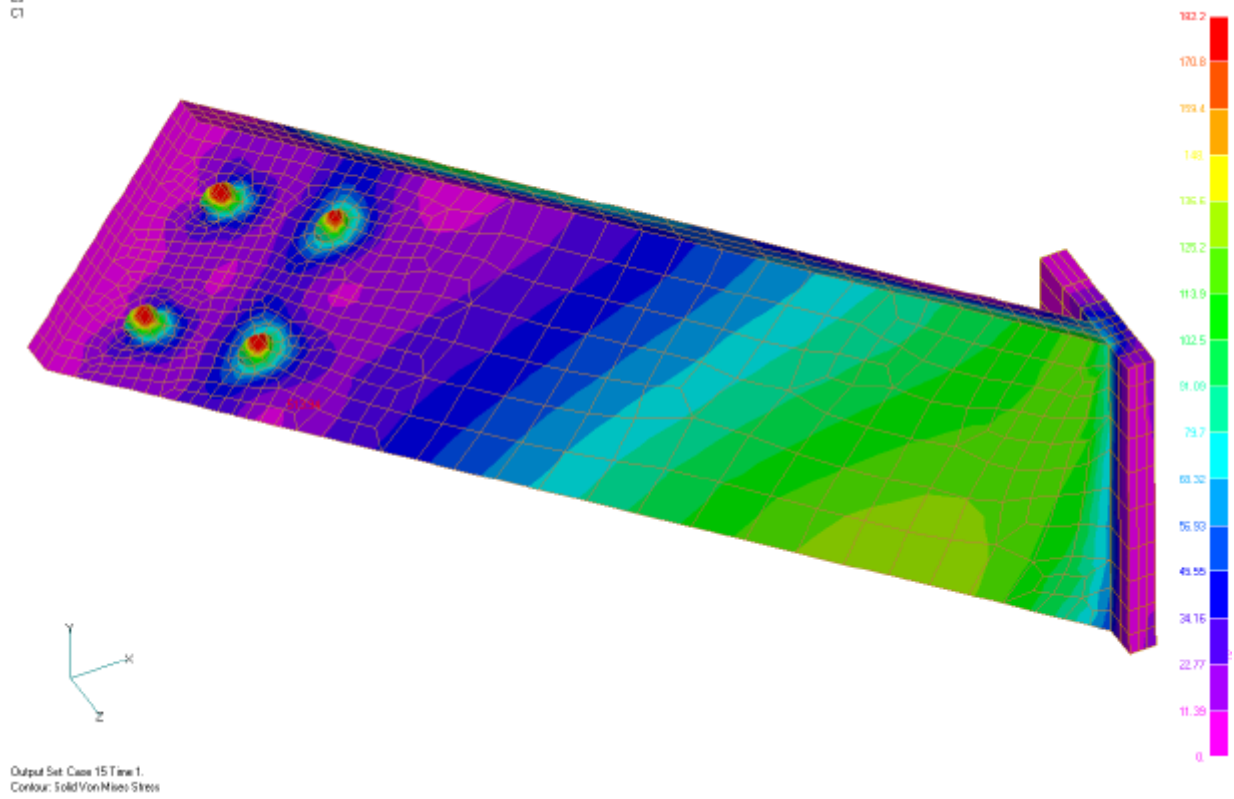


Bild 20 : Elastische Spannungen am „hinteren“ Edelstahlblech unter $V=242,3$ kN

Anhang A : Diskretisierung, Modellierung

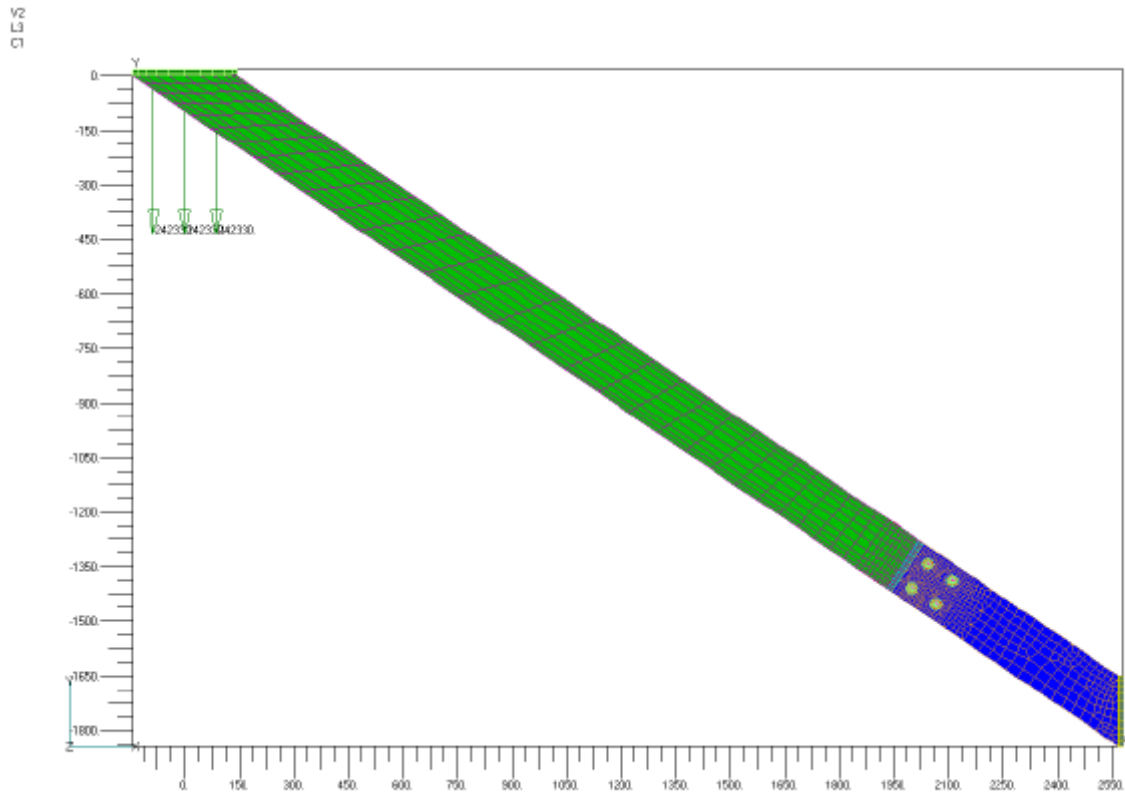


Bild A1 : Seitenansicht der Gesamtstruktur mit Diskretisierung

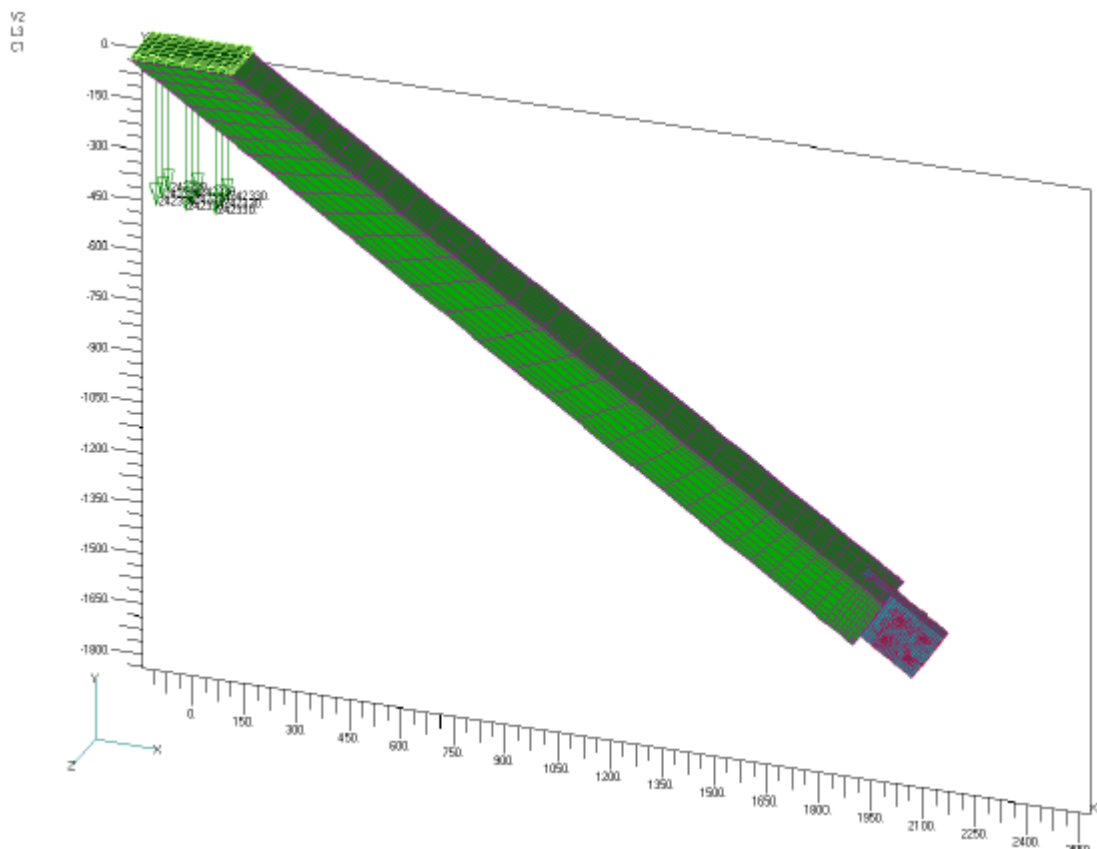


Bild A2 : Monolithisch zusammgef. Elemente der Druckstrebe mit Kopfplatte, Strebe MSH160x8.0 und BL40

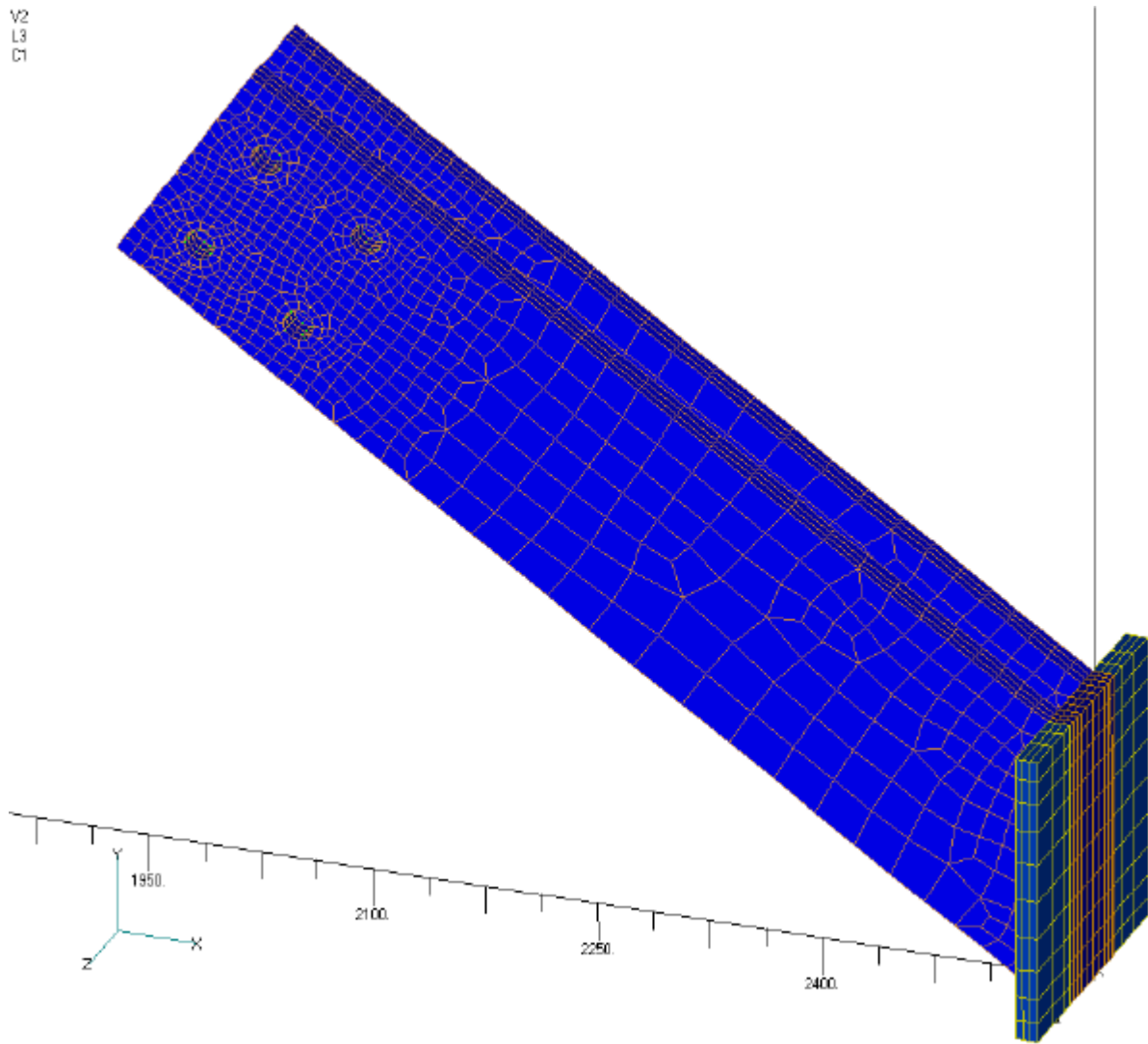


Bild A3 : Monolithisch zusammengef. Elemente der Fußplatte BL20 mit den „Schwertern“ BL 20

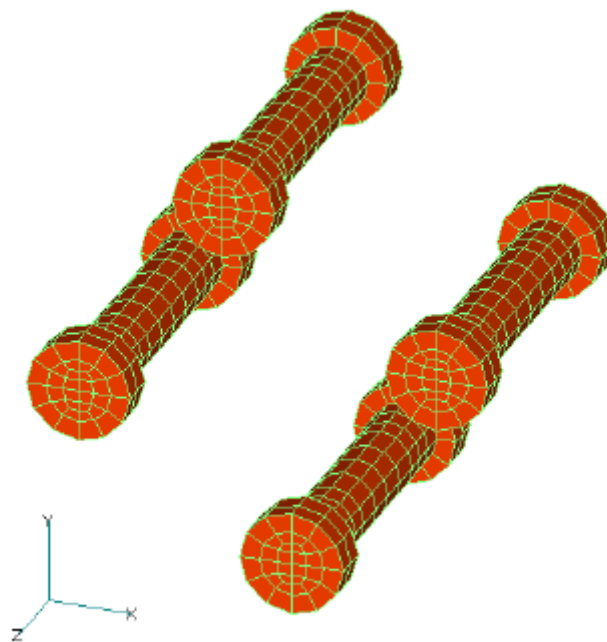
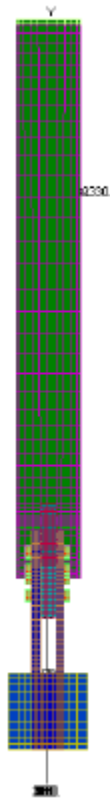
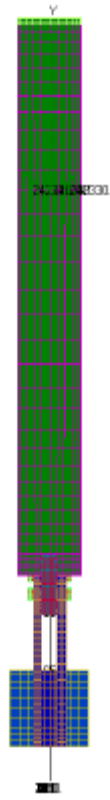


Bild A4 : Diskretisierung der Schrauben

CL 2

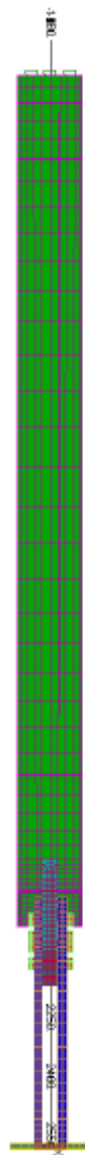


V2
L3
C1



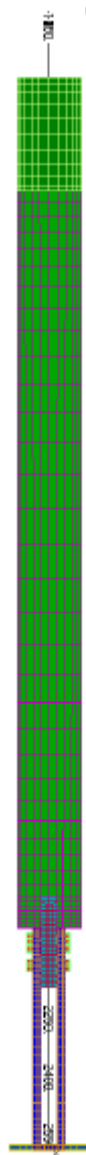
Y

2434124000



Y

10000



Y

10000

Bild A5 : Ansichten der Gesamtstruktur in den Hauptachrichtungen

Anhang B : Verformungsfigur unter Versagenslast

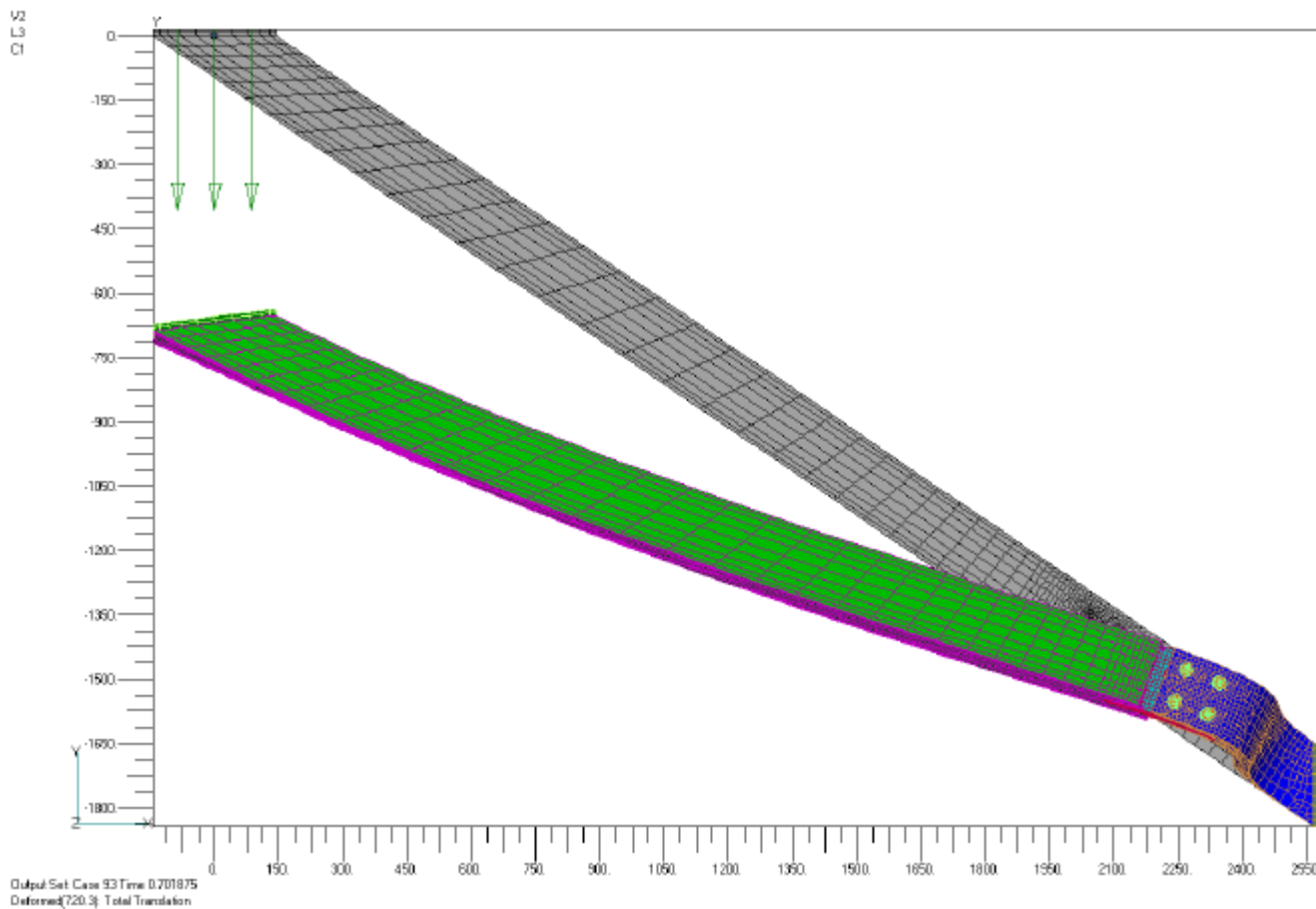


Bild B1 : Seitenansicht der Gesamtstruktur bei Erreichen der Versagenslast $V_{cri}=680,34$ kN (Verformung 1-fach überhöht)

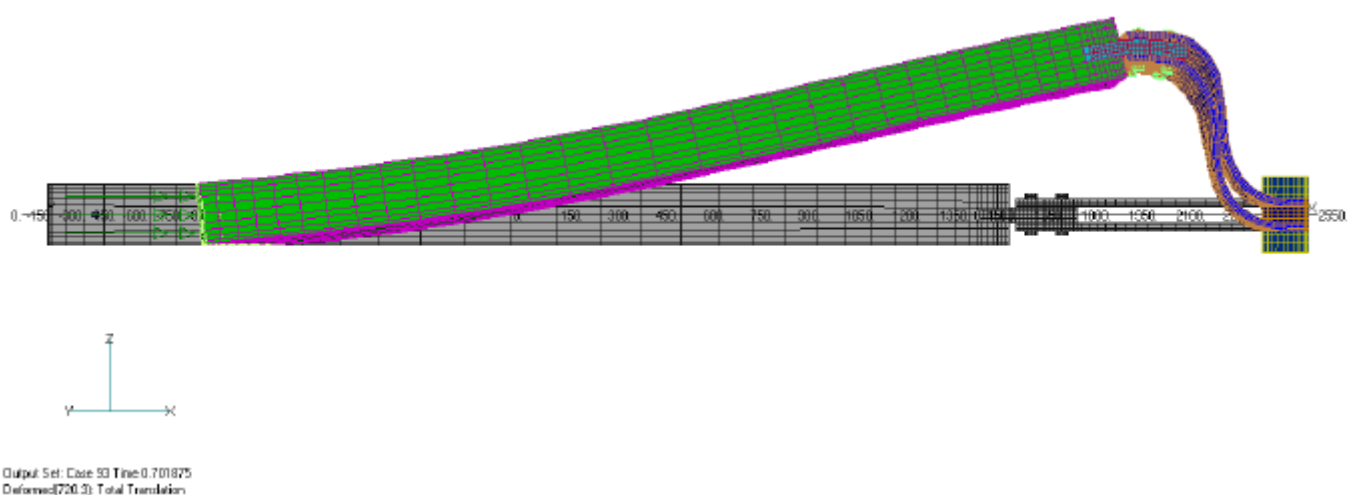
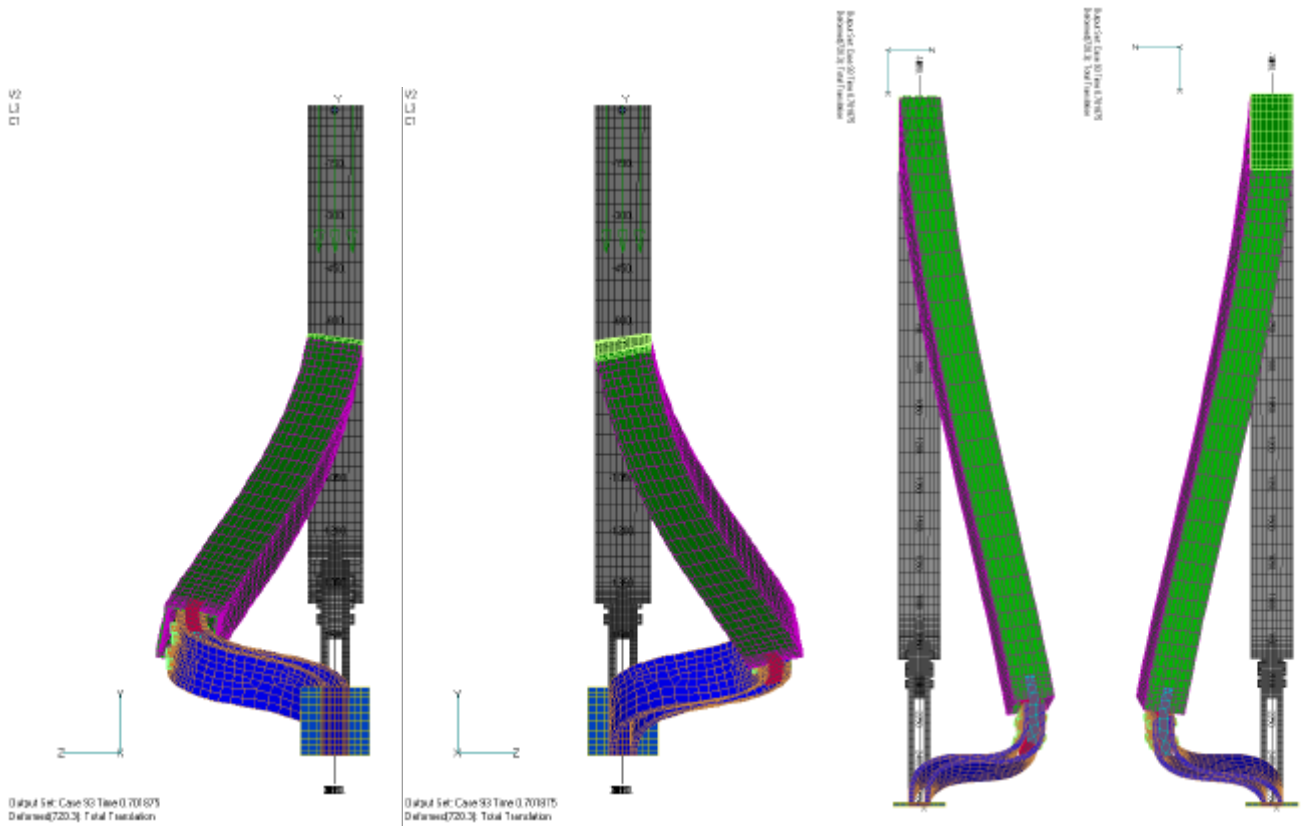


Bild B2 : Untersicht parallel zur Druckstrebe (34,2° geneigt, 1-fach überhöht)



**Bild B3 : Ansichten der Gesamtstruktur bei Erreichen der Versagenslast $V_{cri}=680,34$ kN
(Verformungen 1-fach überhöht)**