



Konstruktive Überarbeitung ausgewählter Baugruppen eines Bandwagens im Braunkohlentagebau Profen

Vorgelegte
Masterarbeit
(M.Eng.)

von

B.Eng. Andreas Dockhorn

geboren am 24.02.1990 in Wolfen

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Wolf-Dietrich Knoll	Hochschule Merseburg
Dipl.-Ing. Carsten Roth	MIBRAG mbH
Dipl.-Ing. Joachim May	Hochschule Merseburg

Profen, Oktober 2014 – Februar 2015

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2014 und 2015 während meiner Tätigkeit bei den Technischen Diensten der Mitteldeutschen Braunkohlengesellschaft mbH. Sie wurde vom Fachbereich Ingenieur- und Naturwissenschaften der Hochschule Merseburg als Masterarbeit angenommen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Carsten Roth für die Betreuung und Unterstützung während der Entstehung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Wolf-Dietrich Knoll danke ich sehr herzlich für die akademische Betreuung dieser Arbeit.

Schließlich danke ich meiner Familie, insbesondere meinem Vater Dipl.-Ing. Gerd Dockhorn für seine Unterstützung während der Erstellung dieser Arbeit.

Leipzig, Februar 2015

Inhalt

Kapitel		Seite
	Liste verwendeter Formelzeichen	7
1.	Einleitung	8
1.1	Gegenstand der Arbeit	8
1.2	Ziele und Vorgehensweise	9
2.	Grundlagen	10
2.1	Bandwagen	10
2.2	Stabwerke	12
2.3	Normen	14
3.	Analyse des Ist-Zustandes	16
3.1	Aufnahmebandausleger	16
3.1.1	Statik	17
3.1.2	Dokumentierte Konstruktionsänderungen	18
3.1.2.1	Verstärkung Obergurt	19
3.1.2.2	Bandabdeckung	20
3.1.2.3	Zusätzliche Querträger	21
3.1.3	Optimierungspotenziale und Verbesserungsvorschläge	22
3.1.3.1	Verstärkung Obergurt	24
3.1.3.2	Verschraubung der Verbände am Obergurt	28
3.1.3.3	Bandabdeckung	32
3.1.3.4	Zusätzliche Querträger	33
3.1.3.5	Stabwerkverbände	35
3.1.4	Überblick Konstruktionsüberarbeitung	38
3.2	Turm Hinterteil	38
3.2.1	Statik	39

3.2.2	Optimierungspotenziale und Verbesserungsvorschläge	40
4.	Konstruktive Überarbeitung	42
4.1	Aufnahmebandausleger	42
4.1.1	Beschreibung der konstruktiven Änderungen	43
4.1.2	Modell und Simulation	45
4.1.3	Nachweis der Lagerbolzen	55
4.1.4	Nachweis der neuen Stabprofile	58
4.1.4.1	Biegeknicken in Folge von Druckbeanspruchung	59
4.1.4.2	Zugtragfähigkeit	64
4.1.4.3	Schweißnahtnachweis	66
4.1.4.4	Ermüdungsfestigkeitsnachweis	68
4.2	FE-Analysen Knotenblech	69
4.2.1	Finite Elemente Methode	69
4.2.2	Statisch Mechanische Analyse	72
4.2.3	Lineare Beulanalyse	77
4.3	Laufstege	79
4.4	Montage	84
5.	Zusammenfassung und Ausblick	87
	Literaturverzeichnis	88
	Abbildungen	91
	Anlagen	93

Liste verwendeter Formelzeichen

A	...	Querschnittsfläche
m	...	Masse
m'	...	Längenbezogene Masse
t	...	Dicke
W_b	...	Widerstandsmoment gegen Biegung
W_{el}	...	elastisches Widerstandsmoment
N_{Ed}	...	Bemessungswert der einwirkenden Normalkraft
N_{b,Rd}	...	Bemessungswert der Biegeknickbeanspruchbarkeit
N_{t,Rd}	...	Bemessungswert der Zugtragfähigkeit
N_{pl,Rd}	...	Bemessungswert der plastischen Beanspruchbarkeit des Bruttoquerschnitts
P_x	...	Knotenlast in X-Richtung
P_y	...	Knotenlast in Y-Richtung
P_z	...	Knotenlast in Z-Richtung
F_{v,Ed}	...	Bemessungswert der einwirkenden Kraft
F_{v,Rd}	...	Bemessungswert der Abscherungsfestigkeit
f_u	...	Zugfestigkeit
f_y	...	Streckgrenze
γ_M	...	Teilsicherheitsbeiwert
F_{b,Rd}	...	Bemessungswert der Lochleibungsfestigkeit
F_{b,Ed}	...	Bemessungswert der einwirkenden Kraft
M_{Rd}	...	Bemessungswert der Momententragfähigkeit
M_{Ed}	...	Bemessungswert des einwirkenden Momentes
N_{CR}	...	Ideale Verzweigungslast
β_w	...	Korrelationsbeiwert
l_{eff}	...	Effektive Länge
λ	...	Schlankheitsgrad
Φ	...	Funktion zur Bestimmung des Abminderungsfaktors
χ	...	Abminderungsfaktor
A	...	Imperfektionsbeiwert
σ	...	Normalspannung
τ	...	Schubspannung

1. Einleitung

Eingangs wird der Gegenstand der vorliegenden Arbeit erläutert. Anschließend werden Ziele der Arbeit genannt und die Vorgehensweise zum Erreichen der Ziele erläutert.

1.1 Gegenstand der Arbeit

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die konstruktive Überarbeitung ausgewählter Baugruppen eines Bandwagens im Braunkohlentagebau Profen. Die Arbeit wurde im Zusammenhang mit dem für 2015 geplanten Wiederaufbau des Bandwagens BRs 1400.37/50.1-810 angefertigt. Verantwortlich für den Wiederaufbau und die Vergabe der vorliegenden Arbeit ist die Mitteldeutsche Braunkohlengesellschaft mbH. Die MIBRAG ist ein Bergbauunternehmen mit Sitz in Zeitz. Zum Kerngeschäft gehören die Förderung und der Verkauf von Rohbraunkohle.

Sämtliche der MIBRAG vorliegenden Unterlagen zum Bandwagen sind vom Hersteller mitgelieferte Bestände aus den 1960er und 1970er Jahren. Diese Bestände beschreiben den Originalzustand des Bandwagens. Diese Unterlagen sind unvollständig und geben nicht die bereits realisierten Änderungen in der Konstruktion nach der Inbetriebnahme des Bandwagens in den 1970er Jahren wieder. Somit ist eine Aufarbeitung der vorhandenen Zeichnungen nach aktuellem Stand der Technik notwendig.

Die konstruktive Überarbeitung der Baugruppen beinhaltet eine Bewertung der verwendeten Stahlbauprofile im Fachwerk der Baugruppen. Bereits realisierte Konstruktionsänderungen werden bewertet und implementiert. Zusätzlich werden hochbeanspruchte Bauteile gesondert mit der Finite Elemente Methode analysiert. Für die Montage der Baugruppen werden wichtige Anschlagpunkte angegeben. Das beinhaltet auch die Angabe der Schwerpunkte der Baugruppen.

Das Ergebnis der konstruktiven Überarbeitung ist in fertigungsreifen Unterlagen dargestellt.

1.2 Ziele und Vorgehensweise

Zunächst wird der Ist-Zustand analysiert und dokumentiert. Ziel ist eine Übersicht über den Bandwagen BRs 1400.37/50.1-810 zu geben und eine detailreiche Darstellung der Baugruppen Gerüst Teil 1, Gerüst Teil 2, Gerüst Teil 3 und Turm Hinterteil anzufertigen. Dazu wird eine Recherche bezüglich Statik der Baugruppen und bereits realisierter Änderungen in der Konstruktion durchgeführt.

Im Anschluss dazu wird die konstruktive Überarbeitung beschrieben. Dazu werden Optimierungspotenziale im Tragwerk beschrieben. Zu diesen Optimierungspotenzialen werden Verbesserungsvorschläge gemacht, die in einem Variantenvergleich gegenüber gestellt werden. Für die objektiv beste Lösung werden alle erforderlichen Nachweise angefertigt. Außerdem werden fertigungsreife Zeichnungen und Stücklisten zur Konstruktion angefertigt.

Die anschließenden FE-Analysen dienen der Untersuchung von Knotenblechen. Ziel dieser Analysen ist der Nachweis der Knotenbleche, die als unregelmäßige Bauteile hohen Belastungen ausgesetzt sind.

2. Grundlagen

Im Grundlagenteil werden Bandwagen des Typs BRs 1400.37/50.1 dargestellt und beschrieben. Anschließend folgt eine kurze Übersicht über die für die spätere Nachweisführung wichtige Stabwerkstechnik. Zum Abschluss des Grundlagenteils wird die Normenhierarchie erläutert.

2.1 Bandwagen

Bandwagen werden vielfältig in Tagebauen eingesetzt. Sie verbinden im Tagebau Profen als mobile Förderstrecke Schaufelrad- und Eimerkettenbagger mit der Förderbandstraße. Bandwagen des Typs BRs 1400.37/50.1 (vgl. Abb. 2.1) sind mit Raupenfahrwerk ausgestattet, schwenkbar und haben eine Fördergurtbreite von 1400 mm. Sie haben ein theoretisches Fördervolumen von 4.200 m³/h, eine Dienstmasse von ca. 500 t sowie eine mittlere Bodenpressung von ca. 8,3 kN/cm². BRs 1400.37/50.1 sind ca. 23 m hoch, ca. 15 m breit und sind bei 180° Stellung von Aufnahmebandausleger zu Abwurfbandausleger ca. 90 m lang.



Abb. 2.1: Übersicht BRs 1400.37/50.1

Der Aufbau eines BRs 1400.37/50.1 lässt sich grob in Aufnahmebandausleger, Oberbau, Raupenfahrwerk und Abwurfbandausleger gliedern (vgl. Abb. 2.2).

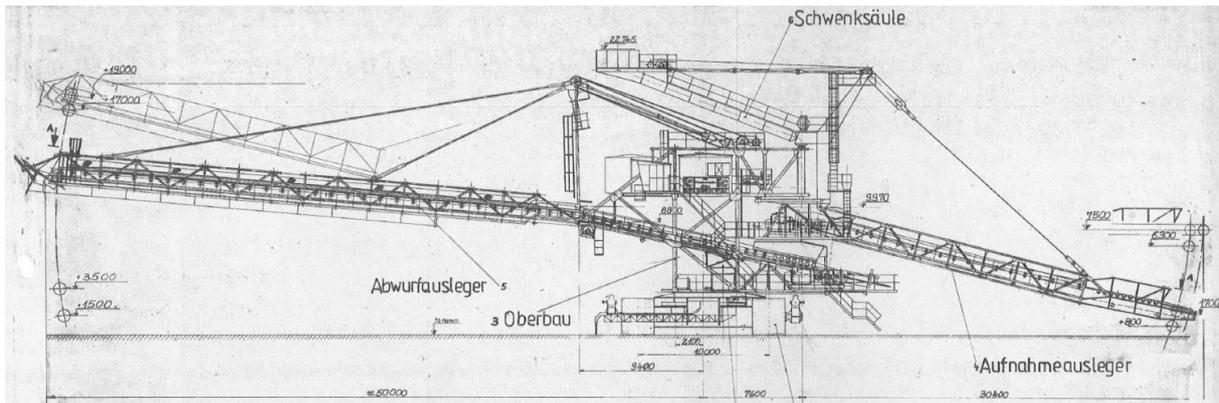


Abb. 2.2: Übersicht BRs 1400.37/50.1

Der Aufnahmebandausleger ist an dessen Ende mit einer Aufgabeschurre bestückt. Diese Aufgabeschurre nimmt das vom Bagger darüber abgeworfene Fördergut (Abraum oder Kohle) auf und leitet es auf die Förderstraße des Bandwagens (vgl. Abb. 2.3).



Abb. 2.3: Abraum-Übergabesituation Bagger/Bandwagen

Im Anschluss wird das Fördergut über den Aufnahmebandausleger bis zur nächsten Übergabeschurre am Oberbau gefördert, an der es auf das nächste Förderband am Turm Hinterteil übergeben wird. Dieses nächste Förderband leitet das Fördergut über Oberbau und Abwurf ausleger weiter. Am Ende des Abwurf auslegers wird das Fördergut über einer Schurre der Bandstraße abgeworfen.

Die im Rahmen dieser Arbeit überarbeiteten Baugruppen Gerüst Teil 1, Gerüst Teil 2 und Gerüst Teil 3 bilden zusammen den Aufnahmebandausleger. Das Turm Hinterteil gehört zum Oberbau.

2.2 Stabwerke

Die Baugruppen Gerüst Teil 1, Gerüst Teil 2, Gerüst Teil 3 und Turm Hinterteil bestehen zum großen Teil aus Stabwerken bzw. Fachwerken.

Diese Stabwerke sind aus Stäben zusammengesetzt, die durch Knotenpunkte miteinander verknüpft sind. Diese Knotenpunkte werden sowohl als gelenkig als auch als reibungsfrei angenommen. In der Folge kommt es nur zu Druck- oder Zugbelastung der Stäbe. Durch die in den Gelenken entstehende Reibung und durch biegesteife Anschlüsse kommt es zwar in der Realität zu Nebenspannungen, diese können in der Regel jedoch vernachlässigt werden.

[1, S. B8]

Technisch werden Stabwerke in Obergurte, Streben bzw. Verbände und Untergurte eingeteilt (vgl. Abb. 2.4).

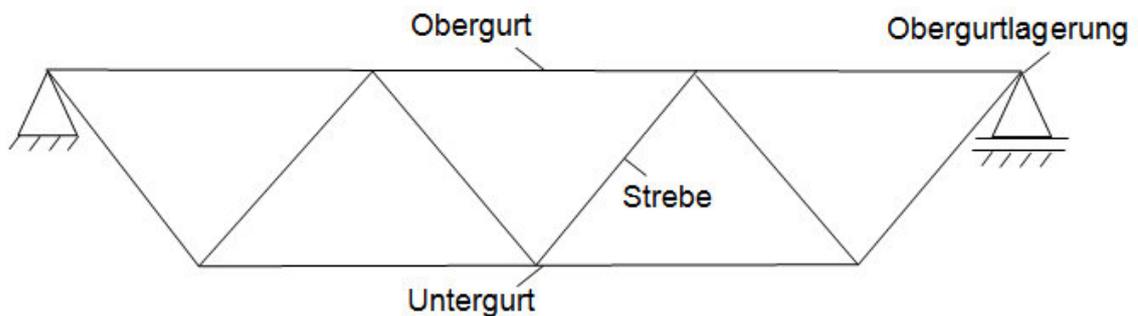


Abb. 2.4: Stabwerkverband

In den Knotenpunkten werden die Stabkräfte umgeleitet. Das hat zur Folge dass die Knotenpunkte hochbelastete Elemente sind. [2, S. 10]

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Stäbe in den Knotenpunkten zu verbinden. Gängige Praxis an Tagebaugroßgeräten ist die Verschweißung der Profile mit Knotenblechen nach [20, S. 3], welche an den Gurten angeschweißt sind (vgl. Abb. 2.5).

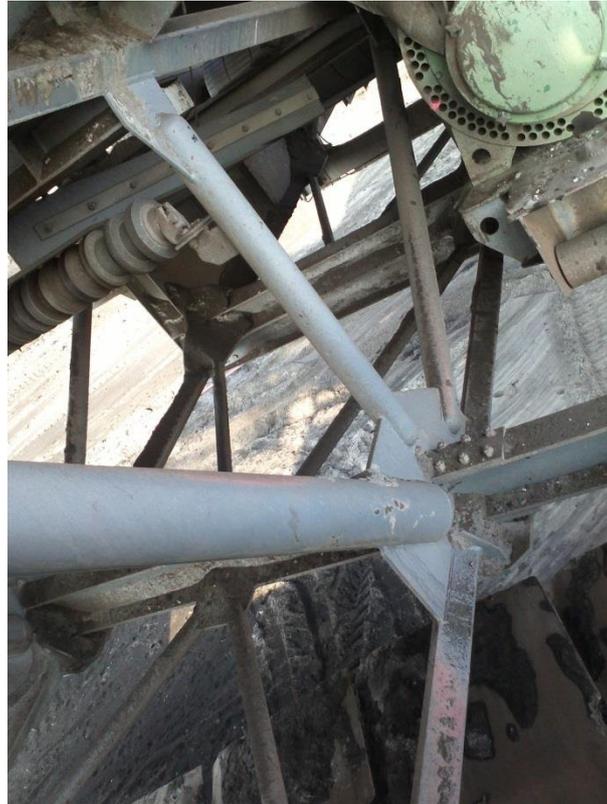


Abb. 2.5: Knotenblechverbindung

Entscheidend für die Bemessung der Stabquerschnitte sind die aus der äußeren und inneren Belastung resultierenden Schnittgrößen in den Stäben. Diese können nach der Theorie 1., 2. und 3. Ordnung berechnet werden. Diese Lösungsmodelle stammen aus der Baustatik und werden je nach Anforderung angewendet. Die Theorie 1. Ordnung ist ein geometrisch-linearer Rechenansatz. Sie wird angewendet, wenn die Belastung des Stabwerks hinreichend klein oder die Steifigkeit des Stabwerks hinreichend groß ist, sodass nur geringe Verformungen möglich sind. Die Lösung wird durch das Aufstellen von Statik- und Kinematikgleichungen ermittelt. [3, S. 4]

Wird die Tragfähigkeit des Tragwerks durch Verformungen verringert, muss die Theorie 2. Ordnung angewendet werden. [4, S. 16] Diese ist eine Näherungstheorie der Theorie der großen Verformungen (Theorie 3. Ordnung). [4, S. 18]

Bei besonders großen Verformungen des Tragwerks, wie sie in der Baustatik in der Regel nicht auftreten, wird die Theorie 3. Ordnung mit Lösungsansatz z.B. nach Newton-Raphson verwendet (Lösungsansatz der Stabwerkssoftware RSTAB).

2.3 Normen

Der Bandwagen BRs 1400.37/50.1-810 wurde wie alle baugleichen Geräte nach TGL Standard entworfen und bemessen. TGL, die technischen Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen, war das DIN-Pendant in der Deutschen Demokratischen Republik. Maßgebliche Norm für Tagebaugroßgeräte war die TGL 13472-1974: Stahltragwerke der Tagebaugroßgeräte.

Bei Instandsetzungen von Baugruppen gilt weiterhin die Norm, nach der das Gerät entworfen wurde, da andernfalls die gesamte Konstruktion nicht normgerecht ausgeführt wäre und das komplette Gerät ausgetauscht werden müsste. Das wurde mit dem Sachverständigen der Prüfstelle für Tagebaugeräte vom Bundesverband Braunkohle vereinbart und ist seit der DIN-Einführung bindend. Bei Neukonstruktionen an dem Gerät sind jedoch aktuelle Normen anzuwenden.

Da es sich bei der vorliegenden Arbeit um eine konstruktive Überarbeitung des Tragwerks handelt, werden sämtliche neuen Bauteile innerhalb der Baugruppen nach dem aktuellen Eurocode 3 bemessen. Dieser Logik folgend resultieren alle Lasten und Randbedingungen für diese Bemessungen nach Annahmen der TGL 13472-1974.

Um zu begründen, warum der Eurocode 3 für die konstruktive Überarbeitung der Stahltragwerke gewählt wird, soll die Normenhierarchie korrekt abgebildet werden:

Die für Tagebaugeräte publizierte DIN 22261-2004 verweist für Stahltragwerke ausdrücklich auf die DIN 18800. Diese wurde jedoch zum 01.07.2014 durch die Normen des Eurocode 3 ersetzt. Eine Überarbeitung der DIN 22261-2004 nach Eurocode 3 ist bereits in der Vorbereitungsphase. Die für sämtliche konstruktiven Überarbeitungen in dieser Arbeit angewendeten Normen sind demzufolge die DIN EN 1990 und die DIN EN 1993 aus dem Eurocode 3.

Die Bemessung nach TGL 13472-1974 wird nach verschiedenen Betriebszuständen des Tagebaugerätes vorgenommen. Dabei werden Lasten, wie ständige und veränderliche Lasten, zu Lastkombinationen zusammengefasst. Diese als Grenzlastfall bezeichneten Lastkombinationen beschreiben den Betriebszustand. Eine Übersicht über sämtliche Lastkombinationen nach TGL 13472-1974 befindet sich in Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Lastkombinationen nach TGL 13742-1974

Lastkombination	Betriebszustand	Lasten
Grundlastfall 0	ohne Betrieb	Ständige Lasten Veränderliche Stützlasten Gurtzug Verschmutzung und Verkrustung
Grenzlastfall H	normaler Betrieb	Grundlastfall 0 Fördergut Massenkräfte Normale Neigungen Sonstige Nutzlasten
Grenzlastfall Hz	extremer Betrieb	Grenzlastfall H Verstopfung von Schurren Sonstige Massenkräfte Wind „im Betrieb“ Sonstige Zusatzlasten
Fall „außer Betrieb“	Außer Betrieb	Grundlastfall 0 Neigung (Normal) Wind „außer Betrieb“
Fall „Transport“	Transport	Grundlastfall 0 Wind „im Betrieb“ Neigung (Transport)
Fall „Montage und Reparatur“	Montage und Reparatur	Für jede Reparatur gesondert zu beurteilen
Grenzlastfall S		Grenzlastfall H Wind „im Betrieb“ Jeweils eine Sonderlast

Diese Lastkombinationen sind die Betriebszustände, nach denen die Konstruktion bemessen wird.

3. Analyse des Ist-Zustandes

Im Zuge der rutschungsbedingten Havarie am BRs 1400.37/50.1-811 im Tagebau Vereinigtes Schleenhain im Jahr 2012 wurden die Baugruppen Aufnahmebandausleger und Turm Hinterteil am stillgelegten BRs 1400.37/50.1-810 im Tagebau Profen demontiert und als Ersatzteile für den havarierten Bandwagen genutzt. Um die Stabilität des stillgelegten Gerätes zu gewährleisten, wurde außerdem der Abwurfbandausleger demontiert. Neben dem stillgelegten Bandwagen 810 sind noch weitere baugleiche Bandwagen in den Tagebauen Profen und Vereinigtes Schleenhain im Einsatz, die teils unterschiedliche konstruktive Eingriffe ins Tragwerk der einzelnen Baugruppen aufweisen. Diese konstruktiven Überarbeitungen haben nicht komplett Eingang in das MIBRAG-Zeichnungsarchiv gefunden. Dazu existieren diverse originale Übersichtszeichnungen vom Bandwagenhersteller sowie Unterlagen zur Statik der Baugruppen. Nachfolgend sollen der Aufnahmebandausleger (Baugruppen Gerüst Teil 1, Gerüst Teil 2 und Gerüst Teil 3) sowie das Turm Hinterteil hinsichtlich Aufbau, Statik und bereits an baugleichen Geräten realisierten Änderungen aufgearbeitet werden. Auf dieser Grundlage werden Verbesserungspotenziale aufgezeigt, diese in Verbesserungsvorschlägen ausgearbeitet und in einem Variantenvergleich gegenübergestellt.

3.1 Aufnahmebandausleger

Eine Übersicht über den Aufnahmebandausleger ist in Anlage Z1 dargestellt. Er gliedert sich in die Tragwerksbaugruppen Gerüst Teil 1, Gerüst Teil 2 und Gerüst Teil 3. An diesen Tragwerksbaugruppen sind weitere Baugruppen angebracht: Laufstege, zwei Schurren, Förderstraße mit Fördergurt, Gurtreiniger, Tragrollen, Antrieb und Antriebstrommel.

3.1.1 Statik

Der Aufnahmebandausleger wird gemäß Abbildung 3.1 in 13 Knotenscheiben eingeteilt. Dabei werden Lager mit roten Kreisen, Verbindungsstöße zwischen den einzelnen Baugruppen mit blauen Kreisen dargestellt.

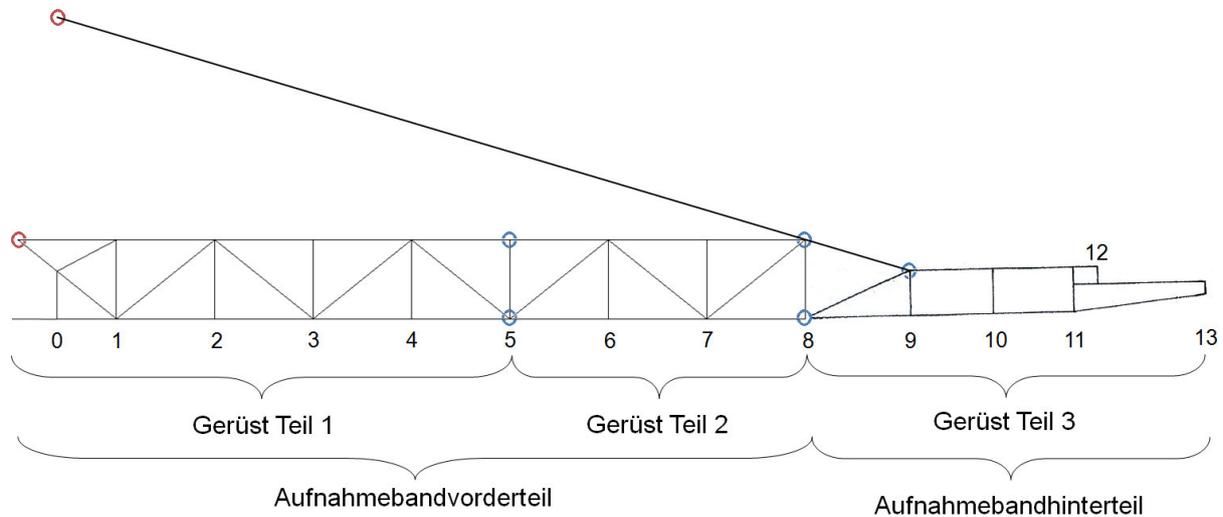


Abb. 3.1: Aufnahmebandausleger mit Knotenscheiben

Gerüst Teil 1 und Gerüst Teil 2 bilden das Vorderteil des Aufnahmebands. Diese beiden Baugruppen sind durch Schweißstöße miteinander verbunden und werden nur aus Gründen des Transports und der Montage als separate Baugruppen ausgeführt.

Das gesamte Aufnahmebandvorderteil ist über eine Stahlseilauflage an Knotenscheibe 8 und über zwei Axiallager am Oberbau des Bandwagens verlagert.

Zwischen den Knotenscheiben 1 und 8 ist das Aufnahmebandvorderteil ein Torsionskörper, der durch Obergurt, Untergurt, Fachwerkverbände und die beiden Querrahmen als Begrenzung in den Knotenscheiben 1 und 8 gebildet wird.

Das Gerüst Teil 3 bildet das Aufnahmebandhinterteil. Das Aufnahmebandhinterteil ist ein Kragträger des Aufnahmebandvorderteils. Dieser Kragträger ist, wie in Abbildung 3.2 zu erkennen, durch eine Zuglasche am oberen Teil der Knotenscheibe 8 und durch Kontaktpressung über Bolzen am unteren Teil der Knotenscheibe 8 des Aufnahmebandvorderteils verlagert.

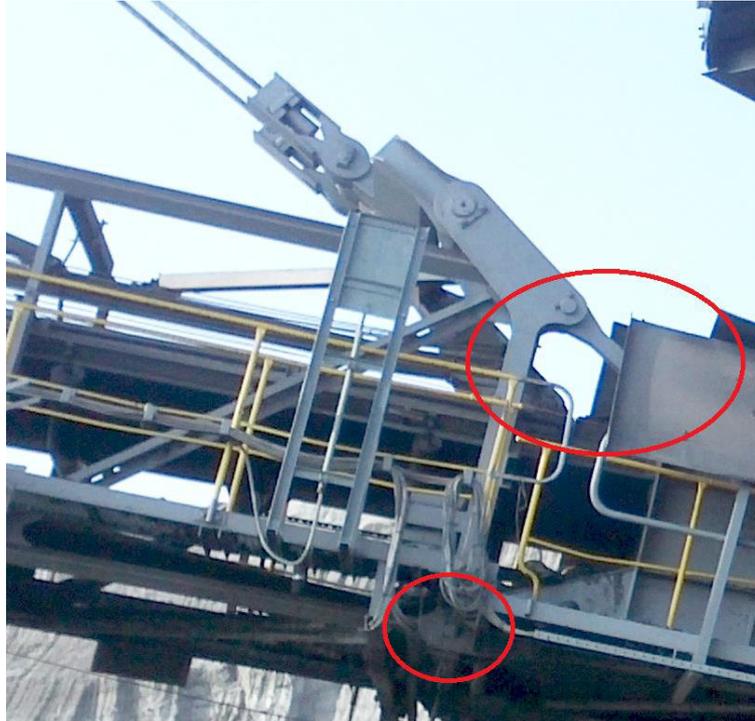


Abb. 3.2: Verlagerung des Aufnahmebandhinterteils

Wie das Aufnahmebandvorderteil ist auch das Aufnahmebandhinterteil ein Torsionskörper, der durch zwei vollwandige Seitenscheiben, Obergurt, Untergurt und die beiden Querrahmen als Begrenzung in Knotenscheibe 9 und 11 gebildet wird. Durch die geringe Steifigkeit der Lasche wird davon ausgegangen, dass die beiden Torsionskörper nicht miteinander gekoppelt sind.

3.1.2 Dokumentierte Konstruktionsänderungen

Als Quelle für Konstruktionsänderungen dient die Zeichnungsänderungsliste Bandwagen im MIBRAG-Zeichnungsarchiv. Diese Liste enthält sämtliche konstruktiven Überarbeitungen an Geräten des Typs BRs 1400.37/50.1 beginnend im Jahr 1981. Änderungen, die davor realisiert wurden, sind nicht ersichtlich. Den Aufnahmebandausleger betreffend sind drei Arten von Änderungen zu finden: Eingriffe ins Tragwerk (Gerüst Teil 1, Gerüst Teil 2, Gerüst Teil 3), Eingriffe in Maschinenbauteile und Neukonzeptionen von Hilfskonstruktionen, die die Montage- und Reparaturbedingungen verbessern. Hinsichtlich der zu optimierenden Baugruppen werden in der nachfolgenden Betrachtung nur Eingriffe ins Tragwerk berücksichtigt.

3.1.2.1 Verstärkung Obergurt

Die Quer- und Diagonalverbände am Obergurt wurden im Jahr 2001 verstärkt. Die ursprünglich als mit mehrteiligem 70 x 7 x 7 Winkelstahl ausgeführten Verbände wurden dabei mit 120er IPB-Breitflanschträgern nach DIN 1025-2:1995-11 ersetzt (vgl. Abb. 3.3).

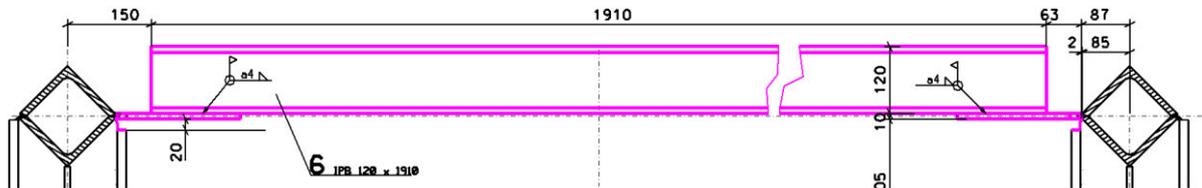


Abb. 3.3: Zeichnungsausschnitt der Verstärkung am Obergurt

Die Ausführung wird somit wesentlich massiver gestaltet. Die ursprünglichen Winkelstahlverbände sind zwar ausreichend für die im Stabwerk auftretenden Zug- und Druckbelastungen bemessen, havarieren jedoch infolge von Kollisionen mit dem Fördergurt. Im normalen Gerätebetrieb können Abraummassen gefördert werden, die im Baggervorgang nicht ausreichend zerkleinert werden und als große zusammenhängende Brocken auf die Förderstraße gelangen. Kommen diese Brocken auf der Förderstraße ins Springen, können sie mit dem Obergurt kollidieren. Deshalb wurden die Verbände zusätzlich vertikal versetzt, um mehr Distanz zwischen die Obergurtverbände und das Fördergut zu bringen. Da die Verbände nun aber außerhalb des Stabwerksystems liegen, ist die Aufnahme von Versatzmomenten im Stab anzunehmen, da die Stäbe nicht mehr zentrisch belastet werden.

3.1.2.2 Bandabdeckung

Einhergehend mit den im vorigen Kapitel beschriebenen Kollisionen zwischen Fördergut und Obergurt wurde ebenfalls im Jahr 2001 eine Bandabdeckung für die Förderstraße entworfen und implementiert (vgl. Abb. 3.4).

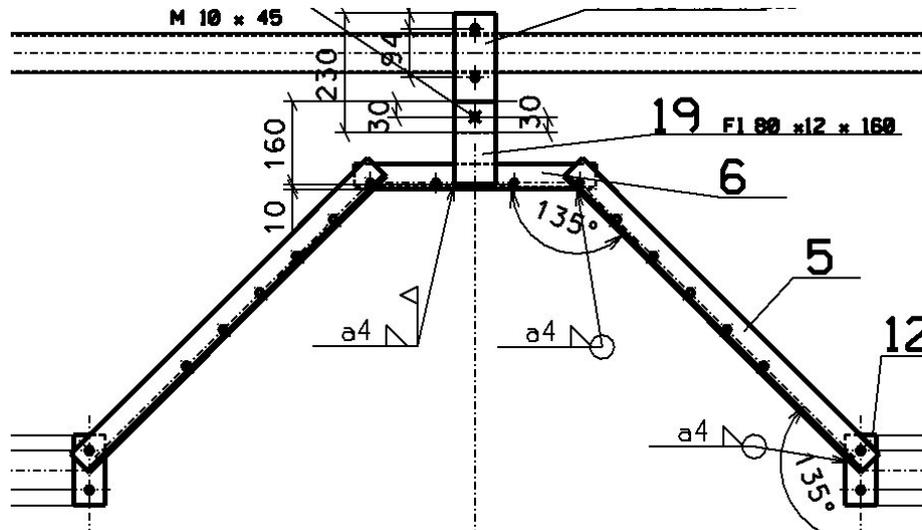


Abb. 3.4: Zeichnungsschnitt der Bandabdeckung

Sie ist am Querverband im Obergurt befestigt und deckt die Förderstraße mit 14 Stahlseilen ab (vgl. Abb. 3.5).



Abb. 3.5: Implementierte Bandabdeckung

3.1.2.3 Zusätzliche Querträger

Im Jahr 2004 wurden die Knotenscheiben 1 und 2 am Bandwagen BRs 1400.37/50.1-813 mit zusätzlichen Querträgern unterhalb des Obergurtes verstärkt (vgl. Abb. 3.6).

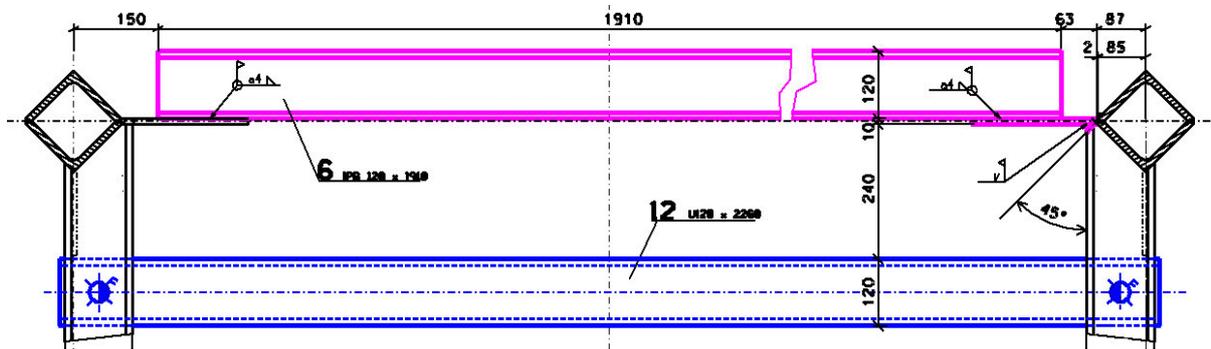


Abb. 3.6: Zeichnungsausschnitt mit zusätzlichem Querträger

Der hinzugefügte Querträger an Knotenscheibe 1 verstärkt den Querrahmen des Torsionskörpers am Aufnahmebandvorderteil zusätzlich. Der an Knotenscheibe 2 angebrachte neue Querträger verstärkt diesen Querverband zwar, jedoch verkürzt er den Torsionskörper auf den Bereich Knotenscheibe 2 bis 8. Als erster Querrahmen fungiert die dabei verstärkte Knotenscheibe 2.

3.1.3 Optimierungspotenziale und Verbesserungsvorschläge

Die Optimierung der Baugruppen zielt auf eine Erhöhung der Betriebssicherheit des Geräts durch technologische Maßnahmen ab. Dabei sollen ausschließlich Standard-Stahlprofile verwendet werden. Die Masse der fertigen Lösung soll von dem Ursprungsentwurf nicht signifikant abweichen, da sonst die Statik des gesamten Bandwagens neu ausgelegt werden muss.

Ausgehend von den beschriebenen, bereits an baugleichen Geräten umgesetzten Konstruktionsänderungen werden diese als Verbesserungsvorschläge ausgearbeitet und in Variantenvergleichen gegenübergestellt. Außerdem werden die Stabwerkverbände nach deren Profil bewertet.

Ziel eines Variantenvergleichs ist die objektive Gestaltung eines Auswahl- und Bewertungsprozesses. Die nachfolgenden Variantenvergleiche werden nach dem Schema der VDI 2225 mit dem Ziel der höchsten technischen Wertigkeit aufgebaut. [6, S. 212 f.] Dabei werden den einzelnen Varianten in verschiedenen Bewertungskategorien Punkte nach folgendem Bewertungsmaßstab gegeben:

- 4 Punkte = sehr gut
- 3 Punkte = gut
- 2 Punkte = ausreichend
- 1 Punkt = gerade noch tragbar
- 0 Punkte = unbefriedigend

Da die Kategorien objektiv betrachtet nicht mit gleicher Wichtigkeit nebeneinander stehen, müssen die Kategorien gewichtet werden. [5, S. 16] Dies geschieht mithilfe eines Paarvergleichs der einzelnen Kategorien, wie beispielhaft in Tabelle 3.1 dargestellt wird. Hierbei werden Kategorien gegenübergestellt und beurteilt, welche Kategorie die wichtigere ist. [5, S. 17]

- 2 = Wichtiger
- 1 = Genauso wichtig
- 0 = nicht so wichtig

Tabelle 3.1: Beispiel Paarvergleich Bewertungskategorien

		Kategorie				
		Geringe Teilezahl	Geringes Volumen	Hohe Zuverlässigkeit	Einfache Wartung	Einfache Montage
im Vergleich zu Kategorie	Geringe Teilezahl	1	0	2	1	1
	Geringes Volumen	2	1	2	1	1
	Hohe Zuverlässigkeit	0	0	1	0	0
	Einfache Wartung	1	1	2	1	0
	Einfache Montage	1	1	2	2	1
	Σ_{absolut}	5	3	9	5	3
	Σ_{normiert}	0,56	0,33	1,00	0,56	0,33

In diesem Beispiel ist das wichtigste Kriterium Hohe Zuverlässigkeit. Alle anderen Kategorien werden beim eigentlichen Variantenvergleich, der für dieses Beispiel in Tabelle 3.2 dargestellt ist, abgewertet.

Tabelle 3.2: Beispiel Variantenvergleich

	Wichtung	Lösung A	Lösung B
Geringe Teilezahl	0,56	3	4
Geringes Volumen	0,33	1	4
Hohe Zuverlässigkeit	1,00	4	1
Einfache Wartung	0,56	2	2
Einfache Montage	0,33	2	4
	Σ_{absolut}	12	15
	$\Sigma_{\text{gewichtet}}$	7,79	7,00

Trotz des besseren Ergebnisses auf der absoluten Bewertungsskala, wird Lösung B ausgeschlossen, da es nach dem gewichteten Maßstab die schlechtere Lösung ist.

3.1.3.1 Verstärkung Obergurt

Wie in Kapitel 3.1.2.1 beschrieben, ist eine Verstärkung des Obergurts notwendig. Die ursprünglich vom Hersteller vorgesehene Variante ist ein Stab aus mehrteiligem Winkelstahl (vgl. Abb. 3.7).

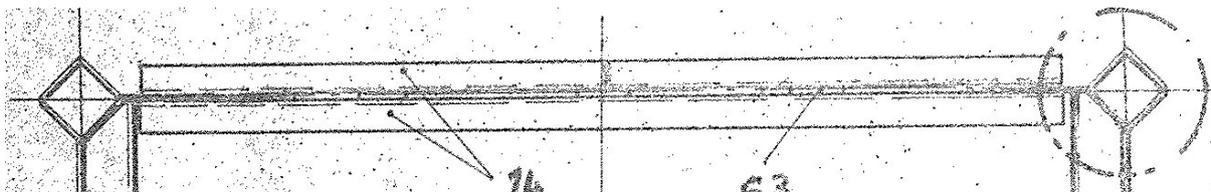


Abb. 3.7: Verstärkung am Obergurt - Winkelstahl

Es gibt mehrere Varianten, wie die normal ausgeführten Winkelstahlverbände ersetzt werden können:

- durch Breitflanschträger nach DIN 1025-2
- durch nahtlose Stahlrohre nach EN 10220
- durch Hohlprofile nach EN 10210

Diese Varianten sollen nachfolgend hinsichtlich Festigkeit und Masse beurteilt werden.

Die Breitflanschvariante mit DIN 1025 IPB-120 Trägern (vgl. Abb. 3.8) wurde 2001 bereits am baugleichen Bandwagen 812 und 2004 am Bandwagen 813 eingebaut.



Abb. 3.8: Verstärkung am Obergurt - Breitflansch

Diese Variante bietet ein hohes Widerstandsmoment gegen Biegung (vgl. Tabelle 3.3) und somit eine hohe Festigkeit gegen am Stab einschlagendes Fördergut. Außerdem kann der Träger vertikal nach außen gerückt montiert werden, was den Abstand zur Förderstraße vergrößert, jedoch Versatzmomente in den Stab einbringt. Der Breitflanschträgerstab bringt eine sehr hohe längenbezogene Masse mit sich. Durch die Größe der Stäbe zieht sich die Massenerhöhung auch durch die Anschlusskonstruktion: Die Knotenbleche müssen größer ausgelegt werden und die Gesamtmasse der Baugruppe nimmt signifikant zu.

Wie im Kapitel 3.1.3.5 beschrieben, wird ein Ersetzen sämtlicher Verbände mit Stahlrohren angestrebt. Auf dieser Grundlage wird eine Variante mit nahtlosen Stahlrohren vorgeschlagen (vgl. Abb. 3.9).

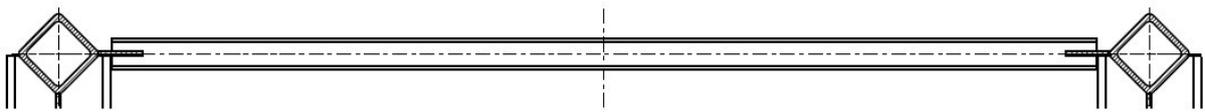


Abb. 3.9: Verstärkung am Obergurt - Stahlrohr

Stahlrohre haben ein schlechteres Widerstandsmoment gegen Biegung als Breitflanschträger bei gleicher längenbezogener Masse bzw. eine höhere längenbezogene

Masse bei gleichem Widerstandsmoment. Zudem lassen sich Stahlrohre nicht ohne weiteres außermittig zum Stabwerkssystem montieren. Dadurch wäre keine zusätzliche Distanz zum Fördergut möglich.

Es liegt zudem noch eine Alternativvariante seitens des Herstellers aus dem Jahr 1967 vor. Diese Variante beinhaltet bereits mit Hohlprofilen verstärkt ausgeführte Obergurtverbände (vgl. Abb. 3.10).

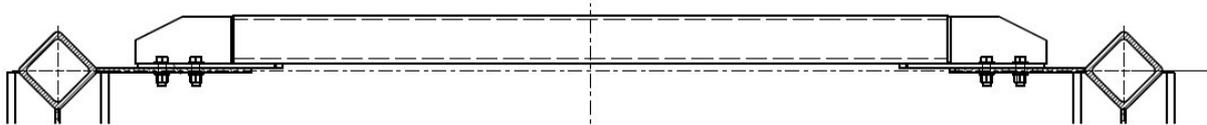


Abb. 3.10: Verstärkung am Obergurt - Hohlprofil

Diese Technik ist aktuell an mehreren baugleichen Bandwagen in den Tagebauen der MIBRAG im Einsatz. Die Hohlprofile sind aus Winkelstahl zusammengeschweißt. Der Einsatz von gängigen nahtlosen quadratischen Hohlprofilen empfiehlt sich hierbei. Wie bei der Breitflanschvariante sind auch bei dieser Variante die Obergurtverbände vertikal versetzt, um mehr Distanz zum Fördergut zu wahren. Diese Variante ordnet sich vom Verhältnis Widerstandsmoment gegen Biegung zu längenbezogener Masse zwischen den Varianten Breitflanschträger und nahtloses Stahlrohr ein.

Diese Hohlprofilvariante zeichnet sich zusätzlich durch die einfache Montage- und Demontagemöglichkeit über eine Verschraubung mit Passschrauben am Knotenblech aus. Diese Verschraubung lässt sich grundsätzlich mit jeder der genannten Varianten umsetzen und wird in Kapitel 3.1.3.2 als Optimierungspotenzial analysiert.

In Tabelle 3.3 sind die qualitativen Aussagen zu den einzelnen Varianten quantitativ dargestellt.

Tabelle 3.3: Gegenüberstellung der Varianten zur Obergurtverstärkung

Variante	Profilbeispiel	m' [kg/m]	W _b [cm ³]
Winkelstahl	70 x 7 x 7	14,76	8,4
Breitflanschträger	IPB 120	26,7	144,0
Nahtloses Stahlrohr	108 x 11	26,3	73,9
Hohlprofile	100 x 10 x 10	25,6	98,4

Den im Stabwerk auftretenden Druck- und Zugbelastungen halten alle vier Varianten stand. Ein Vergleich der vier Varianten soll eine Entscheidung für die Auswahl eines Stabquerschnitts herbeiführen. Die Kategorien für den Variantenvergleich sind in Tabelle 3.4 dargestellt. Hohe Montage bezeichnet die Möglichkeit, den Stab vertikal nach oben versetzt vom Stabsystem zu montieren. Der Variantenvergleich ist in Tabelle 3.5 dargestellt.

Tabelle 3.4: Wichtung der Bewertungskategorien Obergurtverbände

	Hohe Biegefestigkeit	Geringe Masse	Hohe Montage
Hohe Biegefestigkeit	1	2	0
Geringe Masse	0	1	0
Hohe Montage	2	2	1
Σ_{absolut}	3	5	1
Σ_{normiert}	0,6	1,0	0,2

Tabelle 3.5: Variantenvergleich Obergurtverbände

Bewertungskategorie	Wichtung	Winkelstahl	Breitflanschträger	Stahlrohr	Hohlprofil
Hohe Biegefestigkeit	0,6	1	4	2	3
Geringe Masse	1,0	4	2	3	3
Hohe Montage	0,2	2	4	1	4
	Σ_{absolut}	7	10	6	10
	$\Sigma_{\text{gewichtet}}$	5	5,2	4,4	5,6

Die bereits an mehreren Bandwagen umgesetzte Variante mit Hohlprofilen ist die für den vorliegenden Anwendungsfall die beste Variante und wird nachfolgend in der konstruktiven Überarbeitung berücksichtigt.

3.1.3.2 Verschraubung der Verbände am Obergurt

Da, wie bereits beschrieben, die Verbände im Obergurt besonders gefährdet sind, durch umherfliegendes Fördergut zu havarieren, wurde mit der im vorigen Kapitel beschriebenen Variante der Hohlprofile eine Montage mit Passschrauben eingeführt. Eine solche Verschraubung vereinfacht die Demontage alter und die anschließende Montage neuer Verbände deutlich. Die Verschraubung stellt sich so dar, dass der Stab an einem Anschlussblech angeschweißt wird. Dieses Blech wird mit dem Knotenblech verschraubt. Das Knotenblech ist wie gehabt am Gurt angeschweißt. Die Verschweißung zwischen Stab und Blech wird mit einem weiteren Blech ausgesteift (vgl. Abb. 3.11).

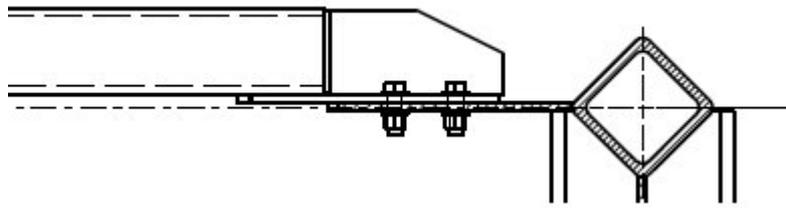


Abb. 3.11: Verschraubung eines Obergurtverbandes

Im Stahlbau werden nach [8, S. 24 f.] folgende Schraubenverbindungen im Bereich Scherverbindungen eingesetzt:

- Scher-/Lochleibungsverbindungen

Bei diesen Verbindungen erfolgt die Kraftübertragung durch die Beanspruchung der Schraube auf Abscherung und Lochleibung zwischen Schaft der Schraube und der Wandung des Lochs (vgl. Abb. 3.12). Ist die Belastung vorwiegend nicht ruhend, werden Passschrauben eingesetzt, um das Lochspiel zu vermeiden. [7, S. 1]

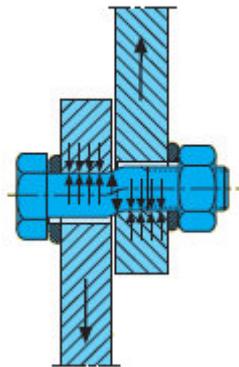


Abb. 3.12: Scher-/Lochleibungsverbindung

Abscherung und Lochleibung sind hinsichtlich der einfachen Demontage und Montage der Schrauben problematisch, da das Loch vergrößert wird. In einem bestimmten Reparaturzyklus müssen bei diesen Varianten die Schrauben vergrößert werden, um das Lochspiel gering zu halten bzw. bei Passschrauben auszuschalten.

- Gleitfeste Verbindungen

Gleitfeste Verbindung übertragen die Kraft durch deren planmäßige Vorspannung (vgl. Abb. 3.13). Werden Passschrauben eingesetzt erfolgt eine zusätzliche Kraftübertragung über die Passung. [7, S. 1]

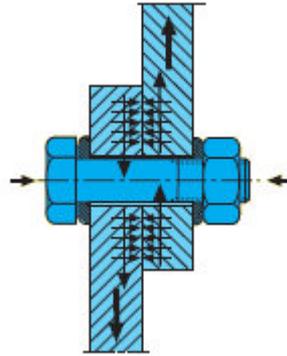


Abb. 3.13: Gleitfeste Verbindung

Bei diesen Varianten wird das Loch weniger belastet als bei den SL Verbindungen, weshalb eine Wartung der Stäbe mit diesen Varianten günstiger von statten geht. Bei der gleitfesten Passschraubenvariante ist eine Vergrößerung des Lochs jedoch auch nicht auszuschließen. Somit werden folgende Varianten in einem Variantenvergleich gegenübergestellt:

- Verschweißung der Verbände am Obergurt
- Scher-Lochleibungs-Verbindung mit Lochspiel (SL)
- Lochleibungsverbindung (SLP)
- Gleitfeste Verbindung (GV)
- Gleitfeste Verbindung mit Passschrauben (GVP)

Die Varianten werden in den Kategorien Geringe Masse, Geringe Teilezahl und Einfache Wartung bewertet. Einfach Wartung bezeichnet die Demontage eines havarierten Stabes mit anschließender Montage eines neuen Stabes. Die Verbindungssicherheit ist mit allen Varianten herstellbar. Die Wichtung der Bewertungskategorien ist in Tabelle 3.6 dargestellt. Der Variantenvergleich ist in Tabelle 3.7 dargestellt.

Tabelle 3.6: Wichtung der Bewertungskategorien Verschraubung

	Geringe Masse	Geringe Teilezahl	Einfache Wartung
Geringe Masse	1	0	2
Geringe Teilezahl	2	1	2
Einfache Wartung	0	0	1
Σ_{absolut}	3	1	5
Σ_{normiert}	0,6	0,2	1,0

Tabelle 3.7: Variantenvergleich Verschraubung

Bewertungskategorie	Wichtung	Schweißen	SL	SLP	GV	GVP
Geringe Masse	0,6	4	3	3	3	3
Geringe Teilezahl	0,2	4	2	2	2	2
Einfache Montage	1,0	1	2	2	4	3
	Σ_{absolut}	5	7	7	9	8
	$\Sigma_{\text{gewichtet}}$	4,2	4,2	4,2	6,2	5,2

Eine Verschraubung der oberen Verbände ist einer Verschweißung somit vorzuziehen. Statt Passschrauben soll eine gleitfeste Verbindung mit normalen hochfesten Schrauben realisiert werden.

3.1.3.3 Bandabdeckung

Die Bandabdeckung bringt eine Gewichtserhöhung mit sich, die in den vorliegenden Unterlagen nicht beschrieben ist und grob überschlagen auf ca. 2400 kg zu beziffern ist.

Der Vorteil der Bandabdeckung ist der Schutz der Diagonal- und Querverbände im Obergurt. Es können zwar immer noch kleine Teile des Förderguts die oberen Verbände erreichen, gegen die großen Teile im Fördergut sind diese jedoch gut abgeschirmt, solange die Abdeckung standhält.

Durch einen Variantenvergleich soll objektiv beurteilt werden, ob der Nutzen durch die Bandabdeckung deren Masse rechtfertigt. Die Wichtung der Bewertungskategorien ist in Tabelle 3.8 dargestellt. Der Variantenvergleich ist in Tabelle 3.9 dargestellt.

Tabelle 3.8: Wichtung der Bewertungskategorien Bandabdeckung

	Geringe Masse	Schutz der oberen Verbände
Geringe Masse	1	2
Schutz der oberen Verbände	0	1
Σ_{absolut}	1	3
Σ_{normiert}	0,33	1,0

Tabelle 3.9: Variantenvergleich Bandabdeckung

Bewertungskategorie	Wichtung	Keine Bandabdeckung	Bandabdeckung
Geringe Masse	0,33	4	2
Schutz der oberen Verbände	1,0	0	3
	Σ_{absolut}	4	5
	$\Sigma_{\text{gewichtet}}$	1,32	3,66

Die Bandabdeckung ist gerechtfertigt und es wird vorgeschlagen, dass sie auch weiterhin montiert wird. Da die Bandabdeckung bereits umgesetzt ist, bedarf sie keiner weiteren Darstellung in dieser Arbeit.

3.1.3.4 Zusätzliche Querträger

Die zusätzlichen Querträger erhöhen das Gewicht aber versteifen das System. Der zusätzliche Querträger in der ersten Knotenscheibe verstärkt den Torsionskörperahmen. Dieser Rahmen ist ein sehr hochbelastetes Element. Die Verstärkung wird gegenwärtig nur am Bandwagen 813 eingesetzt.

Der zusätzliche Querträger in der zweiten Knotenscheibe verkürzt den Torsionskörper am Aufnahmeband und schafft so einen neuen Rahmen, der den hohen Belastungen durch den Torsionskörper standhalten muss. Dieser Rahmen ist aber einerseits schwächer bemessen als der ursprüngliche Rahmen und andererseits wird so eine Verstärkung des ursprünglichen Rahmens unnötig.

Ein Variantenvergleich soll die Zweckhaftigkeit folgender Varianten untersuchen:

- Ursprungsvariante ohne zusätzliche Querträger
- Verstärkung der ersten Knotenscheibe
- Verstärkung der ersten und zweiten Knotenscheibe

Wie in Tabelle 3.10 dargestellt, sind die Bewertungskategorien Hohe Baugruppensicherheit und Geringe Masse gleichbedeutend.

Tabelle 3.10: Wichtung der Bewertungskategorien Querträger

	Hohe Baugruppensicherheit	Geringe Masse
Hohe Baugruppensicherheit	1	1
Geringe Masse	1	1
Σ_{absolut}	2	2
Σ_{normiert}	1,0	1,0

Tabelle 3.11: Variantenvergleich Querträger

Bewertungskategorie	Wichtung	Ohne neue Querträger	Zwei neue Querträger	Ein neuer Querträger
Hohe Baugruppensicherheit	1,0	3	0	4
Geringe Masse	1,0	4	1	3
	Σ_{absolut}	7	1	7
	$\Sigma_{\text{gewichtet}}$	7	1	7

Dem Variantenvergleich in Tabelle 3.11 nach sind sich die Varianten Ohne neue Querträger und Ein neuer Querträger ebenbürtig. Um eine Entscheidung herbeizuführen, wird der Sachverhalt wirtschaftlich betrachtet und die Variante Ohne neue Querträger umgesetzt.

3.1.3.5 Stabwerkverbände

In der Entwurfsphase des Bandwagens herrschte Knappheit an Stahlprofilen, weshalb ein Großteil der Stabwerkverbände mit Winkelstahl ausgelegt ist. Sämtliche Hohlprofile sind ebenfalls als Winkelstahl ausgelegt, der zu einem Hohlprofil zusammengeschweißt werden muss. Eine Übersicht über die Bauweisen von mehrteiligem Winkelstahl ist in Abbildung 3.14 dargestellt.

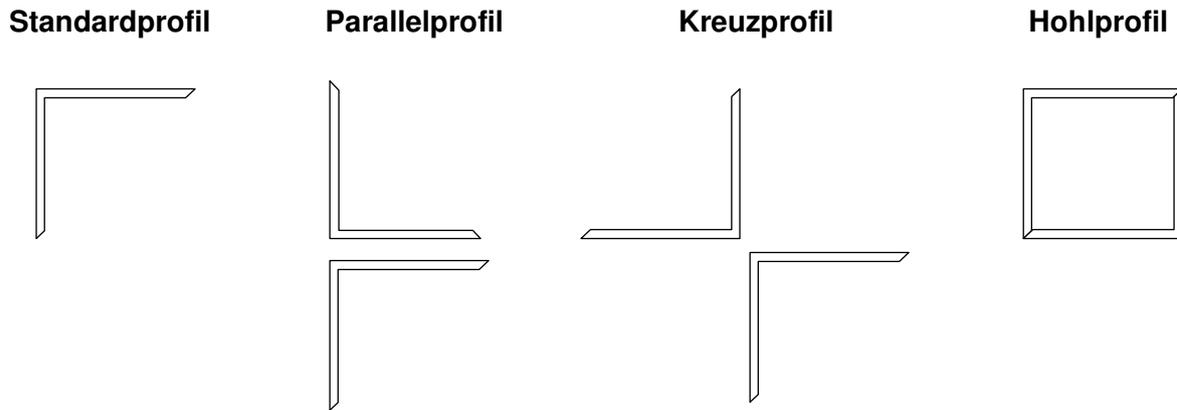


Abb. 3.14: Winkelprofilvarianten

Diese Fakten geben Grund zur Annahme, dass die Konstruktion ein Leichtbaupotenzial besitzt.

Dem aktuellen Stand der Technik nach werden in Stabwerkskonstruktionen vor allem nahtlose Stahlrohre eingesetzt, da diese ein besseres Verhältnis von Tragfähigkeit zu Masse besitzen (vgl. Tabelle 3.12) und aufgrund der nahtlosen Ausführung die Gefahr eines Schweißnahtversagens ausgeschlossen ist.

Außerdem ist der Einsatz von Doppel-T-Trägern möglich. Diese haben eine ähnlich hohe Tragfähigkeit gegen Biegeknicken bei gleicher längenbezogener Masse wie Stahlrohre. Während Stahlrohre aber durch ihre Symmetrie gegen Ausknicken in alle Richtung die gleiche Tragfähigkeit aufweisen, haben Doppel-T-Träger den Nachteil, dass sie eine schwache Biegeachse besitzen, die leichter ausknicken kann (vgl. Tabelle 3.12). Nachteil ist außerdem, dass sämtliche Knotenblechverbindungen umkonstruiert werden müssten, da Doppel-T-Träger ausgeschnittene Knotenbleche zum Anschluss benötigen.

In Tabelle 3.12 werden fünf verschiedene Profile hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit gegen Ausknicken gegenübergestellt. Die Tragfähigkeit gegen Ausknicken ist das wesentliche Merkmal für die Stabwerksverbände, da ein Ausknicken unter Druckbelastung bei den gegebenen Bedingungen eher eintritt, als ein Versagen bei Zugbelastung.

Tabelle 3.12: Gegenüberstellung von Profilvarianten mit ähnlicher längenbezogener Masse hinsichtlich ihrer Druckbeanspruchbarkeit

Profilvariante	Beispiel-Profilgröße	m' [kg/m]	N_{b,Rd} [kN]
Einfach	120 x 12	21,60	507
Parallel	80 x 8	19,26	325
Kreuz	80 x 8	19,26	406
Rohr	133 x 6,3	19,69	531
Doppel-T	IPB 100	20,4	540 und 403

Durch das Ersetzen sämtlicher Stäbe aus Winkelstahl mit Stäben aus Stahlrohren kann die gesamte Baugruppe optimiert werden. Ein Variantenvergleich wird beurteilen, ob diese Maßnahme sinnvoll ist. Zu diesem Variantenvergleich existiert nur die Bewertungskategorie Hohes Tragfähigkeits-Massenverhältnis.

Tabelle 3.13: Variantenvergleich Stabwerkverbände

Bewertungskategorie	Einfach	Parallel	Kreuz	Rohr	Doppel-T
Hohes Tragfähigkeits-Massenverhältnis	3	2	3	4	3

Die Variante Rohr wird umgesetzt.

3.1.4 Überblick Konstruktionsüberarbeitung

Basierend auf den Variantenvergleichen aus Kapitel 3.1.3 wird das Aufnahmeband in folgenden Punkten konstruktiv überarbeitet:

- Verstärkung der Quer- und Diagonalverbände im Obergurt
- Einsatz von Stahlrohren statt ein- und mehrteiligen Winkelstahlprofilen

Da Gerüst Teil 3 bereits mit Stahlrohren bemessen ist, wird diese Baugruppe nicht überarbeitet. Darüber hinaus soll die Bandabdeckung eingesetzt werden, die bereits als fertige Lösung vorliegt und deshalb nicht weiter dargestellt wird. Die Obergurtverbände sollen mit gleitfesten Schraubenverbindungen montiert werden.

Außerdem müssen Laufstege zu den Baugruppen Gerüst Teil 1, Gerüst Teil 2 und Gerüst Teil 3 konstruiert werden, da keine Zeichnungen zu den Laufstegen vom Hersteller vorliegen. Für die Montage werden die Schwerpunkte der Baugruppen und die einzelnen Montagestöße dargestellt.

3.2 Turm Hinterteil

Das Turm Hinterteil ist in Anlage Z2 hinterlegt. Am Traggerüst selbst sind noch die Baugruppen Blechträger, Schurre, Motor + Getriebe, Bandstraße, Spannstation und Laufsteg angebracht.

Zunächst wird die Statik von Turm Hinterteil beschrieben. Da keine bereits realisierten Konstruktionsänderungen dokumentiert sind, werden direkt im Anschluss Optimierungspotenziale in der Konstruktion dargestellt und bewertet.

3.2.1 Statik

Turm Hinterteil besteht aus 2 symmetrischen Seitenscheiben, die ihrerseits in 4 Knotenscheiben eingeteilt sind (vgl. Abb. 3.15).

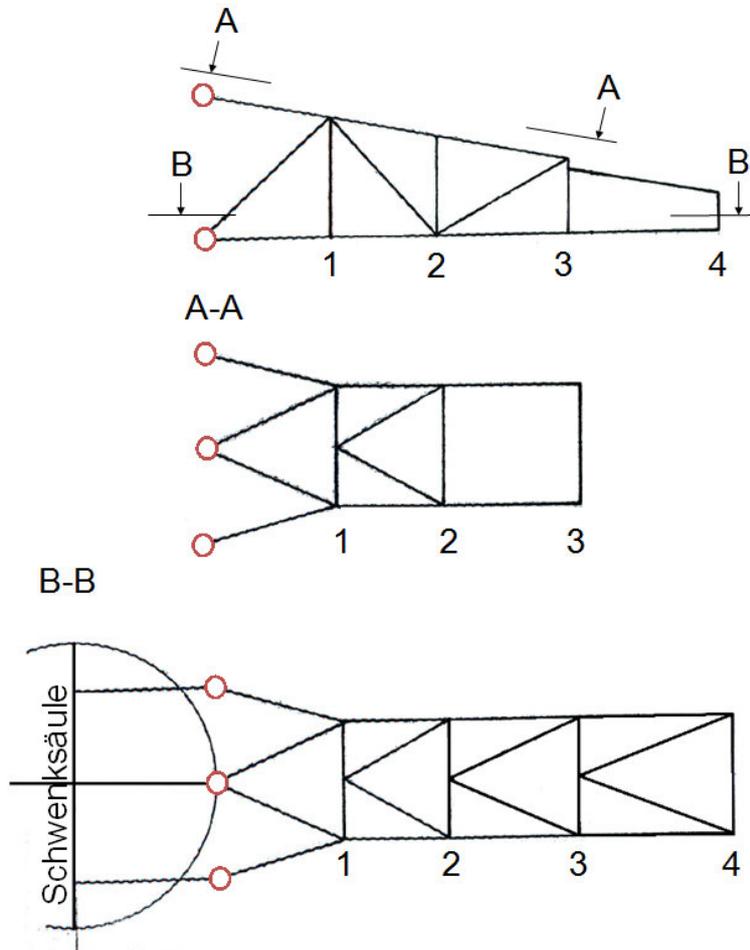


Abb. 3.15: Turm Hinterteil mit Knotenscheiben

Die Baugruppe ist ein Kragträger der Baugruppe Turm Mittelteil. Die beiden Baugruppen sind durch Schweißstöße der Stäbe von Turm Hinterteil an den entsprechenden Knotenblechen von Turm Mittelteil verbunden (vgl. Abb. 3.16). Die Schweißstöße sind in Abbildung 3.15 mit roten Kreisen gekennzeichnet.



Abb. 3.16: Turm Hinterteil mit Knotenscheiben

Die in Abbildung 3.16 dargestellten geschraubten Verbände gehören zur anschließenden Baugruppe Turm Mittelteil.

3.2.2 Optimierungspotenziale und Verbesserungsvorschläge

Da seit der Inbetriebnahme des Bandwagentyps keine Änderungen an der Originalkonstruktion vorgenommen wurden und auch keine Berichte über Havarien vorliegen, ist die Notwendigkeit für Optimierungen gering.

Für die konstruktive Überarbeitung werden deshalb nur die Profilquerschnitte der Stäbe bewertet. Im Gegensatz zum Aufnahmebandausleger sind sämtliche Stäbe bereits als Stahlrohre, Hohlprofile oder Doppel-T-Träger ausgeführt. Die Hohlprofile sind dabei aus jeweils zwei Winkelstählen und die Doppel-T-Träger aus einzelnen Blechen zusammengeschweißt. Durch den Einsatz von Walzprofilen können Schweißnähte vermieden und somit die Festigkeit der Bauteile erhöht werden.

Dazu werden die Tragfähigkeiten von Beispiel-Stabquerschnitten aus S235JR+AR in Tabelle 3.14 bei Zug- und Druckbelastung gegenübergestellt.

Tabelle 3.14: Vergleich von geschweißten und gewalzten Doppel-T-Profilen

Profilvariante	Profilgröße	m' [kg/m]	N_{b,Rd} [kN]	N_{t,Rd} [kN]
Geschweißt	100x100x6x10	19,5	516 und 476	583
Gewalzt	IPB 100	20,4	540 und 403	611

Der Algorithmus der Berechnung der Tragfähigkeiten der Profilquerschnitte ist in den Kapiteln 4.1.4.1 und 4.1.4.2 dargestellt.

Entsprechend Tabelle 3.14 ist der Einsatz von geschweißten Doppel-T-Profilen hinsichtlich der Tragfähigkeit bei Druck- und Zugbeanspruchung nicht signifikant schlechter, hinsichtlich der schwachen Biegeachse bei Druckbeanspruchung besser als der Einsatz von gewalzten Doppel-T-Profilen. Hinzukommt, dass geschweißte Profile leichter sind als gewalzte Profile. Eine Gewichtszunahme bei partieller Tragfähigkeitsverminderung ist nicht sinnvoll.

Demnach gibt es objektiv keine Begründung für eine konstruktive Überarbeitung der Baugruppe Turm Hinterteil. Die Baugruppe kann im Originalzustand für den Wiederaufbau des Bandwagens 810 gefertigt werden.

4. Konstruktive Überarbeitung

Zunächst wird die konstruktive Überarbeitung des Aufnahmebandauslegers beschrieben. Im Anschluss wird die Konstruktion der zugehörigen Laufstege dargestellt.

4.1 Aufnahmebandausleger

Nachfolgend wird die konstruktive Überarbeitung der Baugruppen Gerüst Teil 1 und Gerüst Teil 2 dargestellt. Gerüst Teil 3 wird, wie in Kapitel 3.1.4 begründet, nicht überarbeitet.

Zunächst werden die konstruktiven Änderungen beschrieben. Im Anschluss wird eine Modellbildung mit Hilfe der Simulationssoftware RSTAB dargestellt. Darauf aufbauend werden sämtliche notwendigen Nachweise zur Konstruktion geführt.

Diese Reihenfolge stellt nicht den Prozess der Überarbeitung, sondern deren Endergebnis dar. Der Prozess der Überarbeitung erfolgte zyklisch und ist in Abb. 4.1 dargestellt.

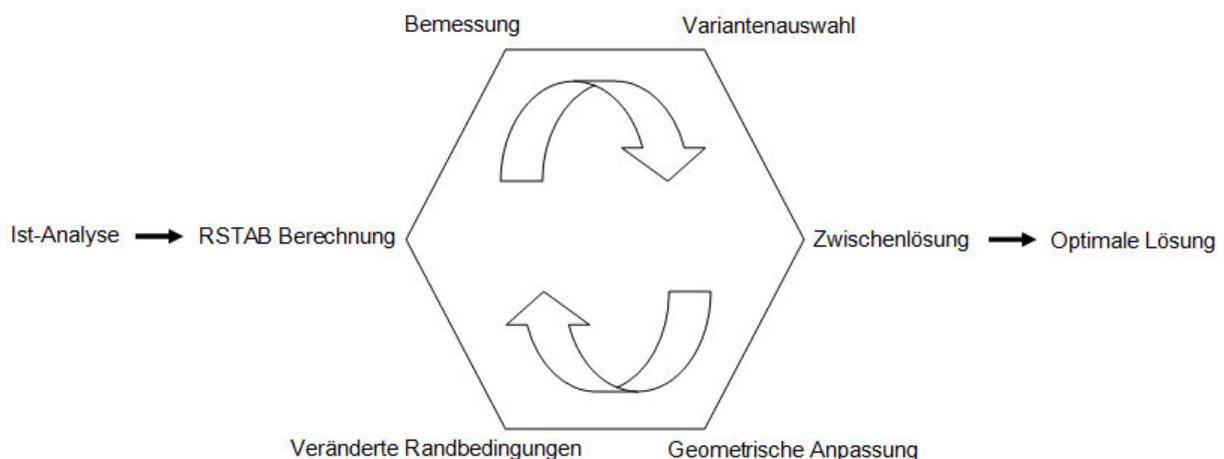


Abb. 4.1: Konstruktionsalgorithmus

Nach der Ist-Analyse wird das RSTAB-Rechenmodell erstellt, um die Schnittgrößen und Anschlussbedingungen zu ermitteln. Die Schnittgrößen dienen dem Festigkeitsnachweis der neuen Stäbe. Gleichzeitig wird überprüft, ob die neuen Schnittgrößen nicht wesentlich von denen in den Statikunterlagen zum Gerät abweichen, da sonst die gesamte Baugruppe neu bemessen werden muss. Die Anschlussbedingungen werden bei der Montage und Vorspannung des Aufnahmebandauslegers benötigt.

Parallel wird die Querschnittstragfähigkeit der alten Stäbe untersucht um einen Ausgangspunkt für die Bemessung der neuen Stäbe zu erhalten (siehe Kapitel 4.1.1). Sind die neuen Stäbe bemessen, stehen mehrere mögliche Stabprofile zur Verfügung, von denen

das optimale Profil ausgewählt wird. Im Anschluss werden die Stäbe geometrisch angepasst, da aufgrund der Größe des Stabprofils die Länge abgeändert werden muss. Es besteht dabei entweder Bauraum für einen längeren Stab, oder er muss aufgrund von Kollisionen mit anderen Bauteilen oder unzureichendem Platz für Schweißnähte und Montagearbeiten verkürzt werden. Das zieht Massen- und Querschnittstragfähigkeitsänderungen nach sich, welche keine signifikanten Auswirkungen zeigen, jedoch die in Kapitel 4.1.1 aufgestellten Bedingungen verletzen können. Aus diesem Grund wird ein zyklischer Optimierungsalgorithmus verwendet.

4.1.1 Beschreibung der konstruktiven Änderungen

Die Neuprofilierung der Stäbe in den Stabwerksverbänden mit der Verstärkung der oberen Querverbände erfolgt in Absprache mit dem Sachverständigen der Prüfstelle für Tagebaugeräte. Es werden für die Neuprofilierung der Verbände am Aufnahmebandausleger folgende Rahmenbedingungen gestellt:

- Die Masse der Stäbe bleibt annähernd gleich

$$m_{\text{neu}} \approx m_{\text{alt}}$$

- Die Tragfähigkeit der Querschnitte ist gleich oder höher

$$N_{b,Rd,neu} \geq N_{b,Rd,alt}$$

Die neuen Stabprofile sind in Tabelle 4.1 dargestellt.

Tabelle 4.1: Gegenüberstellung alter und neuer Stäbe

Stab-Nr.	Alter Stab	Neuer Stab
O₁ - O₈	L EN 10056-1 - 120 x 120 x 11 x 2650 - S355J2H - Hohlprofil	Hohlprofil DIN EN 10210 - 120 x 120 x 11 x 2650 - S355J2H
U₂ - U₈	L EN 10056-1 - 80 x 80 x 8 x 2650 - S355J2H - Hohlprofil	Hohlprofil DIN EN 10210 - 80 x 80 x 8 x 2650 - S355J2H
D_{o,1}	L EN 10056-1 100 x 100 x 10 x 2140 - S235JRH - Hohlprofil	Hohlprofil DIN EN 10210 - 100 x 100 x 10 x 2140 - S355J2H
D_{o,2} - D_{o,8}	L EN 10056-1 100 x 100 x 10 x 2420 - S235JRH - Hohlprofil	Hohlprofil DIN EN 10210 - 100 x 100 x 10 x 2420 - S355J2H
D₀	L EN 10056-1 - 80 x 80 x 8 x 1039 - S235JRH - Kreuzprofil	Rundrohr EN 10220 - 114,3 x 7,1 x 1039 - S235JRH
D_{1,u}	L EN 10056-1 - 80 x 80 x 8 x 1291 - S235JRH - Kreuzprofil	Rundrohr EN 10220 - 114,3 x 7,1 x 1291 - S235JRH
D_{1,o}	L EN 10056-1 - 60 x 60 x 6 x 1360 - S235JRH - Kreuzprofil	Rundrohr EN 10220 - 82,5 x 5,4 x 1360 - S235JRH
D₂ - D₈	L EN 10056-1 - 60 x 60 x 6 x 3030 - S235JRH - Kreuzprofil	Rundrohr EN 10220 - 82,5 x 5,6 x 3060 - S235JRH
D_{u,1}	L EN 10056-1 - 70 x 70 x 7 x 1600 - S235JRH - Parallelprofil	Rundrohr EN 10220 - 127 x 4,5 x 1595 - S235JRH
D_{u,2}-D_{u,7}	L EN 10056-1 - 70 x 70 x 7 x 2780 - S235JRH - Parallelprofil	Rundrohr EN 10220 - 133 x 4 x 3070 - S235JRH
D_{u,8}	L EN 10056-1 - 70 x 70 x 7 x 2780 - S235JRH - Parallelprofil	Rundrohr EN 10220 - 133 x 4 x 3010 - S235JRH
V_{o,1}	L EN 10056-1 100 x 100 x 10 x 1480 - S235JRH - Hohlprofil	Hohlprofil DIN EN 10210 - 100 x 100 x 10 x 1480 - S235JRH
V_{o,2}-V_{o,8}	L EN 10056-1 100 x 100 x 10 x 1500 - S235JRH - Hohlprofil	Hohlprofil DIN EN 10210 - 100 x 100 x 10 x 1500 - S235JRH
V_{u,1}	L EN 10056-1 - 70 x 70 x 7 x 1890 - S235JRH - Parallelprofil	Rundrohr EN 10220 - 108 x 5,4 x 1998 - S235JRH
V_{u,2}-V_{u,7}	L EN 10056-1 - 60 x 60 x 6 x 1850 - S235JRH - Standardprofil	Rundrohr EN 10220 - 60,3 x 3,6 x 1986 - S235JRH

Betrachtet wird dabei nur eine Seitenscheibe. Die gleiche Neuprofilierung gilt jedoch auch für die jeweils symmetrischen Stäbe. Die Profile der alten Stäbe basieren nicht auf den in Tabelle 4.1 angegebenen Normen, entsprechen diesen geometrisch aber annähernd. Gleiches gilt für den Werkstoff.

Die konstruktiven Änderungen, aber auch der Rest der Baugruppen des Aufnahmebandauslegers, werden in drei Zeichnungen dokumentiert. Diese Zeichnungen dienen als Fertigungsunterlagen für die Ausschreibung des Fertigungsauftrags des Aufnahmebandauslegers an eine externe Firma. Eine Übersicht über die Zeichnungen ist in Tabelle 4.2 dargestellt.

Tabelle 4.2: Übersicht der angefertigten Zeichnungen

Zeichnungsnummer	Blätter	Benennung	Beschreibung
M181_BW810	3	Gerüst Teil 1	Zusammenbauzeichnung und Einzelteile
M182_BW810	2	Gerüst Teil 2	Zusammenbauzeichnung und Einzelteile
M183_BW810	2	Gerüst Teil 3	Zusammenbauzeichnung und Einzelteile

Sämtliche Zeichnungen wurden mit dem CAD System Microstation V8i erstellt. In den nachfolgenden Kapiteln wird Bezug auf diese Zeichnungen genommen, die in Z4, Z5 und Z6 hinterlegt sind. Mit z.B. M-181_132 ist das Bauteil 132 aus Zeichnung M181_BW810 zu identifizieren. Die Stücklisten sind den Zeichnungen beigelegt.

4.1.2 Modell und Simulation

Ziel der Baugruppensimulation ist die Schaffung eines Rechenmodells, das die genauen Schnittkräfte in den Stäben des Stabwerks ausgeben kann. Aufbauend auf diesen Werten können Nachweise zur Überarbeitung der Baugruppe geführt werden.

Für die genaue Beschreibung der Baugruppe mittels der Simulationssoftware RSTAB werden die Knoten des Stabwerks neu durchnummeriert (vgl. Abb. 4.2).

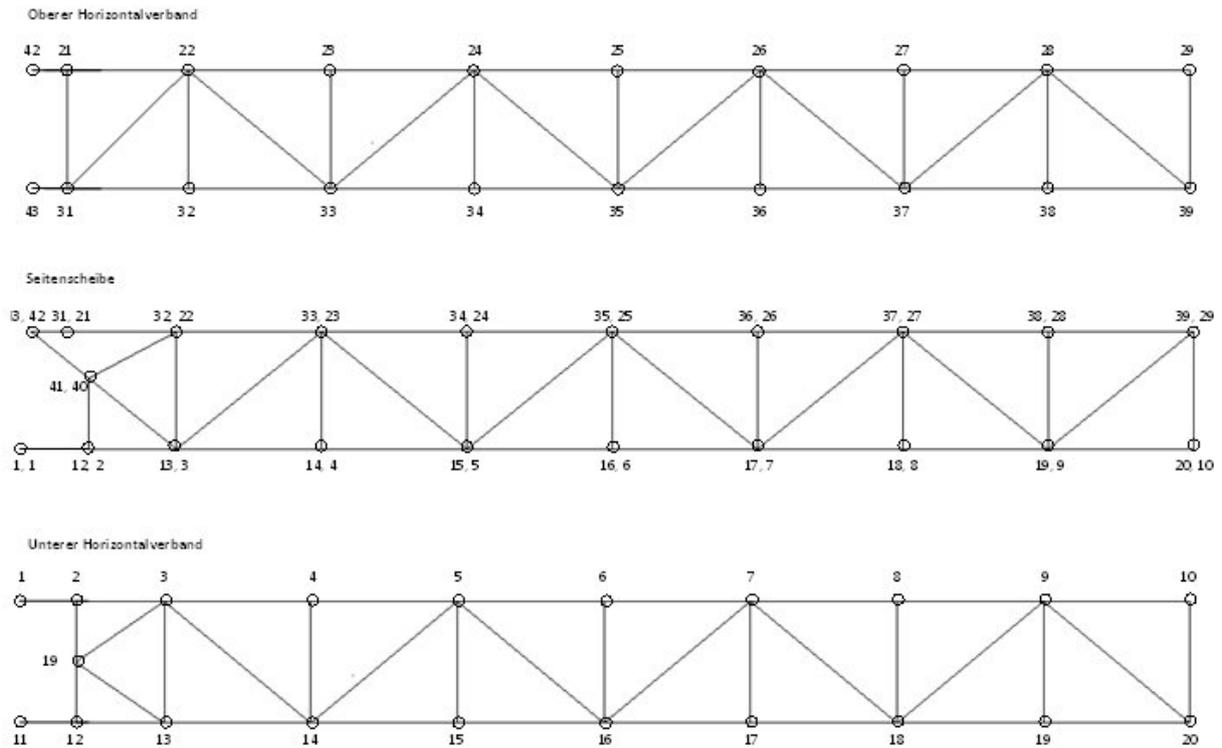


Abb. 4.2: Knotenplan

Die Bezeichnung der Stäbe ist in Abb. 4.3 dargestellt.

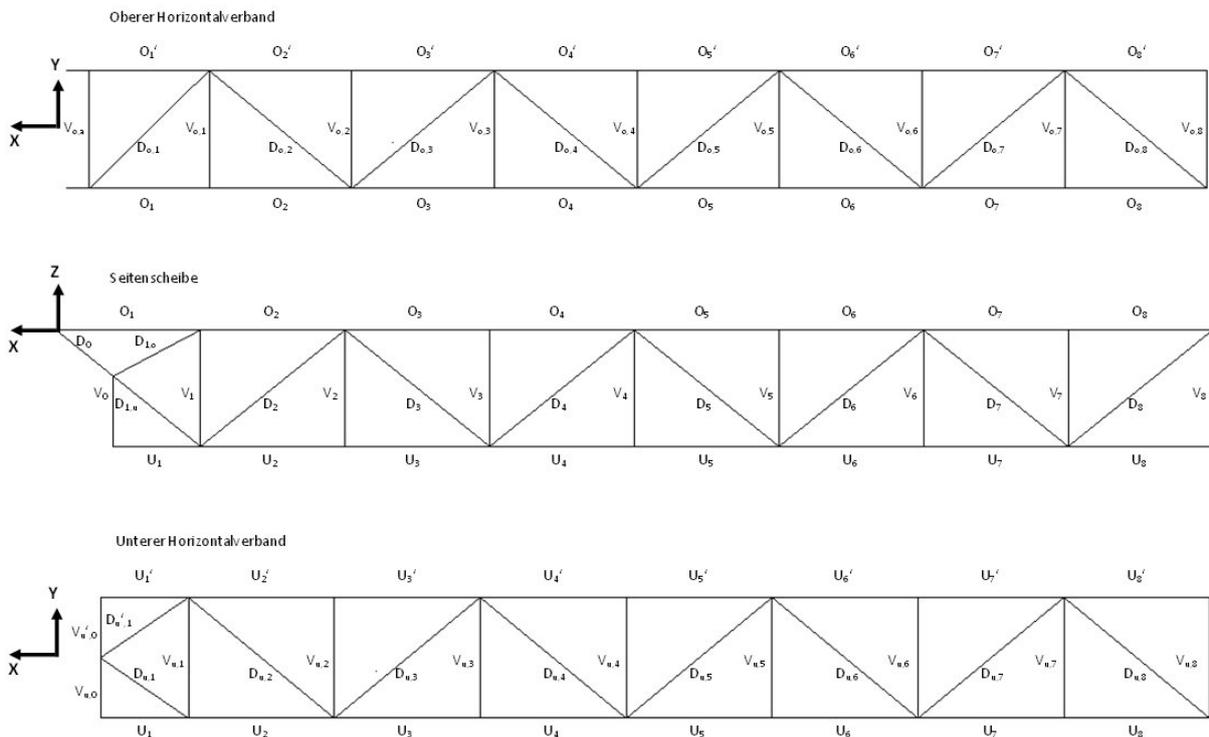


Abb. 4.3: Stäbeplan

Mit dieser Bezeichnungshierarchie, mit Hilfe der originalen Zeichnungsunterlagen und der Simulationssoftware RSTAB wird ein 3D Modell bestehend aus Stäben, Knoten und Lagerbedingungen abgeleitet, das in Abbildung 4.4 dargestellt ist

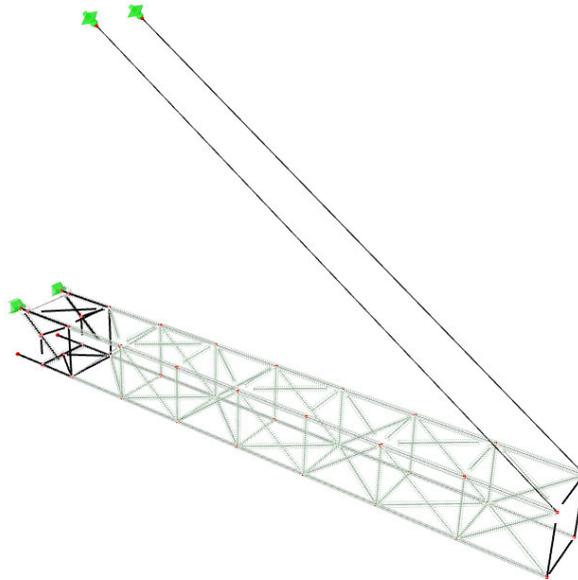


Abb. 4.4: RSTAB-Modell

Das Modell stellt das Aufnahmebandvorderteil dar. Die vom Aufnahmebandhinterteil resultierenden Lasten werden gemäß den Statik-Originalunterlagen am Modell angetragen. Gemäß Kapitel 3.1.1 wird der Torsionskörper mit Fachwerkstäben ausgebildet. Die Querrahmen und die Stäbe zwischen Lager und Knotenscheibe 1 werden als Balkenstäbe definiert. Die Stäbe, die das Gerüst Teil 2 mit dem oberen Lager am Oberbau verbinden, werden als Seilstäbe definiert. Während Balkenstäbe Kräfte und Momente aufnehmen und weiterleiten, können Fachwerkstäbe nur Normalkräfte aufnehmen und weiterleiten. Seilstäbe nehmen nur Zugbelastung auf, und leiten diese im vorliegenden Anwendungsfall in die oberen Lager weiter.

Zur Ermittlung der Stabkräfte innerhalb der Baugruppe werden Lastannahmen getroffen, die auf die einzelnen Knoten einwirken. Nach [17, S. 15] wird zwischen ständigen, veränderlichen und außergewöhnlichen Lasten unterschieden.

Zu den ständigen Lasten gehören die Eigenlasten der Unterbaugruppen:

- Stahlbautragkonstruktion Gerüst Teil 1 + Teil 2
- Laufsteg
- Fördergutführung
- Tragrollen A
- Tragrollen B
- Tragrollen C
- Fördergurt
- E-Gewicht
- Gewicht aus Aufnahmeband-Hinterteil
- Gurtlenkvorrichtung
- Außengurtreiniger
- Antriebstrommel
- Antrieb
- Antriebsverlagerung
- Aufhängung
- Laufsteg-Übergang
- Übergabeschurre

Zu Veränderliche Lasten zählen:

- Wind senkrecht (80)
- Wind senkrecht (25)
- Fördergut
- Massenkräfte
- Neigung 10%
- Neigung 5%
- Neigung 3%
- Bandzug
- Verkrustung

Auf eine Betrachtung des Lastfalls „Wind parallel (80)“ wird verzichtet und stattdessen der wesentlich betragsreichere Lastfall „Wind senkrecht (80)“ angenommen. Ebenso wird entgegen der TGL 13472-1974 auf eine Betrachtung von gleichzeitiger Längs- und Querneigung verzichtet, da dies in den Altstatik-Unterlagen so vorgesehen ist.

Außergewöhnliche Lasten sind:

- Verstopfte Schurre (HZ)
- Verstopfte Schurre (S)
- Einseitiges Aufliegen des Auslegers (S)

Die Lastannahmen zum Eigengewicht der Stahlbautragkonstruktionen Gerüst Teil 1 und Teil 2 werden den veränderten Gegebenheiten angepasst. Dabei wird das Gewicht sämtlicher Bauteile auf die jeweiligen Knoten aufgeteilt, auf die sie einwirken. In Tabelle 4.3 ist die Lastverteilung durch das Eigengewicht dargestellt.

Tabelle 4.3: Knotenlasten aus Eigengewicht

Knoten	P_z [kN]	Knoten	P_z [kN]
1	-0,6	22	-2,1
2	-2,1	23	-1,3
3	-2,9	24	-2,2
4	-1,2	25	-1,3
5	-1,7	26	-2,3
6	-1,2	27	-1,3
7	-1,8	28	-2,2
8	-1,3	29	-0,9
9	-1,8	30	-0,5
10	-3,5	31	-2,5
11	-0,6	32	-1,2
12	-1,6	33	-2,2
13	-3,2	34	-1,3
14	-1,7	35	-2,2
15	-1,3	36	-1,4
16	-1,7	37	-2,2
17	-1,4	38	-1,3
18	-1,8	39	-1,4
19	-1,3	40	-0,4
20	-3,7	41	-0,4
21	-2,0	42-45	0

Die Knotenlasten der weiteren Lasten werden aus den Statik-Originalunterlagen übernommen, da die Konstruktion nach diesen Lastannahmen bemessen wurde.

Die Knotenlasten für den Lastfall Wind senkrecht (80) sind in Tabelle 4.4 dargestellt.

Tabelle 4.4: Knotenlasten aus Wind senkrecht (80)

Knoten	P_x [kN]	P_y [kN]	P_z [kN]
14-19,32-38	0	2,9	0
13	0	7,9	0
43	0	1,5	0
39	0	4,5	0
20	37,0	22,5	7,0
10	-37,0	0	-7,0

Tabelle 4.5 enthält die Knotenlasten für den Lastfall Wind senkrecht (25). Sie wurden aus den Knotenlasten aus dem Lastfall Wind senkrecht (80) abgeleitet.

Tabelle 4.5: Knotenlasten aus Wind senkrecht (25)

Knoten	P_x [kN]	P_y [kN]	P_z [kN]
14-19,32-38	0	0,9	0
13	0	2,5	0
43	0	0,5	0
39	0	1,4	0
20	11,5	7,0	2,2
10	-11,5	0	-2,2

Die Knotenlasten für die Lastfälle Fördergut und für die beiden Varianten von Verstopfte Schurre sind in den Tabellen 4.6, bzw. 4.7 und 4.8 dargestellt.

Tabelle 4.6: Knotenlasten aus Fördergut

Knoten	P_x [kN]	P_y [kN]	P_z [kN]
20	-14,4	0	-5,3
39	14,4	0	-8,1
29	14,4	0	-8,1
2,12	0	0	-4,2
3,13	0	0	-3,4
4-9,14-19	0	0	-5,1
20	0	0	-2,8
10	0	0	-2,8
10	-14,4	0	-5,3

Tabelle 4.7: Knotenlasten aus Verstopfte Schurre (Hz)

Knoten	P_x [kN]	P_y [kN]	P_z [kN]
29	48,4	0	-27,4
20	-48,4	0	-0,5
39	48,4	0	-27,4
10	-48,4	0	-0,5

Tabelle 4.8: Knotenlasten aus Verstopfte Schurre (S)

Knoten	P_x [kN]	P_y [kN]	P_z [kN]
10	-66,4	0	-5,7
29	66,4	0	-37,4
39	66,4	0	-37,4
20	-66,4	0	-5,7

Alle weiteren Lastfälle sind Lastkombinationen aus den bereits genannten Lastfällen.

Die mittels des RSTAB-Modells errechneten resultierenden Stabkräfte sind in Anlage A1 dargestellt. Zum Vergleich sind die bereits in den Originalunterlagen vorliegenden Stabkräfte in Anlage A2 hinterlegt. Die Berechnung der Stabkräfte wird mit der Theorie 1. Ordnung geführt, da von keinen großen Verformungen ausgegangen wird. Eine Vergleichsrechnung nach der Theorie 2. Ordnung ergibt abweichende Ergebnisse von bis zu 1%.

Die Differenzen zwischen den in Anlage A1 und A2 hinterlegten Stabkräften sind unter anderem auf die veränderte Eigengewichtssituation zurückzuführen. In wenigen Ausnahmefällen weicht dadurch das Ergebnis der RSTAB-Berechnung von den

Schnittkräften in den Statikunterlagen ab. Aufgrund der weitgehenden Übereinstimmung der Schnittgrößen wird das RSTAB-Modell als funktionsfähig angesehen.

Mit den Schnittkräften, die mit Hilfe der RSTAB-Simulationssoftware ermittelt wurden, werden in Kapitel 4.1.3 die neuen Stabquerschnitte bemessen.

Notwendig für die Montage des Aufnahmebandauslegers sind außerdem die Anschlusskräfte der Baugruppen an den Oberbau des Bandwagens. Der Aufnahmebandausleger ist über zwei Knotenlager und zwei Seileinspannungen am Oberbau gelagert. Diese Lager werden wie in Abbildung 4.5 und 4.6 dargestellt mit A, A', S und S' bezeichnet.

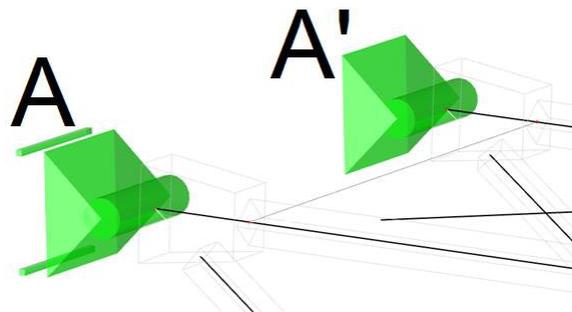


Abb. 4.5: RSTAB-Darstellung Gelenklager

A und A' sind Axiallager, die eine Winkelauslenkung des Aufnahmebandauslegers ermöglichen und dieser somit seine Betriebsposition über Einstellung der Seilspannung anfahren kann. Damit die Baugruppe statisch bestimmt ist, ist A ein Loslager. Die an diesen Lagern auftretenden Kräfte werden mit A_H bzw. A_H' für horizontale Auflagerreaktion, A_V bzw. A_V' für vertikale Auflagerreaktion und A_Q für die an A' reagierende Querkraft des Lagers bezeichnet

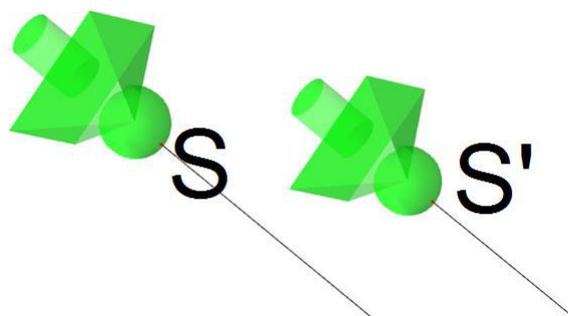


Abb. 4.6: RSTAB-Darstellung Seillager

S und S' sind Lager für die Stahlseile, die über eine Traverse zwischen Aufnahmebandvorderteil und -hinterteil befestigt sind. Da die Stahlseile nur Zugkräfte übertragen können ist die Belastung an diesen Lagern eindimensional.

Diese Auflagerreaktionen werden ebenfalls durch das RSTAB-Modell ermittelt und sind als Anschlussbedingungen in den Tabellen 4.10, 4.11 und 4.12 dargestellt. Die einzelnen Tabellen geben dabei die Anschlussbedingungen zu verschiedenen Betriebszuständen des Aufnahmebandauslegers wieder: Nullstellung (0° Neigung), Betriebsstellung ($3,5^\circ$ Neigung) und Reparaturstellung (17° Neigung).

Tabelle 4.10: Auflagerreaktionen Nullstellung

	A_V [kN]	A_V' [kN]	A_H [kN]	A_H' [kN]	A_Q' [kN]	S [kN]	S' [kN]
H normaler Betr.	-56,9	-109,7	157,3	305,9	11,7	281,0	283,7
H_z extrem. Betr.	-64,2	-92,5	56,1	501,3	34,7	338,2	341,3
H_z außer Betr.	-76,7	-37,2	-443,0	762,4	93,6	193,5	196,0
S Verst. Schurre	-62,4	-90,7	80,6	525,6	34,7	367,9	371,2
S Ausleger aufl.	-69,0	-97,5	9,0	454,2	34,7	281,0	283,7

Für die Ermittlung der Auflagerreaktionen in Betriebsstellung und Reparaturstellung wird das RSTAB-Modell modifiziert. Die Positionen der einzelnen Knotenscheiben in den einzelnen Auslegerstellungen werden dabei entsprechend der Neigung der Baugruppe geometrisch ausgerechnet (vgl. Abb. 4.7).

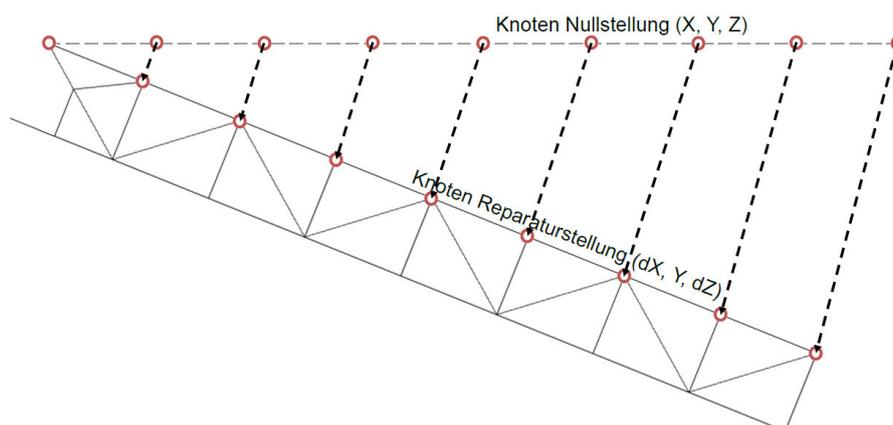


Abb. 4.7: Knotenverschiebung im Rechenmodell

Tabelle 4.11: Auflagerreaktionen Betriebsstellung

	A_V [kN]	A_V' [kN]	A_H [kN]	A_H' [kN]	A_Q' [kN]	S [kN]	S' [kN]
H normaler Betr.	-47,3	-91,6	151,2	299,5	11,7	284,2	286,8
H_z extrem. Betr.	-60,2	-63,3	48,9	493,4	34,7	342,0	345,1
H_z außer Betr.	-101,5	6,7	-446,6	757,3	93,6	195,7	198,1
S Verst. Schurre	-56,9	-60,0	72,7	517,1	34,7	372,0	375,3
S Ausleger aufl.	-67,8	-71,1	3,0	447,6	34,7	284,2	286,8

Tabelle 4.12: Auflagerreaktionen Reparaturstellung

	A_V [kN]	A_V' [kN]	A_H [kN]	A_H' [kN]	A_Q' [kN]	S [kN]	S' [kN]
H normaler Betr.	-49,5	30,8	168,8	220,2	11,7	293,6	296,1
H_z extrem. Betr.	-175,0	190,6	155,9	312,5	34,8	353,5	356,5
H_z außer Betr.	-564,7	536,2	-79,3	347,7	93,7	202,3	204,7
S Verst. Schurre	-166,8	198,8	176,5	333,0	34,8	384,5	387,7
S Ausleger aufl.	-192,2	173,3	116,2	272,9	34,8	293,6	296,1

Den Tabellen 4.10 bis 4.12 entsprechend werden die Auflagerkräfte an den Gelenklagern A und A' mit zunehmender Neigung der Baugruppe geringer, während die Seillast zunimmt.

Vergleicht man die mit RSTAB ermittelten Anschlusskräfte mit den Anschlusskräften in den Statikunterlagen, fällt auf, dass diese die Seile betreffend bis zu 5% abweichen und die Gelenklager betreffend, bis zu 10% abweichen. Deshalb ist es notwendig, die Bolzen in den Gelenklagern gesondert nachzuweisen.

Ursachen für Unterschiede zwischen ermittelten Anschlusskräften und Originalanschlusskräften entstehen durch die neue Eigengewichtssituation.

4.1.3 Nachweis der Lagerbolzen

Um die Tragfähigkeit der Bolzen nachzuweisen, werden diese auf die Versagenskriterien Abscherung, Lochleibung und Biegung hin untersucht. Diese Nachweise werden nach [8, S. 40 f.] durchgeführt. Zunächst wird das System dargestellt (vgl. Abb. 4.8).

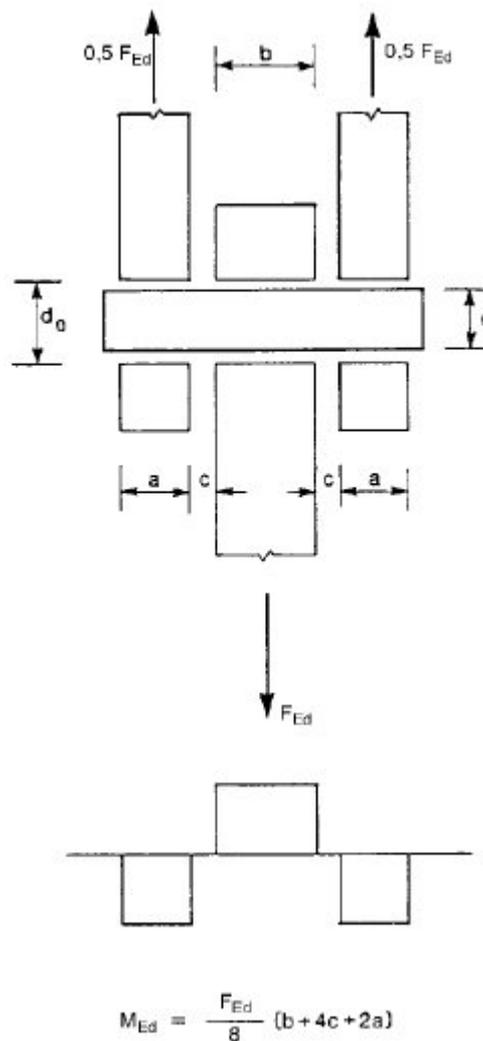


Abb. 4.8: Biegemoment in einem Bolzen

Zum Nachweis gegen Versagen durch Abscherung wird folgender Vergleich durchgeführt:

$$F_{v,Rd} = 0,6 * \frac{A * f_{up}}{\gamma_{M2}} \geq F_{v,Ed}$$

$F_{v,Rd}$... Bemessungswert der Abscherungsfestigkeit

$F_{v,Ed}$... Bemessungswert der einwirkenden Kraft

A ... Querschnitt des Bolzens

f_{up} ... Bruchfestigkeit des Bolzens

γ_{M2} ... Teilsicherheitsbeiwert

Der Wert für die angreifende Kraft $F_{v,Ed}$ ist Tabelle 4.10 entnommen. Außer Betrieb wird das Lager A_H' maximal belastet.

$$F_{v,Ed} = 762,4 \text{ kN}$$

Der Querschnitt des Bolzens wird mit Durchmesser d als Zylinderquerschnitt berechnet:

$$A = \frac{\pi}{4} * d^2 = \frac{\pi}{4} * (140 \text{ mm})^2 = 15.394 \text{ mm}^2$$

Die Zugfestigkeit ergibt sich aus den Werkstoffdaten vom Bolzenwerkstoff C45+N:

$$f_{up} = 560 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

[9, S. 2]

Der Teilsicherheitsbeiwert γ_{M2} wird [8, S. 21] entnommen:

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

Der Bemessungswert der Abscherungsfestigkeit ist höher als der Bemessungswert der einwirkenden Kraft. Somit ist die Bolzenverbindung gegen Abscheren nachgewiesen:

$$F_{v,Rd} = 4.137.907 \text{ N} \geq 762.381 \text{ N}$$

Um die Bolzenverbindung gegen Versagen durch Lochleibung nachzuweisen, wird folgender Vergleich durchgeführt:

$$F_{b,Rd} = 1,5 * \frac{t * d * f_y}{\gamma_{M0}} \geq F_{b,Ed}$$

$F_{b,Rd}$... Bemessungswert der Lochleibungsfestigkeit von Augenblechen und Bolzen

$F_{b,Ed}$... Bemessungswert der einwirkenden Kraft

f_y ... Streckgrenze der Augenbleche

t ... Dicke des Augenstablechs

γ_{M0} ... Teilsicherheitsbeiwert

Während der Bemessungswert der einwirkenden Kraft bei diesem Nachweis gleich bleibt, wird ein anderer Teilsicherheitsbeiwert gewählt und die Dicke der Augenstableche fließt mit in die Rechnung ein:

$$t = 20 \text{ mm}$$

$$\gamma_{M0} = 1,0$$

Die Streckgrenze der Augenbleche ergibt sich aus deren Werkstoffdaten. Der Augenblechwerkstoff ist S235JR+AR.

$$f_y = 235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Die Tragfähigkeit gegen Versagen durch Lochleibung ist nachgewiesen, da die Vergleichsbedingung erfüllt wird:

$$F_{b,Rd} = 987 \text{ kN} \geq 762,4 \text{ kN}$$

Sollten die Augenbleche im Betrieb dennoch kurzfristig versagen, wird ein Vergütungsstahl als Augenblechwerkstoff empfohlen, um die Tragfähigkeit zu erhöhen.

Die Tragfähigkeit des Bolzens ist gegen Biegung mit der Erfüllung der nachstehenden Gleichung nachgewiesen.

$$M_{Rd} = 1,5 * \frac{W_{el} * f_{yp}}{\gamma_{M0}} \geq M_{Ed}$$

M_{Rd} ... Bemessungswert der Momententragfähigkeit

M_{Ed} ... Bemessungswert des einwirkenden Momentes

W_{el} ... elastisches Widerstandsmoment

f_{yp} ... Streckgrenze des Bolzens

Der Bemessungswert des einwirkenden Biegemomentes muss berechnet werden.

$$M_{Ed} = \frac{F_{Ed}}{8} * (b + 4c + 2a) = 25,3 \text{ kNm}$$

F_{Ed} ist die einwirkende Kraft. Die Abmessungen a, b und c sind in Abb. 4.8 angetragen.

$$a = 20 \text{ mm}; b = 220 \text{ mm}; c = 2,5 \text{ mm}$$

Weiterhin muss das elastische Widerstandsmoment bestimmt werden:

$$W_{el} = \frac{\pi * d^3}{32} = 269.392 \text{ mm}^3$$

Die Streckgrenze des Bolzens beträgt nach /9, S. 2/:

$$f_{yp} = 275 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Somit kann die Tragfähigkeit der Bolzen nachgewiesen werden:

$$M_{Rd} = 111,1 \text{ kNm} \geq 25,3 \text{ kNm}$$

4.1.4 Nachweis der neuen Stabprofile

Nachfolgend werden die vorgenommenen Neuprofilierungen am Stabwerk auf aus Druckbeanspruchung resultierendem Biegeknicken und auf Zugtragfähigkeit nachgewiesen. Außerdem erfolgen ein Schweißnahtnachweis und ein Ermüdungsfestigkeitsnachweis. Es wird zunächst der jeweilige Rechenalgorithmus erläutert. Im Anschluss werden die Ergebnisse dargestellt. Aufgrund der Größenordnung der Ergebnisse werden sämtliche Kraftgrößen auf kN mit einer Nachkommastelle gerundet.

4.1.4.1 Biegeknicen in Folge von Druckbeanspruchung

Maßgebend für die Stabilität ist die Biegeknickbeanspruchbarkeit der einzelnen Stäbe. Mittels des Algorithmus aus [10, S. 61 f.] wird die Berechnung der Knickstabilität durchgeführt. Zunächst wird der Knickfall nach Euler bestimmt (vgl. Abb. 4.9).

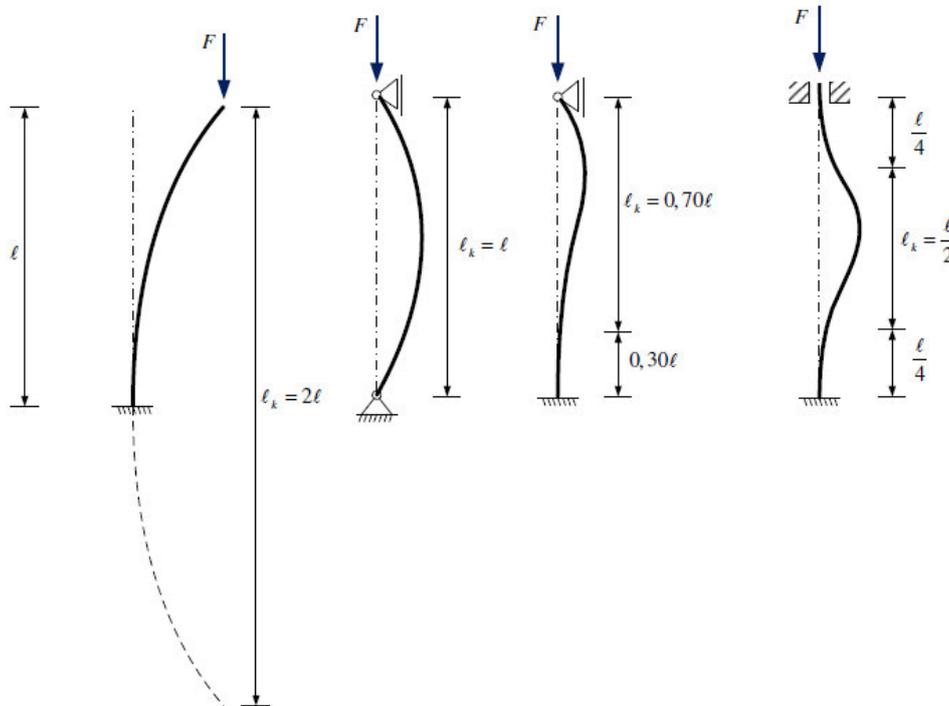


Abb. 4.9: Knickfälle nach Euler

Bei allen Stäben im Stabwerk handelt es sich nach Abbildung 4.9 um Knickfall 2 von links. Demnach ist die Knicklänge L_{CR} gleich der Stablänge L . Mittels der Knicklänge L_{CR} , dem E-Modul für Stahl (210.000 N/mm^2) und dem Flächenträgheitsmoment I , bezogen auf die schwächste Querschnittsbiegeachse, wird die ideale Verzweigungslast N_{CR} berechnet:

$$N_{CR} = \frac{\pi^2 * E * I}{l_{CR}^2}$$

Mit der idealen Verzweigungslast N_{CR} , sowie der Streckgrenze des Stabwerkstoffs f_y und dem Stabquerschnitt A wird der Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}$ bestimmt:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{CR}}}$$

Der Schlankheitsgrad λ fließt in die Funktion zur Bestimmung des Abminderungsfaktors ein.

Φ ... Funktion zur Bestimmung des Abminderungsfaktors

X ... Abminderungsfaktor

$$\Phi = \frac{1 + [\alpha * (\bar{\lambda} - 0,2)] + \bar{\lambda}}{2}$$

Für diese Funktion wird noch der Imperfektionsbeiwert α benötigt. Der Imperfektionsbeiwert resultiert aus der Knicklinie des Stabes. Die Knicklinie wiederum wird über den Stabquerschnitt, die Stababmessungen, die Knickachse und den Werkstoff ermittelt. Dies geschieht entsprechend Abbildung 4.10:

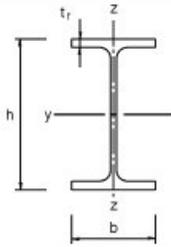
Querschnitt	Begrenzungen	Ausweichen rechtwinklig zur Achse	Knicklinie	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
gewalzte I-Querschnitte 	$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	a a ₀
			$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	b c
	$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$		y-y z-z
			$t_f > 100 \text{ mm}$	d d
Geschweißte I-Querschnitte 	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z		b c
	$t_f > 40 \text{ mm}$	y-y z-z	c d	c d
Hohlquerschnitte 	warmgefertigte	jede	a	a ₀
	kaltgefertigte	jede	c	c
Geschweißte Kastenquerschnitte 	allgemein (außer den Fällen der nächsten Zeile)	jede	b	b
	dicke Schweißnähte: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	jede	c	c
U-, T- und Vollquerschnitte 		jede	c	c
L-Querschnitte 		jede	b	b

Abb. 4.10: Knicklinienbestimmung

Bei allen betrachteten Stäben handelt es sich um die Knicklinie b. Somit ergibt sich mit Abbildung 4.11 der entsprechende Wert für α .

Knicklinie	a_0	a	b	c	d
Imperfektionsbeiwert α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Abb. 4.11: Bestimmung Imperfektionsbeiwert

$$\alpha = 0,34$$

Die Knicklinien stellen den Zusammenhang zwischen Abminderungsfaktor X und Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}$ her, was Abbildung 4.12 verdeutlicht.

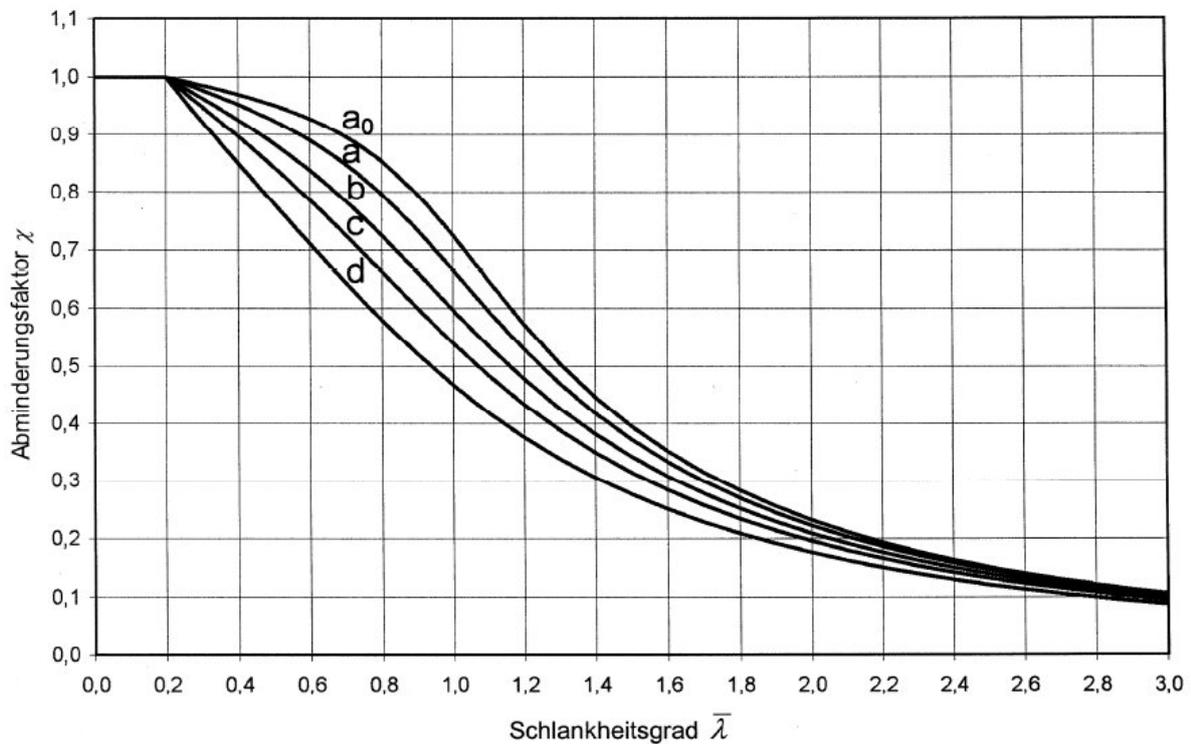


Abb. 4.12: Knicklinien

Der Abminderungsfaktor X ergibt sich nach folgender Formel:

$$X = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

Mit dem Abminderungsfaktor X , dem Stabquerschnitt A , der Streckgrenze f_y und dem Teilsicherheitsbeiwert γ_{M1} ($=1,0$) kann der Bemessungswert der Biegeknickbeanspruchbarkeit von druckbelasteten Bauteilen bzw. die Druckbeanspruchbarkeit $N_{b,Rd}$ berechnet werden:

$$N_{b,Rd} = \frac{X * A * f_y}{\gamma_{M1}}$$

Mit diesem Berechnungsalgorithmus ergeben sich für die Druckstäbe die in Tabelle 4.13 dargestellten Druckbeanspruchbarkeiten. Dabei werden teilweise auch Zugstäbe betrachtet, die unter bestimmten Bedingungen Druckkräfte aufnehmen. Die Masse des Stabes soll für den späteren Vergleich mit den neuen Stäben herangezogen werden.

Tabelle 4.13: Druckbeanspruchbarkeiten und Massen der alten Stäbe

Stab-Nr.	$N_{b,Rd}$ [kN]	m [kg]
D₂, D₅	-122,0	33
D₇	-209,2	45
D_{u,1}	-386,0	24
D_{u,4}, D_{u,5}, D_{u,6}, D_{u,7}, D_{u,8}	-289,5	41
V_{u,2}, V_{u,3}, V_{u,4}, V_{u,5}, V_{u,7}	-88,4	10

Die Neuprofilierung erfolgt mit Rohrprofilen. Die Verbände im Obergurt werden mit quadratischen Hohlprofilen ersetzt. Die geometrischen Hohlprofile entsprechen den Abmessungen der Vorgängerstäbe, weshalb der Bemessungswert für die Biegebeanspruchbarkeit $N_{b,Rd}$ unverändert bleibt. Nachfolgend wird daher auf einen gesonderten Nachweis der Hohlprofile verzichtet.

Für die Rohrprofile werden Querschnitte nach EN 10220-2002 zur Bemessung ausgewählt. Als Auswahlmöglichkeit werden sämtliche Außendurchmesser von 60,3 mm bis 133,0 mm festgelegt. Als Wandstärke wird 3,0 mm bis 36,0 mm festgelegt. Somit wird ein breites Auswahlpektrum dargestellt, das im Verlauf der Rechnung an keine Grenzen stößt.

Es wird eine Matrix aus den gewählten Grenzen aufgespannt, in der der Algorithmus durchgeführt wird. Das Ergebnis ist eine Matrize für den Bemessungswert der Biegeknickbeanspruchbarkeit $N_{b,Rd}$ sowie eine Matrize für die längenbezogene Masse des neuen Stabes. Anschließend erfolgt eine Gegenüberstellung der $N_{b,Rd}$ -Werte von Alt- und Neustab sowie ein Vergleich der längenbezogenen Masse. Daraus folgt eine Gruppe an möglichen Rohrprofilen für jeden Stab, die eingesetzt werden können.

Im Anschluss werden die Stäbe von der Länge her im 3D-Modell konstruktiv angepasst. Aus der Altkonstruktion ergeben sich knappe Überschlänge der Stäbe mit den Knotenblechen. Durch eine Verlängerung der Stäbe werden diese so nah wie möglich an die theoretischen Stabwerksknoten herangezogen, um einen Stabilitätsverlust durch die Knotenbleche zu vermeiden.

Die neuen verlängerten Stäbe werden von der Biegeknickbeanspruchbarkeit und der Masse nochmals mit der Originalvariante verglichen. Der Querschnitt, der dem alten Querschnitt von der absoluten Masse des Stabes her am ähnlichsten ist, wird als neuer Stab ausgewählt. Damit ergeben sich die in Tabelle 4.1 aufgelisteten Stäbe. Die ermittelten $N_{b,Rd}$ -Werte sind in Tabelle 4.14 aufgeführt.

Tabelle 4.14: Druckbeanspruchbarkeiten und Massen der neuen Stäbe

Stab-Nr.	$N_{b,Rd}$ [kN]	m [kg]
D₂, D₅	-169,5	33
D₇	-249,0	44
D_{u,1}	-388,6	22
D_{u,4}, D_{u,5}, D_{u,6}, D_{u,7}, D_{u,8}	-320,0	39
V_{u,2}, V_{u,3}, V_{u,4}, V_{u,5}, V_{u,7}	-94,7	10

In Tabelle 4.15 werden die in Anlage A1 hinterlegten maximalen Schnittkräfte dargestellt und die Tragfähigkeit bzw. Sicherheit berechnet. Dabei wird stets der ungünstigste Fall betrachtet.

Tabelle 4.15: Drucktragfähigkeit der neuen Stabquerschnitte

Stab-Nr.	$N_{b,Ed}$ [kN]	Tragfähigkeit [1]
D_2, D_5	-77,1	2,2
D_7	-106,1	2,3
$D_{u,1}$	-3,0	130,0
$D_{u,4}, D_{u,5}, D_{u,6}, D_{u,7}, D_{u,8}$	-32,8	9,8
$V_{u,2}, V_{u,3}, V_{u,4}, V_{u,5}, V_{u,7}$	-3,7	25,6

4.1.4.2 Zugtragfähigkeit

Bezüglich der Zugtragfähigkeit ist nach [10, S. 52] für den Bemessungswert der einwirkenden Normalkraft N_{Ed} an jedem Querschnitt folgender Nachweis zu erfüllen:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0$$

Für den Bemessungswert der Zugtragfähigkeit $N_{t,Rd}$ ist der Bemessungswert der plastischen Beanspruchbarkeit des Bruttoquerschnitts $N_{pl,Rd}$ anzusetzen.

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}}$$

Für den Teilsicherheitsbeiwert der Beanspruchbarkeit von Querschnitten bei Bruchversagen infolge Zugbeanspruchung γ_{M2} wird von [10, S. 48] der Wert 1,00 vorgeschlagen und verwendet.

Die Bemessungswerte der Zugtragfähigkeit für die neuen Stäbe, sowie die berechnungsgrundlegenden Querschnittswerte sind in Tabelle 4.16 dargestellt.

Tabelle 4.16: Zugbeanspruchbarkeiten und Querschnittsflächen der neuen Stäbe

Stab-Nr.	$N_{t,Rd}$ [kN]	A [mm²]
D₀, D_{1,u}	561,9	2.391
D'_{1,o}	307,4	1.308
D₃, D₄, D₆, D₈	317,9	1.353
D₈	428,8	1.825
D'_{u,1}	407,0	1.732
D_{u,2}, D_{u,3}, D_{u,5}, D_{u,7}, D_{u,8}	381,0	1.621
V_{u,1}	409,1	1.741
V_{u,6}	150,7	641

Nachfolgend sind in Tabelle 4.17 die maximalen Zugkräfte der einzelnen Stabgruppen aufgelistet.

Tabelle 4.17: Zugtragfähigkeit der neuen Stabquerschnitte

Stab-Nr.	N_{Ed} [kN]	Tragfähigkeit [1]
D'₀, D'_{1,u}	259,3	2,2
D'_{1,o}	72,7	4,2
D₃, D₄, D₆, D₈	75,8	4,2
D₈	119,8	3,6
D'_{u,1}	3,1	131,3
D_{u,2}, D_{u,3}, D_{u,5}, D_{u,7}, D_{u,8}	42,7	8,9
V_{u,1}	9,4	43,5
V_{u,6}	10,0	15,1

4.1.4.3 Schweißnahtnachweis

Nachfolgend soll die Tragfähigkeit der relevanten Schweißnähte nachgewiesen werden. Dazu wird zuerst der Algorithmus erläutert. Anschließend werden die relevanten Schweißnähte benannt und die Ergebnisse dargestellt.

Sämtliche Stabverbände sind mit umlaufenden Kehlnähten an Knotenblechen angeschlossen (vgl. Abb. 4.13).



Abb. 4.13: Umlaufender Kehlnahtanschluss an Knotenblech

Maßgebend für die Festigkeit in diesen Verbindungen sind die Parallel-Schubspannungen $\tau_{||}$ in der jeweiligen Schweißnaht (vgl. Abb. 4.14)

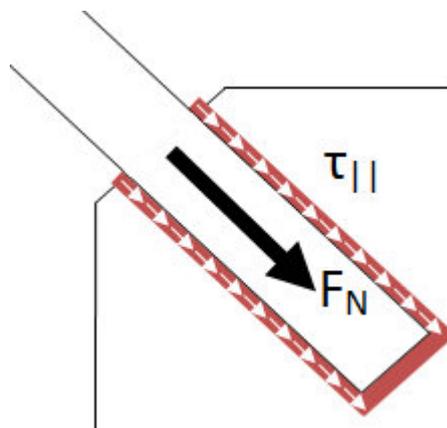


Abb. 4.14: Schubspannungen in umlaufender Kehlnaht

Nach [8, S. 47 f.] sind folgende Bedingungen für die Tragfähigkeit von Kehlnähten nach dem richtungsabhängigen Nachweisverfahren zu erfüllen:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w + \gamma_{M2}}$$

$$\sigma_{\perp} \leq 0,9 \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

f_u ... Zugfestigkeit des Schwächeren der angeschlossenen Bauteile

β_w ... Korrelationsbeiwert nach [8, S. 48]

Die Schubspannung τ_{\parallel} wird durch die nachfolgende Formel bestimmt.

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_N}{\sum a_i * l_{\text{eff},i}}$$

Als effektive Länge l_{eff} wird die Gesamtlänge der Naht abzüglich der Stirnseiten angenommen, da sich die Kehlnahtdicke a konstant verhält. Das Summationszeichen dient der Addition der einzelnen Nahtabschnitte. Es sind bei diesen Schweißanschlüssen rechnerisch je vier Nähte mit gleicher Länge vorhanden.

Die relevanten Schweißnähte der Neuprofilierung der Stäbe sind entsprechend den Statikunterlagen die Anschlüsse zwischen D_0 und Bauteil M-181_105, $D_{1,0}$ und Knotenblech sowie D_8 und Knotenblech. Die Ergebnisse zu den genannten Verbindungen sind in Tabelle 4.18 dargestellt. Als Normalkraft wird jeweils die nach Anlage A1 maximal auftretende Schnittkraft angenommen.

Tabelle 4.18: Nachweis der Tragfähigkeit der Schweißnähte

Stab	N_{Ed} [kN]	τ_{\parallel} [N/mm ²]	$\sqrt{3\tau_{\parallel}^2}$ [N/mm ²]	$\frac{f_u}{\beta_w + \gamma_{M2}}$ [N/mm ²]	Tragfähigkeit [1]
D'₀	259,3	50	86	176	2,03
D'_{1,0}	72,7	41	71	176	2,48
D₈	119,8	50	86	176	2,03

4.1.4.4 Ermüdungsfestigkeitsnachweis

Die Ermüdungsfestigkeit ist nachgewiesen, wenn die Dauerfestigkeit der maßgebenden Verbindungen in der Konstruktion nachgewiesen ist. Sind die maßgebenden Schweißnähte nachgewiesen, gilt die Konstruktion als Ermüdungsfest.

Die in Kapitel 4.1.4.3 untersuchten Schweißnähte werden auf Ermüdungsfestigkeit nachgewiesen. Dazu wird zunächst die Spannungsschwingbreite in den Schweißnähten ermittelt und im Anschluss der Ermüdungsfestigkeitsnachweis nach [11, S. 20 f.] geführt.

Ausgangspunkt für das Entstehen einer Spannungsschwingbreite sind die veränderlichen Lasten. Die Lastüberlagerung zur Berechnung der Spannungsschwingbreite ist in A3 hinterlegt.

Die für die nachzuweisenden Schweißnähte relevanten Spannungsschwingbreiten sind in Tabelle 4.19 dargestellt. Die Spalte $\Delta\tau_{E,2}$ beschreibt die Spannungsschwingbreiten in den Schweißnähten. Die Spalte $\Delta\tau_C$ beschreibt die aus dem zugehörigen Kerbfall resultierende Ermüdungsfestigkeit der Naht. Da in den Schweißnähten nur Schubspannungen auftreten, wird nach [11, S. 20] folgende Bedingung für die Dauerfestigkeit der Schweißnähte nachgewiesen:

$$\frac{\gamma_{Ff} * \Delta\tau_{E,2}}{\frac{\Delta\tau_C}{\gamma_{Mf}}} \leq 1,0$$

Die γ -Faktoren werden dabei nach [18, S. 85] mit $\gamma_{Ff} = 1,0$ und $\gamma_{Mf} = 1,0$ gewählt. Die dargestellten Stabkraftschwingbreiten werden nach der Schubspannungsberechnung aus 4.1.4.3 in Schubspannungsschwingbreiten $\Delta\tau$ umgerechnet. Dem vereinfachten Ermüdungslastmodell nach [18, S. 86] entspricht dieses $\Delta\tau$ dem benötigten $\Delta\tau_{E,2}$.

Tabelle 4.19: Ermüdungsnachweis der Schweißnähte

Stab	$\Delta\tau_{E,2}$ [N/mm ²]	$\Delta\tau_C$ [N/mm ²]	$\gamma_{Ff} * \Delta\tau_{E,2} / (\Delta\tau_C / \gamma_{Mf})$
D'₀	67,5	80	0,84
D'_{1,0}	12,6	80	0,16
D₈	16,2	80	0,20

4.2. FE-Analysen Knotenblech

Nachfolgend werden FE-Analysen zu einer Knotenblechverbindung mit ANSYS Workbench dargestellt. Ziel der FE-Analysen ist der Nachweis hochbeanspruchter Bauteile. Die Knotenbleche im Stabwerk sind einerseits hochbelastete Bauteile, andererseits werden sie in den Statikunterlagen zur Baugruppe nicht gesondert nachgewiesen. Deshalb sollen die Knotenbleche in verschiedenen FE-Analysen nachgewiesen werden.

Dazu wird das höchstbelastete Knotenblech der Baugruppe, Bauteil M-182_62, ausgewählt. Die Stäbe D_7 und D_8 wiesen die größten Stabkräfte auf. Die Festigkeit des an beide Stäbe anschließenden Knotenblechs wird mit einer statisch-mechanischen Analyse nachgewiesen. Nach [12, S. 839-851] sind Knotenbleche aufgrund ihrer, im Vergleich zu den Stabquerschnitten, signifikant geringeren Steifigkeiten einer erhöhten Gefahr des Bauteilversagens durch Knicken ausgesetzt. Deshalb wird das Knotenblech mit einer linearen Beulanalyse nachgewiesen.

Zunächst wird die Finite Elemente Methode an sich beschrieben und wichtige Begriffe, die im Zusammenhang mit den nachfolgenden Analysen stehen, werden definiert.

4.2.1 Finite Elemente Methode

Die Grundidee der Finite Elemente Methode ist die Beschreibung einer komplexen Geometrie z.B. hinsichtlich ihres Verformungsverhaltens durch die Zerlegung der Geometrie in einfache Teilbereiche. Dabei werden die Einzellösungen für die einfachen Teilbereiche aufsummiert, um das Gesamtsystem darzustellen. [13, S. 11 f.] Diese Zerlegung wird Vernetzung genannt. Aus der berechneten Verformung lassen sich weitere Größen wie z.B. die mechanische Spannung in der Geometrie ableiten. [13, S. 12] Um eine Verformung darzustellen ist die Eingabe von Randbedingungen notwendig. Diese Randbedingungen sind z.B. eine äußere Belastung oder eine Lagerung an bestimmten Abschnitten der Geometrie. Wichtige Begriffe bei der Durchführung einer FE-Analyse sind Konvergenz und Divergenz. Die FEM ist ein Näherungsverfahren, das je nach Qualität der Vernetzung der Geometrie verschieden genaue Lösungen liefert. Konvergenz bedeutet, dass trotz iterativer Netzverfeinerung die angebotene Lösung auf einen Grenzwert zustrebt (vgl. Abb. 4.15).

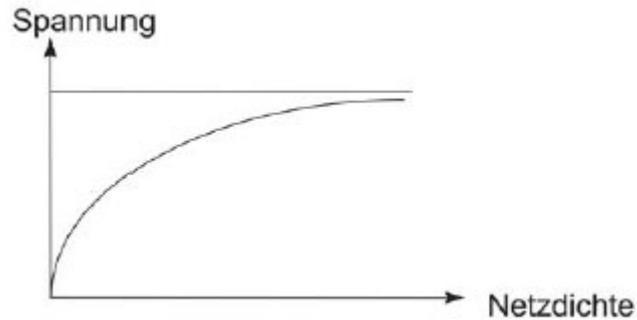


Abb. 4.15: konvergierende Lösung

Ist eine Lösung divergent, steigt sie mit zunehmender Netzverfeinerung ins Unendliche (vgl. Abb. 4.16)

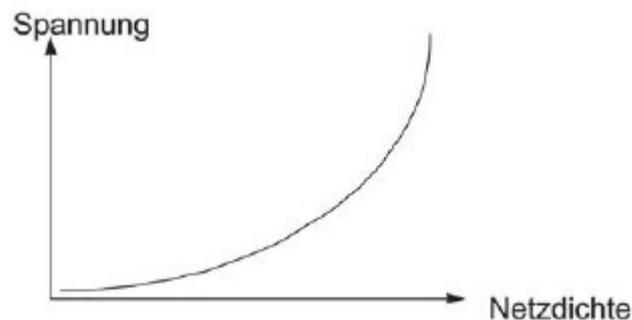


Abb. 4.16: divergierende Lösung

Gründe für die Divergenz einer Lösung liegen in der Wahl der Randbedingungen oder in Kerben in der Geometrie. Wird z.B. eine Punktlast auf die Geometrie als Randbedingung aufgetragen, entsteht im Ergebnisverlauf am Eingriffspunkt dieser Last eine sogenannte Singularität: Es wird ein Spannungswert berechnet, der im Vergleich zu den restlichen Spannungswerten innerhalb der Geometrie sehr hoch ist. Die Lösung divergiert an dieser Stelle. Ähnlich verhält es sich bei Kerben wie z.B. scharfen Kanten in der Geometrie. [13, S. 16 f.]

Um eine verlässliche Lösung mittels FE-Analysen zu generieren, ist die Anwendung des Algorithmus der adaptiven Netzverfeinerung vorgesehen. Bei der adaptiven Netzverfeinerung wird die Lösung des FE-Systems mit steigender Netzqualität solange wiederholt, bis das Ergebnis nach Ermessen des Anwenders konvergiert. [13, S. 176]

Treten Singularitäten im Ergebnis auf, muss die Analyse auf sinnvolle Bereiche innerhalb der Geometrie beschränkt werden. Singularitäten können aber auch beseitigt werden.

So können scharfe Kanten im Geometriemodell abgerundet werden, um lokale Singularitäten zu vermeiden. [13, S. 17]

Bei der Durchführung von FE-Analysen muss besonders Wert auf die Realitätstreue der Simulation gelegt werden. Das Berechnungsmodell muss das physikalische Problem möglichst genau abbilden, um das Materialverhalten ebenfalls genau beschreiben zu können. [13, S 18 f.] Andernfalls werden mit der Finite Elemente Methode Ergebnisse generiert, die sich in der Praxis nicht bewähren können und es so schlimmstenfalls zu einem unvorhersehbaren Bauteilversagen im Betrieb kommt.

Der Ablauf der nachfolgenden FE-Analysen folgt dem typischen Schema einer linear-elastischen FE-Analyse:

1. Preprocessing

- Festlegung des Modelltyps (z.B. Balkenmodell, Schalenmodell, Volumenmodell)
- Erzeugen bzw. Einlesen der Geometrie der Struktur
- Bereitstellung von Materialdaten (E-Modul, Querdehnzahl etc.)
- Vernetzen der Struktur

2. Aufbau und Lösen des FE-Systems

- Berechnen der Elementsteifigkeitsbeziehungen
- Zusammenbau zur Systembeziehung
- Einarbeiten der Randbedingungen
- Lösen des Gleichungssystems
- Berechnen der unbekanntenen Verschiebungen und daraus abgeleiteter Größen (Dehnungen, Spannungen etc.)

3. Postprocessing

- Mitteln von Ergebnisgrößen und ihre grafische Darstellung
- Ergebnisauswertung

4.2.2. Statisch Mechanische Analyse

Zu Beginn wird mit der CAD-Software CATIA V5 ein Volumen-Modell der Verbindung erstellt, da die mit Microstation V8i erstellten technischen Zeichnungen nicht ohne weiteres für ANSYS Workbench aufbereitet werden können. Es wäre auch denkbar, ein Schalenmodell der Baugruppe zu erstellen, was Vorteile hinsichtlich Rechendauer und Speicherbelegung während der Analyse bietet. Aufgrund der Größe der Baugruppe wird allerdings eine genauere Analyse mit Volumenmodell bevorzugt. Dazu werden das Bauteil M-182_62 sowie zwei abgeschnittene Rundrohre modelliert und in einem Produkt zusammengesetzt (vgl. Abb. 4.17).

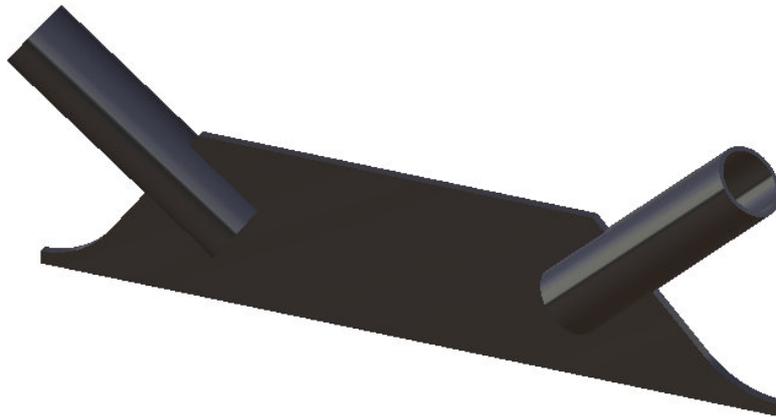


Abb. 4.17: Volumenmodell des Knotenblechanschlusses

Diese Art der Modellierung des Knotenblechanschlusses mit abgeschnittenen Anschlussstäben ist an [14, S. 52] angelehnt.

Weitere angrenzende Bauteile wie ein U-Profilstab und der Untergurt, auf dem das Knotenblech aufsitzt, werden nicht modelliert. Auf den U-Stahl wird verzichtet, da er keinen signifikanten Einfluss auf das Knotenblech hat. Der Untergurt wird nicht modelliert, da das Modell auf die Darstellung der Spannungen und Verformungen im Knotenblech abzielt. Auch die Abschlussdeckel, die das Eindringen von Wasser verhindern und bei der Montage mit verschweißt werden, werden nicht modelliert.

Da alle Bauteile aus S235JR+AR gefertigt sind, werden die entsprechenden Materialdaten hinterlegt. Im Anschluss wird das Modell vernetzt. Dabei wird auf eine geringe Elementgröße am Knotenblech Wert gelegt, da die Spannungen im Blech interessanter sind als die auftretenden Spannungen in den Rohren. Das vernetzte Modell ist in Abbildung 4.18 dargestellt.



Abb. 4.18: Vernetztes Volumenmodell des Knotenblechanschlusses

Im Anschluss wird das System mittels Kontakten und Randbedingungen aufgebaut. Wie in Kapitel 4.1.4.3 dargestellt, wird der Kontakt über eine umlaufende Kehlnaht realisiert. Die Stabkräfte werden dabei zum größten Teil über die Flankennähte übertragen, weshalb es innerhalb dieser zu Schubspannungen kommt. Aus diesem Grund wird die Kraftübertragung in die nicht modellierten Flankennähte gelegt. Dazu wird jeweils ein Flächenverbundkontakt zwischen den vier Auflagerflächen an den Rohren und den zwei Oberflächen des Knotenblechs modelliert. Im Anschluss werden die Stabkräfte als Flächenkraft auf die Oberfläche der Rohrschnitte gelegt. Da D_7 ein Druckstab ist, führt die Stabkraft vom Blech weg und ist somit eine Zugkraft. Bei Stab D_8 verhält es sich umgekehrt. Das Knotenblech wird an der Unterseite mit einer fixierten Lagerung versehen, die die Verschweißung des Blechs am Untergurt darstellt. Die Randbedingungen sind in Abbildung 4.19 dargestellt.

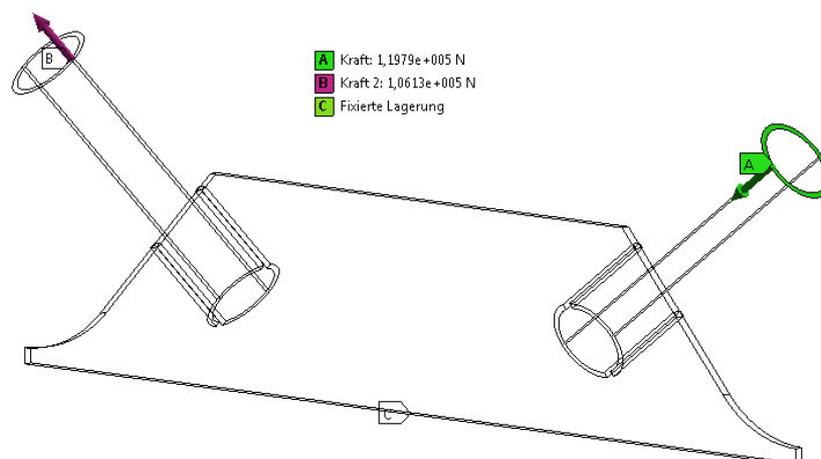


Abb. 4.19: Randbedingungen am Simulationsmodell

Mit Definition der Randbedingungen können die festgelegten Lösungsgrößen ermittelt werden. Dabei ist die Vergleichsspannung nach von Mises hinsichtlich der Festigkeit des Knotenblechs zu bestimmen. Darüber hinaus werden die Schubspannungen im Blech nochmals isoliert bestimmt, da diese die Spannungen in den Schweißnähten darstellen und mit den berechneten Schubspannungen in 4.1.4.3 verglichen werden können. Außerdem wird die Gesamtverformung betrachtet.

Bei Betrachtung der Ergebnisse zur Vergleichsspannung fallen Singularitäten an den Kanten des Knotenblechs in der Nähe der Rohre auf (vgl. Abb. 4.20):

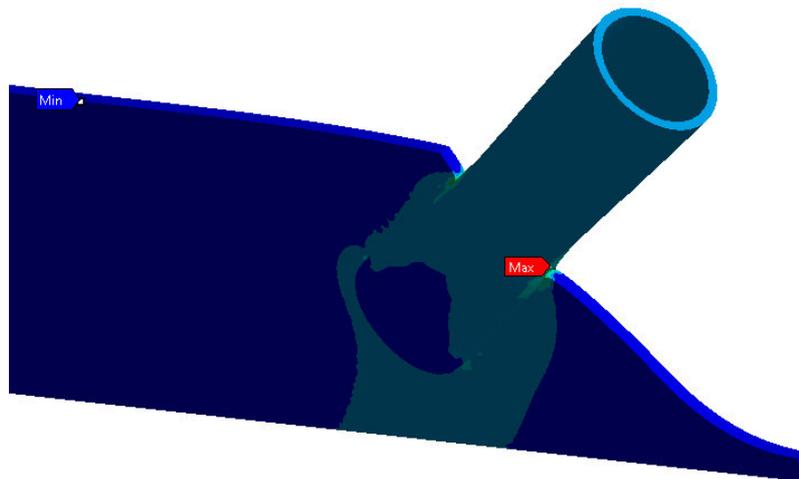


Abb. 4.20: Kantensingularität

Mittels adaptiver Vernetzung nach [13, S.166 f.] bestätigt sich der Verdacht der Singularität und demzufolge einer divergenten Lösung an dieser Stelle des Systems. Die Spannungen im restlichen Teil des Blechs konvergieren. Um die Spannungsverläufe dennoch genau darstellen zu können, wird die Darstellung der Spannungen angepasst. Dazu wird die Legende erweitert (vgl. Abb. 4.21):

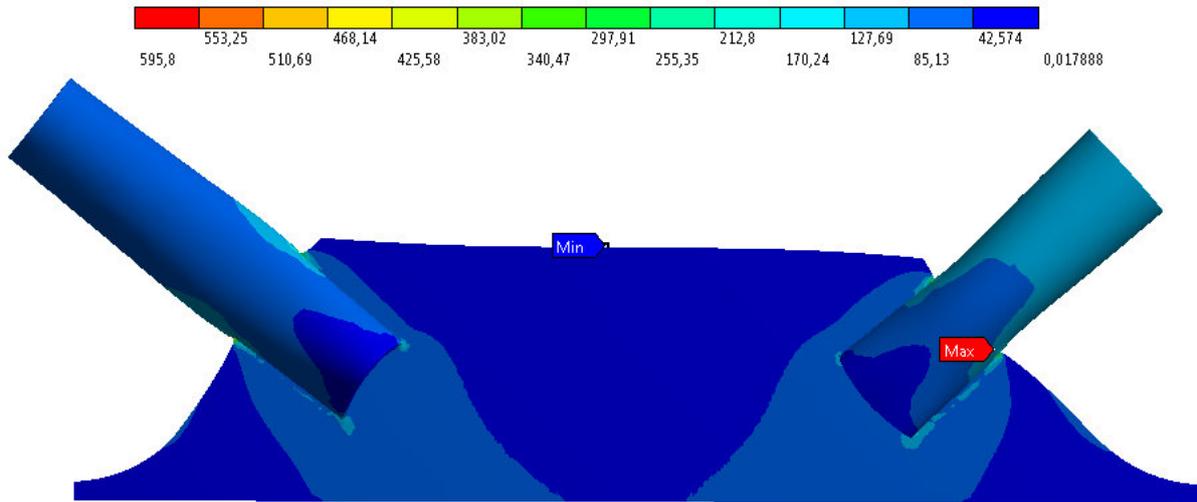


Abb. 4.21: Vergleichsspannung

Aus Abbildung 4.21 geht hervor, dass die Vergleichsspannung im Blech maßgeblich maximal 170,24 N/mm² erreicht. Die logarithmische Darstellung in Abbildung 4.22 stellt die Spannungen im Blech differenzierter dar:

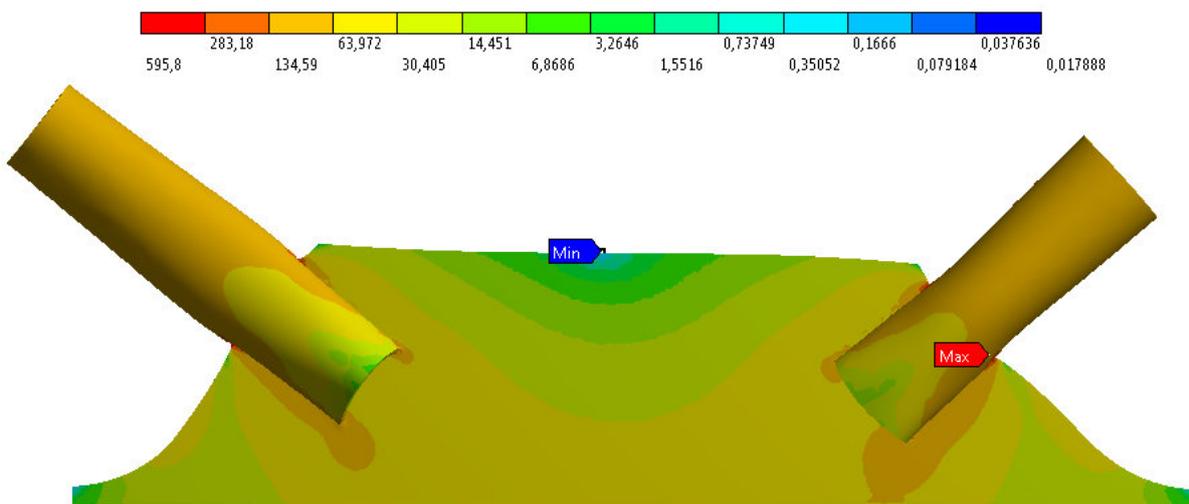


Abb. 4.22: Vergleichsspannung mit logarithmischer Skala

Entsprechend Abbildung 4.22 wird die maximale Vergleichsspannung mit 134,6 N/mm² berechnet. Somit ist die Bauteilfestigkeit des Knotenblechs nachgewiesen.

In den Abbildungen 4.23 und 4.24 sind die Schubspannungen im Knotenblech mit normaler und logarithmischer Skala dargestellt.

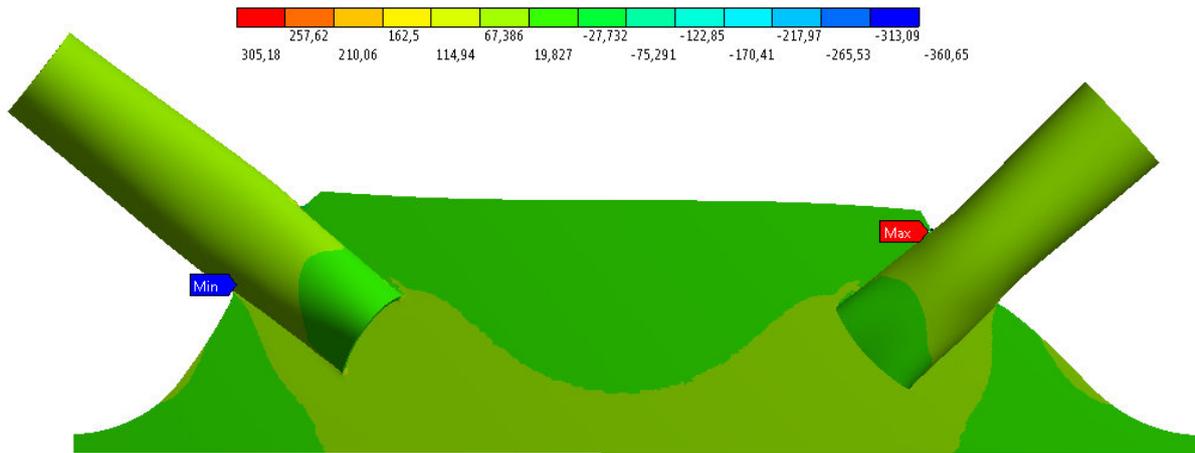


Abb. 4.23: Schubspannung YZ-Ebene

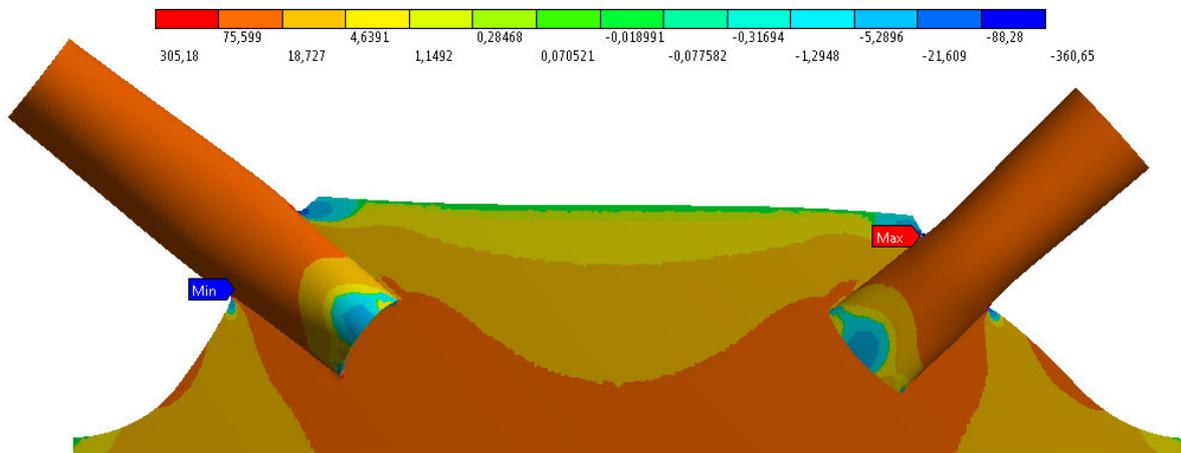


Abb. 4.24: Schubspannung YZ-Ebene mit logarithmischer Skala

Die Analyse ergibt maximale Schubspannungen von ca. 76 N/mm². Dieser Wert liegt unter dem analytisch berechneten Wert von 86 N/mm² aus Tabelle 4.18. Die Sicherheit der Schweißnähte erhöht sich somit.

Abschließend zu dieser Analyse wird die Gesamtverformung der Baugruppe in Abbildung 4.25 dargestellt.

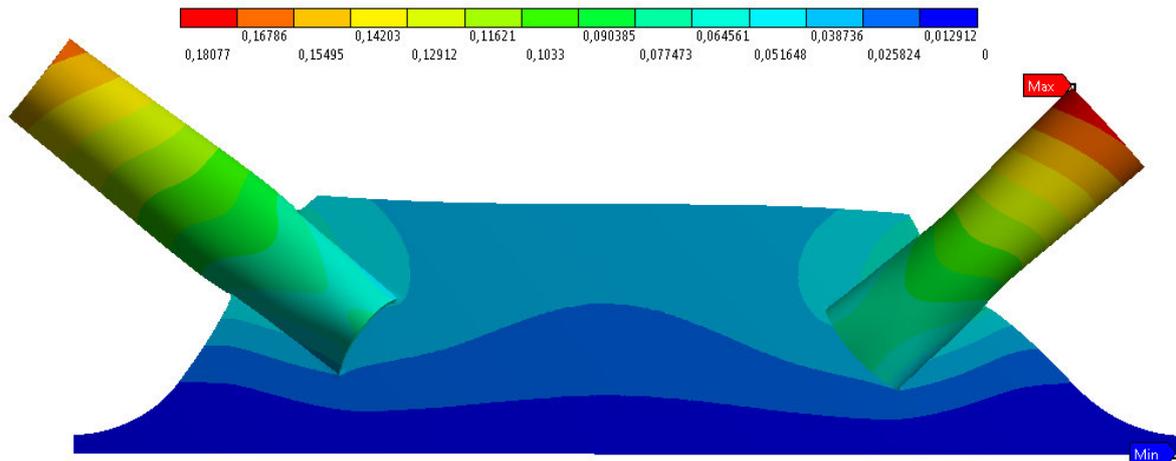


Abb. 4.25: Gesamtverformung

4.2.3 Lineare Beulanalyse

Um das Ausknickverhalten des Knotenblechs zu untersuchen wird eine lineare Beulanalyse durchgeführt. Dazu wird die statisch-mechanische Analyse aus 4.2.1 dupliziert. Diese Kopie wird dahingehend abgeändert, dass das ziehende Rohr unterdrückt wird, um den Einfluss des drückenden Rohres isoliert zu untersuchen. Die Belastung wird auf eine Einheitsbelastung von 1 N abgeändert. Die Daten dieser abgeänderten statisch-mechanischen Analyse werden an eine lineare Beulanalyse übertragen. Diese Beulanalyse folgt einem iterativen Berechnungsschema. Die statisch-mechanische Analyse wird zunächst mit der definierten Einheitsbelastung durchgeführt. Darauf folgend wird die Analyse mit steigenden Belastungen wiederholt. Die Belastung, bei der das Bauteil knickt, ist die im Lastmultiplikator der Beulanalyse dargestellte Beullast. Beim ersten Durchlauf stellt sich eine Beullast von 313 kN ein. Aus dem zugehörigen Verformungsbild lässt sich allerdings ableiten, dass bei dieser Beullast das abgeschnittene Rohr ausknickt (vgl. Abb. 4.26).

Deshalb wird der Versuch mit einem abgeänderten Modell wiederholt. Das Rohr wird nun soweit verkürzt, dass nur die Rohrhalbschalen auf dem Blech angeschweißt sind. Bei Durchlauf der erneuten Beulanalyse stellt sich eine Beullast von 427 kN ein. Das zugehörige Verformungsbild zeigt in diesem Falle eine Verformung des Knotenblechs (vgl. Abb. 4.27).

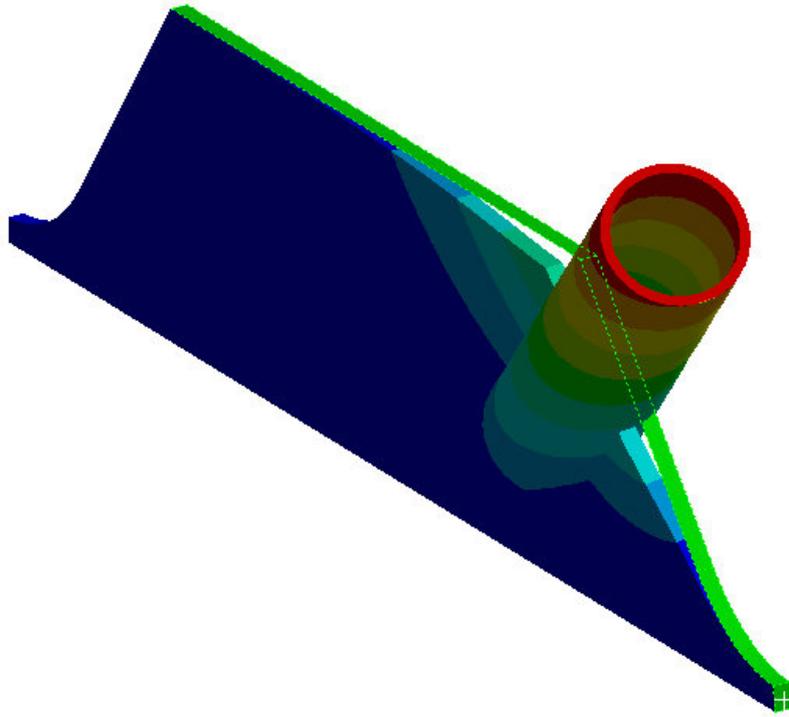


Abb. 4.26: Beulanalyse 1

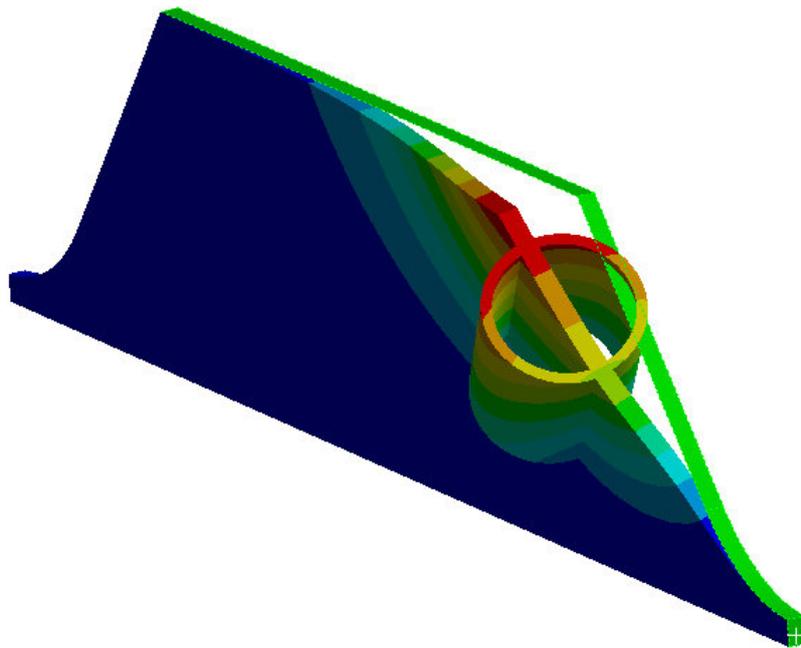


Abb. 4.27: Beulanalyse 2

Vergleicht man die Beullast mit den Querschnittstragfähigkeiten der anschließenden Stäbe D_7 und D_8 bei Druckbelastung in Kapitel 4.1.4.1 fällt auf, dass die Tragfähigkeit des Knotenblechs ca. 71% höher als die der Stabquerschnitte ist.

Um die Beullast genauer zu bestimmen, wird eine nichtlineare Beulanalyse vorgeschlagen [13, S. 36 f.]. Da aber eine, nach linearen Betrachtungen ermittelte, Sicherheit von ca. 3,6 vorliegt, und die Knotenbleche sich bisher im Betrieb bewährt haben, wird auf eine nichtlineare Beulanalyse verzichtet.

4.3 Laufstege

Um die Fertigung des Aufnahmebandauslegers in Auftrag geben zu können ist die Realisierung von Zusatzkonstruktionen notwendig. Das heißt, dass neue Laufstege nach aktueller Normierung konstruiert werden müssen, da die Original-Konstruktion heutigen Sicherheitsstandards nicht entspricht. Diese Umkonstruktion ist mit einer Gewichtszunahme der gesamten Baugruppe verbunden, die aber im mit dem Sachbearbeiter der Tagebaugeräteprüfstelle verhandelten Toleranzbereich liegt. Sinn der Laufstege ist der Zugang zu den Baugruppen für Reparatur- und Wartungsarbeiten.

Die Laufstege liegen beidseitig des Aufnahmebandauslegers und gliedern sich in 3 Teile:

- Ein Übergang zwischen Gerüst Unterteil und Gerüst Teil 1 (vgl. Abb. 4.28)



Abb. 4.28: Laufstege erster Abschnitt

Dieser Abschnitt ist am Gerüst Unterteil gelagert und liegt mit einem verstärkten Laschenelement als Gleitlager auf Gleitschienen am nächsten Abschnitt der Laufstege auf (vgl. Abb. 4.29).



Abb. 4.29: Gleitlager

- Ein an Gerüst Teil 1 und Gerüst Teil 2 gelagerter Teil (vgl. Abb. 4.30)



Abb. 4.30: Laufstege zweiter Abschnitt

Dieser Abschnitt stellt den Hauptteil der Laufstege dar. Er ist komplett am Tragwerk des Aufnahmebandvorderteils abgestützt.

- Ein an Gerüst Teil 3 gelagerter Teil (vgl. Abb. 4.31)



Abb. 4.31: Laufstege Dritter Abschnitt

Dieser Bereich ist für den Zugang zum direkten Aufgabebereich des Förderguts am Bandwagen vorgesehen. Aufgrund dessen ist er mit einer Schutzabdeckung versehen. Er ist komplett an Gerüst Teil 3 gelagert und besitzt keine Verbindung zum Rest des Laufsteiges. Der Übergang zwischen beiden Teilen ist schwebend (vgl. Abb. 4.32)



Abb. 4.32: Schwebender Übergang zwischen zwei Laufstegabschnitten

Da keine Zeichnungen der Originalkonstruktion vorliegen, werden die vorhandenen Laufstege vor Ort vermessen. Bei der konstruktiven Überarbeitung werden die Geländer den aktuellen Standards nach [15, S. 6] mit Spezifikationen zu Tagebaugeräten nach [16, S. 8] angepasst.

Die Handläufe und die Knieleisten werden dabei vergrößert. Die Fußleiste wird vergrößert, um mehr Sicherheit gegen Abstürzen zu schaffen.

Zusätzlich wird die Schutzabdeckung am letzten Abschnitt der Laufstege verstärkt, was mit einer Konstruktionsänderung aus dem Jahr 2004 einhergeht. (vgl. Abb. 4.33)

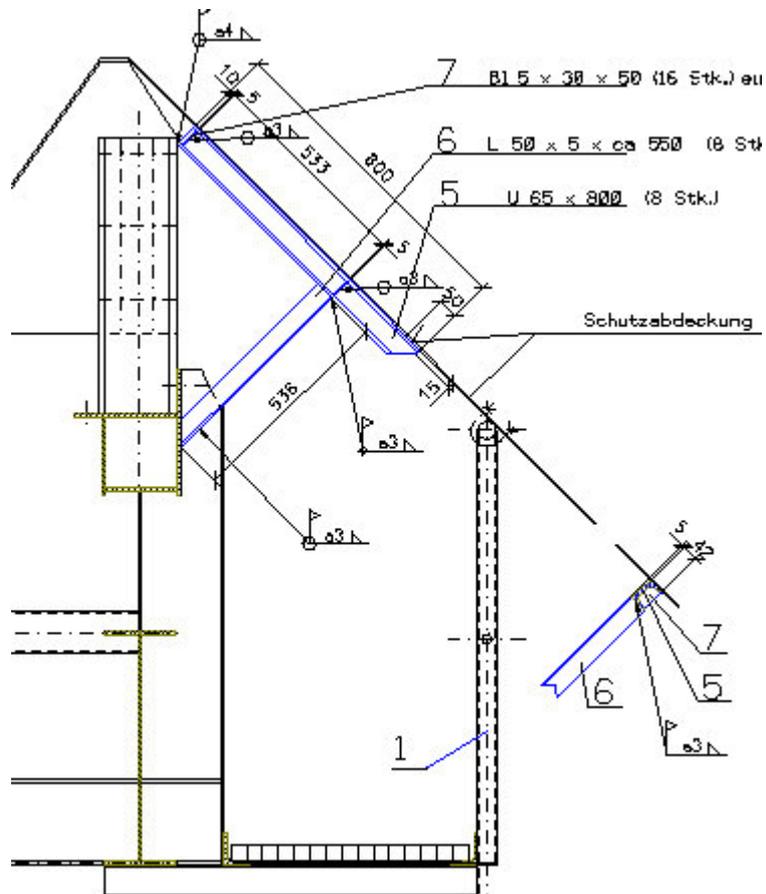


Abb. 4.33: Vorhandene Konstruktionsänderung zur Schutzabdeckung

Diese Schutzabdeckungsvariante wird für die Überarbeitung der Laufstege optimiert und anschließend implementiert. Nachteil dieser Variante ist eine Einschränkung des Verkehrswegs auf dem Laufsteg, der über die Einschränkung der Schutzabdeckung an sich hinausgeht. In der optimierten Variante (vgl. Abb. 4.34) ist die Schutzabdeckung am Geländer abgestützt, wodurch der Verkehrsweg keine weitere Einschränkung hat.

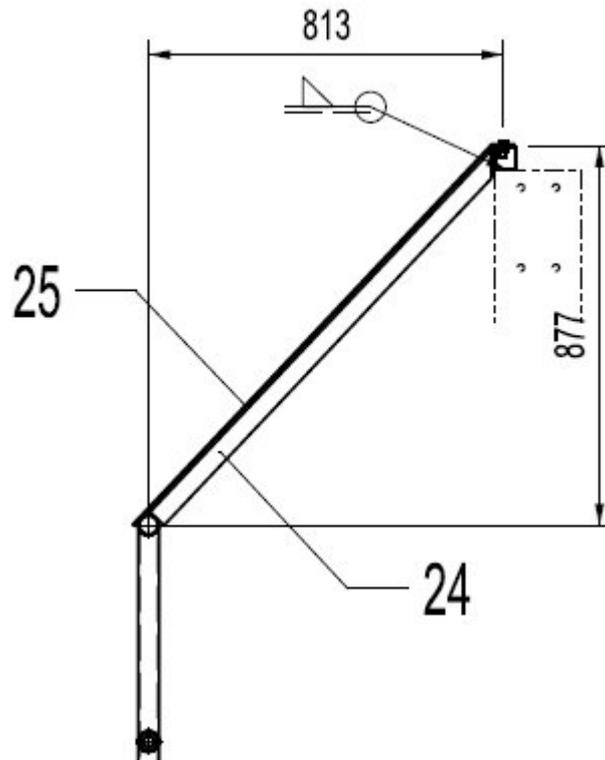


Abb. 4.34: Optimierte Schutzabdeckung

Zu beachten ist, dass die Schutzabdeckung in der optimierten Variante am Gerüst Teil 3 verschraubt wird. In der ursprünglichen Konstruktionsänderung wird diese verschweißt. Dies hat den Vorteil, dass bei Versagen der Abdeckbleche diese per Schraubverbindung schnell ausgetauscht werden können.

Die Laufstege sind, wie in Tabelle 4.20 dargestellt, in fertigungsreifen Unterlagen dokumentiert (vgl. Z6)

Tabelle 4.20: Übersicht der angefertigten Zeichnungen

Zeichnungsnummer	Blätter	Benennung	Beschreibung
M184_BW810	1xA0	Laufstege	Zusammenbauzeichnung

4.4 Montage

Für die Realisierung der Montage werden nachfolgend die einzelnen Montagestöße zwischen den Baugruppen beschrieben. Sämtliche Montageschritte sind nach den zugehörigen Zusammenbauzeichnungen vorzunehmen. Ergänzend werden für die Montage die Schwerpunkte der einzelnen Baugruppen berechnet und angegeben.

Das Aufnahmebandvorderteil ist wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben am Oberbau zu montieren. Ebenso nach Kapitel 3.1.1 erfolgt die Montage des Aufnahmebandhinterteils. Das Aufnahmebandvorderteil an sich muss mit Schweißstößen zusammengefügt werden.

Gerüst Teil 1 und Gerüst Teil 2 werden mit jeweils zwei V-Stößen an Ober- und Untergurt miteinander verbunden (vgl. Abb. 4.35). Um die Fixierung der Baugruppen zu erleichtern wird zunächst eine Badsicherung angeheftet (M-181_132 und M-181_133).

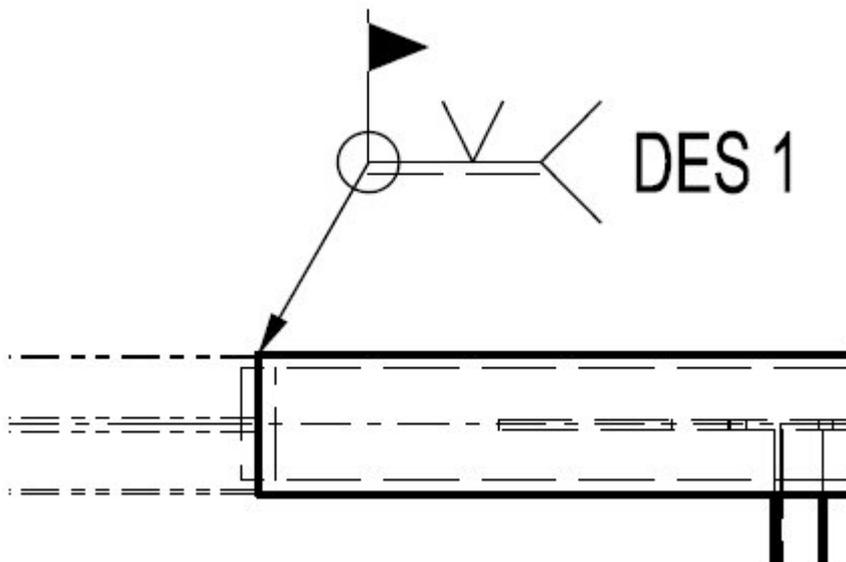


Abb. 4.35 Geschweißter Montagestoß Aufnahmebandvorderteil

Der Schwerpunkt der Baugruppe Aufnahmebandvorderteil wird in Tabelle 4.21 bestimmt. Der Schwerpunkt der Stahlbautragkonstruktion wird dabei aus den Knotenlasten aus Tabelle 4.3 berechnet. Die Masse der Laufstege bezieht sich auf den zweiten Abschnitt der in Kapitel 4.3 beschriebenen Laufstege. Die restlichen Schwerpunktangaben sind aus den Altstatikunterlagen übernommen, da diese nicht verändert wurden.

Die Lagebezeichnung der Schwerpunkte wird im in Abbildung 4.3 dargestellten Koordinatensystem vorgenommen.

Tabelle 4.21: Berechnung des Schwerpunkts vom Aufnahmebandvorderteil

gleichmäßig verteilte Lasten	x [m]	y [m]	z [m]	m [kg]	x*m [m*kg]	y*m [m*kg]	z*m [m*kg]
Stahlbau-Tragkonstruktion	-10,213	0,000	-1,136	7074	-72247	0	-8036
Laufstege	-9,600	0,000	-1,600	1522	-14611	0	-2435
Fördergutführung	-10,600	0,000	-0,950	1130	-11978	0	-1074
Tragrollenstation:							
4 Tragrollen A	-10,600	0,000	-1,800	206	-2184	0	-371
4 Tragrollen B	-10,600	0,000	-1,800	276	-2926	0	-497
11 Tragrollen C	-10,600	0,000	-1,200	2075	-21995	0	-2490
Fördergurt	-10,600	0,000	-1,400	1100	-11660	0	-1540
E-Gewicht	-10,600	0,000	-2,000	700	-7420	0	-1400
Einzellasten							
Gurtlenvorrichtung	-6,300	0,000	-1,800	195	-1229	0	-351
Gurtlenvorrichtung	-19,500	0,000	-1,800	195	-3803	0	-351
Außengurtreiniger	0,150	0,000	-1,800	140	21	0	-252
Antriebstrommel	-0,200	0,000	-1,400	2200	-440	0	-3080
Antrieb	-0,200	1,900	-1,400	3520	-704	6688	-4928
Aufhängung	-21,200	0,000	0,000	600	-12720	0	0
Laufsteg-Übergabe	-5,300	0,000	-1,800	167	-885	0	-301
Übergabeschurre	0,200	0,000	-1,400	270	54	0	-378
SUMME	-139,41	1,900	-23,636	21370	-164725	6688	-27483
/Anzahl	-8,713	0,119	-1,477	/m	-7,708	0,313	-1,286

In Tabelle 4.22 wird die Berechnung des Schwerpunkts des Aufnahmebandhinterteils dargestellt. Änderungen bezüglich des Originalschwerpunktes ergeben sich dabei nur aus den geänderten Bedingungen zu den Laufstegen.

Tabelle 4.22: Schwerpunkt Aufnahmebandhinterteil

gleichmäßig verteilte Lasten	x [m]	y [m]	z [m]	m [kg]	x*m [m*kg]	y*m [m*kg]	z*m [m*kg]
Stahlbau-Tragkonstruktion	-25,85	0,000	-1,650	2150	-55578	0	-3548
Laufstege	-25,20	0,000	-1,650	1120	-28224	0	-1848
Lasche	-22,30	0,000	-0,600	112	-24976	0	-1848
Schurre	-24,65	0,000	-0,550	1255	-2761	0	-67
10 Tragrollen D	-24,55	0,000	-1,000	2180	-53519	0	-2180
2 Tragrollen B	-25,65	0,000	-1,950	138	-3540	0	-269
Fördergurt	-25,45	0,000	-0,900	450	-11453	0	-405
Innengurtreiniger	-26,95	0,000	-1,700	60	-1617	0	-102
Spannvorrichtung	-28,40	0,000	-1,350	300	-8520	0	-405
Trommel	-29,15	0,000	-1,350	600	-17490	0	-810
E-Gewicht	-25,30	0,000	-1,000	300	-7590	0	-300
SUMME	-283,5	0,000	-13,70	8665	-215267	0	-11782
/i	-17,72	0,000	-0,856	/m	-24,843	0,000	-1,360

Somit ergeben sich folgende Schwerpunkte:

- $S_{\text{Aufnahmebandvorderteil}}(-7,708 \text{ m}; 0,313 \text{ m}; -1,286 \text{ m})$
- $S_{\text{Aufnahmebandhinterteil}}(-24,843; 0; -1,360 \text{ m})$

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der konstruktiven Überarbeitung ausgewählter Baugruppen eines Bandwagens im Braunkohlentagebau Profen. Den Schwerpunkt legt die Arbeit dabei auf die Überarbeitung der Profile der Stäbe im Stabwerk der Baugruppen.

Die Arbeit umfasst in Kapitel 2 einen Grundlagenteil, der die Bandwagentechnik beschreibt, die Analysen und Rechenmodelle der Arbeit erläutert sowie die Normenhierarchie darstellt.

In Kapitel 3 werden zunächst die betroffenen Baugruppen aufgearbeitet und dargestellt. Im Anschluss werden Verbesserungsvorschläge zur Konstruktion gemacht, die in einem Variantenvergleich gegenübergestellt werden. Dabei werden bereits am Bandwagen realisierte Konstruktionsänderungen bewertet und in die eigene Konstruktionsüberarbeitung implementiert. Die Baugruppen Turm Hinterteil und Gerüst Teil 3 werden nicht überarbeitet, da sich eine Überarbeitung als nicht notwendig herausstellt hat.

Daraufhin wird in Kapitel 4 die konstruktive Überarbeitung der Baugruppen Gerüst Teil 1 und Gerüst Teil 2 beschrieben und die notwendigen Tragfähigkeits-, Stabilitäts- und Schweißnahtnachweise erbracht. Alle Konstruktionsänderungen erfolgen in Abstimmung mit dem zuständigen Sachverständigen vom Bundesverband für Braunkohle. Eine hochbelastete Knotenblechverbindung wird mittels FE-Analysen simuliert. Um deren Festigkeit und Stabilität zu belegen. Die Baugruppen des Aufnahmeband-Tragwerks sind in fertigungsreifen Unterlagen dargestellt.

Mit diesen Unterlagen kann eine Ausschreibung zur Fertigung der Baugruppen erfolgen. Nach Vergabe des Fertigungsauftrages an eine Fremdfirma kann das Konstruktionsbüro der MIBRAG mit Hilfe der vorliegenden Arbeit, der Fertigungsunterlagen, des RSTAB-Rechenmodells, der dokumentierten Berechnungen und der umfassenden Analysen die Fertigung detailgenau begleiten und somit die Qualität des Fertigungserzeugnisses überwachen. Die Montage der Baugruppen am BRs 1400.37/50.1-810 soll 2015 erfolgen und der Bandwagen im Tagebau Profen in Betrieb gehen.

Literaturverzeichnis

[1] K.-H. Grote, J. Feldhusen

Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau
22. Auflage, Springer Verlag
2007

[2] R. Kindmann, M. Kraus, J. Vette, O. Josat, J. Krampen, C. Remde

Bemessungshilfe für MSH-Profile nach Eurocode 3
<http://portal.stahlbauforum.de/news/2011/03/bemHilfenMsh.php>
Abgerufen am 31.01.2015

[3] G. Brunk, O. Weckner

Theorien erster, zweiter und nichtlinearer Ordnung
mechanik.tu-berlin.de/brunk/daten/merckbl/me2/th1_3ord.pdf
Abgerufen am 15.01.2015

[4] C. Zhang

Stabilitätsproblem und Theorie II. Ordnung
http://www.bau.uni-siegen.de/subdomains/baustatik/lehre/bst/unterlagen_vertieft/wgv_th2o/bs3_stabilitaet-einfuehrung-ws1011.pdf
Abgerufen am 31.01.2015

[5] M. Meier

Auswählen und Bewerten
<http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:25112/eth-25112-01.pdf>
Abgerufen am 31.01.2015

[6] K.-J. Conrad

Taschenbuch der Konstruktionstechnik
2. Auflage, Hanser Verlag
2008

[7] Bauforum Stahl e.V.

Verbindungen mit hochfesten Schrauben

www.szs.ch/user_content/editor/files/Downloads_Verbindungstechnik/verbindungen%20mit%20hochfesten%20schrauben.pdf

Abgerufen am 31.01.2015

[8] DIN EN 1993-1-8

Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Bemessung von Anschlüssen

Juli 2005

[9] Saarstahl

Werkstoff Datenblatt: C45

http://www.saarstahl.de/fileadmin/saarstahl_extranet/images/04_produkte/walzstahlsorten/deutsch/0503_C45.pdf

Abgerufen am 31.01.2015

[10] DIN EN 1993-1-1

Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau

Juli 2005

[11] DIN EN 1993-1-9

Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Ermüdung

Juli 2005

[12] H. Unterweger, A. Taras

Hohlprofile mit beidseits zentrisch eingeschlitzten Knotenblechen – Drucktragverhalten und Bemessungsvorschlag

Stahlbau, 80. Jahrgang, Heft 11

November 2011

[13] C. Gebhardt

Praxisbuch – FEM mit ANSYS Workbench

2. Auflage, Hanser Verlag

2014

[14] J. Vette

Tragverhalten von Stabanschlüssen und Fachwerkknoten mit ausgeschnittenen Knotenblechen
Dissertation
2010

[15] DIN EN ISO 14122-3

Ortsfeste Zugänge zu maschinellen Anlagen
Januar 2002

[16] DIN 22261-1

Bagger, Absetzer und Zusatzgeräte in Braunkohlentagebauen - Bau, Inbetriebnahme und Prüfungen
Dezember 2004

[17] DIN EN 1990

Grundlagen der Tragwerksplanung
Dezember 2010

[18] DIN 22261-2

Bagger, Absetzer und Zusatzgeräte in Braunkohlentagebauen – Berechnungsgrundlagen
Februar 2014

[19] U.-P. Schmitz

Euler Knickstab (Eulerfälle)

[http://www.bau.uni-](http://www.bau.uni-siegen.de/subdomains/baustatik/lehre/tm/tm2/arbeitsblaetter/arbeitsblatt_36_eulerfaelle.pdf)

[siegen.de/subdomains/baustatik/lehre/tm/tm2/arbeitsblaetter/arbeitsblatt_36_eulerfaelle.pdf](http://www.bau.uni-siegen.de/subdomains/baustatik/lehre/tm/tm2/arbeitsblaetter/arbeitsblatt_36_eulerfaelle.pdf)

Abgerufen am 03.02.2015

[20] TGL 13501

Stahlrohrtragwerke
April 1982

Abbildungen

Abb.	Titel	Autor/Quelle
2.1	Übersicht BRs 1400.37/50.1	MIBRAG mbH
2.2	Übersicht BRs 1400.37/50.1	MIBRAG mbH
2.3	Abraum-Übergabesituation Bagger/Bandwagen	Eigene
2.4	Stabwerkverband	Eigene
2.5	Knotenblechverbindung	Eigene
3.1	Aufnahmebandausleger mit Knotenscheiben	Eigene
3.2	Verlagerung des Aufnahmebandhinterteils	Eigene
3.3	Zeichnungsausschnitt der Verstärkung am Obergurt	MIBRAG mbH
3.4	Zeichnungsausschnitt der Bandabdeckung	MIBRAG mbH
3.5	Implementierte Bandabdeckung	Eigene
3.6	Zeichnungsausschnitt mit zusätzlichem Querträger	MIBRAG mbH
3.7	Verstärkung am Obergurt - Winkelstahl	MIBRAG mbH
3.8	Verstärkung am Obergurt - Breitflansch	Eigene
3.9	Verstärkung am Obergurt - Stahlrohr	Eigene
3.10	Verstärkung am Obergurt - Hohlprofil	Eigene
3.11	Verschraubung eines Obergurtverbandes	Eigene
3.12	Scher-/Lochleibungsverbindung	[7, S.1]
3.13	Gleitfeste Verbindung	[7, S.1]
3.14	Winkelprofilvarianten	Eigene
3.15	Turm Hinterteil mit Knotenscheiben	Eigene
3.16	Turm Hinterteil mit Knotenscheiben	Eigene
4.1	Konstruktionsalgorithmus	Eigene
4.2	Knotenplan	Eigene
4.3	Stäbeplan	Eigene
4.4	RSTAB-Modell	Eigene
4.5	RSTAB-Darstellung Gelenklager	Eigene
4.6	RSTAB-Darstellung Seillager	Eigene

4.7	Knotenverschiebung im Rechenmodell	Eigene
4.8	Biegemoment in einem Bolzen	[8, S. 42]
4.9	Knickfälle nach Euler	[19, S. 1]
4.10	Knicklinienbestimmung	[10, S. 63]
4.11	Bestimmung Imperfektionsbeiwert	[10, S. 62]
4.12	Knicklinien	[10, S. 64]
4.13	Umlaufender Kehlnahtanschluss an Knotenblech	Eigene
4.14	Schubspannungen in umlaufender Kehlnaht	Eigene
4.15	konvergierende Lösung	[13, S. 16]
4.16	divergierende Lösung	[13, S. 17]
4.17	Volumenmodell des Knotenblechanschlusses	Eigene
4.18	Vernetztes Volumenmodell des Knotenblechanschlusses	Eigene
4.19	Randbedingungen am Simulationsmodell	Eigene
4.20	Kantensingularität	Eigene
4.21	Vergleichsspannung	Eigene
4.22	Vergleichsspannung mit logarithmischer Skala	Eigene
4.23	Schubspannung YZ-Ebene	Eigene
4.24	Schubspannung YZ-Ebene mit logarithmischer Skala	Eigene
4.25	Gesamtverformung	Eigene
4.26	Beulanalyse 1	Eigene
4.27	Beulanalyse 2	Eigene
4.28	Laufstege erster Abschnitt	Eigene
4.29	Gleitlager	Eigene
4.30	Laufstege zweiter Abschnitt	Eigene
4.31	Laufstege Dritter Abschnitt	Eigene
4.32	Schwebender Übergang zwischen zwei Laufstegabschnitten	Eigene
4.33	Vorhandene Konstruktionsänderung zur Schutzabdeckung	MIBRAG mbH
4.34	Optimierte Schutzabdeckung	Eigene
4.35	Geschweißter Montagestoß Aufnahmebandvorderteil	Eigene

Anlagen

Nr.	Titel	Blätter	Inhalt
A1	Schnittkräfte der betrachteten Stäbe aus Ergebnissen der RSTAB-Berechnung	Blatt 1	Stabgruppe D_U
		Blatt 2	Stabgruppe D
		Blatt 3	Stabgruppe V_U
A2	Schnittkräfte der betrachteten Stäbe aus Ergebnissen der Statikunterlagen	Blatt 1	Stabgruppe D_U
		Blatt 2	Stabgruppe D
		Blatt 3	Stabgruppe V_U
A3	Lastkombination zur Ermittlung der Stabkraftschwingbreite für die Berechnung der Spannungsschwingbreite	Blatt 1	Stäbe $D'_{0;}$; $D'_{1,0;}$; D_8

Zusätzliche Anlagen

Die zusätzlichen Anlagen sind nicht in diese Arbeit eingebunden. Sie sind extern hinterlegt.

Nr.	Zeichnungsnummer	Blätter	Titel
Z1	584.459-4	Blatt 1	Aufnahmeband
Z2	584.543-3103	Blatt 1	Turm Hinterteil
		Blatt 2	Turm Hinterteil
Z3	M-181_BW810	Blatt 1	Gerüst Teil 1
		Blatt 2	Gerüst Teil 1
		Blatt 3	Gerüst Teil 1: Einzelteile
		Blatt 4	Stückliste
Z4	M-182_BW810	Blatt 1	Gerüst Teil 2
		Blatt 2	Gerüst Teil 2: Einzelteile
		Blatt 3	Stückliste
Z5	M-183_BW810	Blatt 1	Gerüst Teil 3
		Blatt 2	Gerüst Teil 3: Einzelteile
		Blatt 3	Stückliste
Z6	M-184_BW810	Blatt 1	Laufstege
		Blatt 2	Stückliste

Anlage A1: Schnittkräfte der betrachteten Stäbe aus Ergebnissen der RSTAB-Berechnung: Blatt 1

LF	D _{U,1}	D' _{U,1}	D _{U,2}	D _{U,3}	D _{U,4}	D _{U,5}	D _{U,6}	D _{U,7}	D _{U,8}
1: Eigengewicht	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2: Fördergut	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3: Verstopfte Schurre (HZ)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4: Verstopfte Schurre (S)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5: 10% Fördergut	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6: 15% Verstopfte Schurre (S)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7: Verkrustung	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8: 1+2+7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9: Schwingwirkung	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10 Aufliegen d. Auslegers	0,000	0,000	21,000	21,000	-21,000	-21,000	-21,000	-21,000	-21,000
11: Bandzug	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
12: Wind 80 senkrecht	-2,410	2,450	33,800	29,910	-25,240	-20,730	-16,230	-11,670	-7,160
13: Wind 25 senkrecht	-0,750	0,760	10,500	9,290	-7,840	-6,440	-5,040	-3,630	-2,230
14: Neigung 10% senkrecht	-1,272	1,294	17,846	15,792	-13,327	-10,945	-8,569	-6,162	-3,780
15: Neigung 5% senkrecht	-0,636	0,647	8,923	7,896	-6,663	-5,473	-4,285	-3,081	-1,890
16: Neigung 3% senkrecht	-0,381	0,387	5,340	4,726	-3,988	-3,275	-2,564	-1,844	-1,131
17: H (8+9+11+16)	-0,381	0,387	5,340	4,726	-3,988	-3,275	-2,564	-1,844	-1,131
18: Hz^{extr} (17+3+13)	-1,131	1,147	15,840	14,016	-11,828	-9,715	-7,604	-5,474	-3,361
19: Hz^a (1+7+11+12+15)	-3,046	3,097	42,723	37,806	-31,903	-26,203	-20,515	-14,751	-9,050
20: S - Verstopfte Schurre (17+4+13)	-1,131	1,147	15,840	14,016	-11,828	-9,715	-7,604	-5,474	-3,361
21: S - Ausleger aufliegend (17+10+13)	-1,131	1,147	36,840	35,016	-32,828	-30,715	-28,604	-26,474	-24,361

Anlage A1: Schnittkräfte der betrachteten Stäbe aus Ergebnissen der RSTAB-Berechnung: Blatt 2

LF	D' ₀	D' _{1,U}	D' _{1,O}	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆	D ₇	D ₈
1: Eigengewicht	131,650	56,290	70,820	-15,950	-2,390	10,780	-26,860	35,120	-51,930	58,900
2: Fördergut	29,360	4,240	2,490	-17,550	9,740	-1,730	-6,350	14,230	-22,550	29,840
3: Verstopfte Schurre (HZ)	-8,130	-7,980	-0,310	7,390	-7,930	7,400	-7,960	7,350	-8,010	7,330
4: Verstopfte Schurre (S)	-11,170	-10,950	-0,490	10,120	-10,910	10,120	-10,960	10,070	-11,010	10,030
5: 10% Fördergut	2,936	0,424	0,249	-1,755	0,974	-0,173	-0,635	1,423	-2,255	2,984
6: 15% Verstopfte Schurre (S)	-1,676	-1,643	-0,074	1,518	-1,637	1,518	-1,644	1,511	-1,652	1,505
7: Verkrustung	1,261	-1,219	0,176	-0,237	-0,663	1,345	-2,279	2,934	-3,907	4,489
8: 1+2+7	162,271	59,312	73,486	-33,737	6,688	10,395	-35,489	52,284	-78,387	93,229
9: Schwingwirkung	16,227	5,931	7,349	-3,374	0,669	1,040	-3,549	5,228	-7,839	9,323
10 Aufliegen d. Auslegers	50,800	50,800	0,000	-30,100	30,100	0,900	-0,900	0,900	-0,900	0,900
11: Bandzug	0,000	0,000	-10,590	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
12: Wind 80 senkrecht	64,120	-2,000	5,280	-21,100	21,600	18,140	-19,990	17,480	-18,970	15,380
13: Wind 25 senkrecht	19,920	-0,620	1,640	-6,560	6,710	5,640	-6,210	5,430	-5,900	4,780
14: Neigung 10% senkrecht	33,855	-1,056	2,788	-11,141	11,405	9,578	-10,555	9,229	-10,016	8,121
15: Neigung 5% senkrecht	16,928	-0,528	1,394	-5,570	5,702	4,789	-5,277	4,615	-5,008	4,060
16: Neigung 3% senkrecht	10,131	-0,316	0,834	-3,334	3,413	2,866	-3,158	2,762	-2,997	2,430
17: H (8+9+11+16)	188,629	64,927	71,078	-40,445	10,769	14,301	-42,196	60,274	-89,222	104,981
18: Hz^{extr} (17+3+13)	200,419	56,327	72,408	-39,615	9,549	27,341	-56,366	73,054	-103,132	117,091
19: Hz^a (1+7+11+12+15)	213,958	52,544	67,079	-42,857	24,250	35,054	-54,406	60,148	-79,815	82,829
20: S - Verstopfte Schurre (17+4+13)	197,379	53,357	72,228	-36,885	6,569	30,061	-59,366	75,774	-106,132	119,791
21: S - Ausleger aufliegend (17+10+13)	259,349	115,107	72,718	-77,105	47,579	20,841	-49,306	66,604	-96,022	110,661

Anlage A1: Schnittkräfte der betrachteten Stäbe aus Ergebnissen der RSTAB-Berechnung: Blatt 3

LF	V _{U,1}	V _{U,2}	V _{U,3}	V _{U,4}	V _{U,5}	V _{U,6}	V _{U,7}
1: Eigengewicht	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2: Fördergut	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3: Verstopfte Schurre (HZ)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4: Verstopfte Schurre (S)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5: 10% Fördergut	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6: 15% Verstopfte Schurre (S)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7: Verkrustung	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8: 1+2+7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9: Schwingwirkung	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10 Aufliegen d. Auslegers	6,800	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
11: Bandzug	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
12: Wind 80 senkrecht	5,620	-0,210	-2,940	-0,010	-2,880	0,000	-2,890
13: Wind 25 senkrecht	1,750	-0,060	-0,910	0,000	-0,900	0,000	-0,900
14: Neigung 10% senkrecht	2,967	-0,111	-1,552	-0,005	-1,521	0,000	-1,526
15: Neigung 5% senkrecht	1,484	-0,055	-0,776	-0,003	-0,760	0,000	-0,763
16: Neigung 3% senkrecht	0,888	-0,033	-0,465	-0,002	-0,455	0,000	-0,457
17: H (8+9+11+16)	0,888	-0,033	-0,465	-0,002	-0,455	0,000	-0,457
18: Hz ^{extr} (17+3+13)	2,638	-0,093	-1,375	-0,002	-1,355	0,000	-1,357
19: Hz ^a (1+7+11+12+15)	7,104	-0,265	-3,716	-0,013	-3,640	0,000	-3,653
20: S - Verstopfte Schurre (17+4+13)	2,638	-0,093	-1,375	-0,002	-1,355	0,000	-1,357
21: S - Ausleger aufliegend (17+10+13)	9,438	-0,093	-1,375	-0,002	-1,355	0,000	-1,357

Anlage A2: Schnittkräfte der betrachteten Stäbe aus Ergebnissen der Statikunterlagen: Blatt 1

LF	D _{U,1}	D' _{U,1}	D _{U,2}	D _{U,3}	D _{U,4}	D _{U,5}	D _{U,6}	D _{U,7}	D _{U,8}
1: Eigengewicht	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2: Fördergut	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3: Verstopfte Schurre (HZ)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4: Verstopfte Schurre (S)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5: 10% Fördergut	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6: 15% Verstopfte Schurre (S)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7: Verkrustung	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8: 1+2+7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9: Schwingwirkung	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10 Aufliegen d. Auslegers	0,000	0,000	21,000	21,000	-21,000	-21,000	-21,000	-21,000	-21,000
11: Bandzug	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
12: Wind 80 senkrecht	-4,400	4,400	32,700	28,200	-23,700	19,200	-14,600	10,000	-5,600
13: Wind 25 senkrecht	-1,400	1,400	16,200	8,800	-7,400	6,000	-4,600	3,100	-1,800
14: Neigung 10% senkrecht	-2,323	2,323	17,266	14,890	-12,514	10,138	-7,709	5,280	-2,957
15: Neigung 5% senkrecht	-1,162	1,162	8,633	7,445	-6,257	5,069	-3,854	2,640	-1,478
16: Neigung 3% senkrecht	-0,695	0,695	5,167	4,456	-3,745	3,034	-2,307	1,580	-0,885
17: H (8+9+11+16)	-0,695	0,695	5,167	4,456	-3,745	3,034	-2,307	1,580	-0,885
18: Hz^{extr} (17+3+13)	-2,095	2,095	21,367	13,256	-11,145	9,034	-6,907	4,680	-2,685
19: Hz^a (1+7+11+12+15)	-5,562	5,562	41,333	35,645	-29,957	24,269	-18,454	12,640	-7,078
20: S - Verstopfte Schurre (17+4+13)	-2,095	2,095	21,367	13,256	-11,145	9,034	-6,907	4,680	-2,685
21: S - Ausleger aufliegend (17+10+13)	-2,095	2,095	42,367	34,256	-32,145	-11,966	-27,907	-16,320	-23,685

Anlage A2: Schnittkräfte der betrachteten Stäbe aus Ergebnissen der Statikunterlagen: Blatt 2

LF	D' ₀	D' _{1,U}	D' _{1,O}	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆	D ₇	D ₈
1: Eigengewicht	137,600	58,300	80,400	-20,900	6,000	16,300	-20,200	32,900	-45,500	59,000
2: Fördergut	29,900	26,000	3,600	-17,900	9,800	6,300	-6,400	14,500	-22,600	30,700
3: Verstopfte Schurre (HZ)	-7,800	-7,800	0,000	7,800	-7,800	7,800	-7,800	7,800	-7,800	7,800
4: Verstopfte Schurre (S)	-10,700	-10,700	0,000	10,700	-10,700	10,700	-10,700	10,700	-10,700	10,700
5: 10% Fördergut	2,990	2,600	0,400	-1,790	0,980	0,630	-0,640	1,450	-2,260	3,070
6: 15% Verstopfte Schurre (S)	-1,605	-1,605	0,000	1,605	-1,605	1,605	-1,605	1,605	-1,605	1,605
7: Verkrustung	1,385	0,995	0,400	-0,185	-0,625	2,235	-2,245	3,055	-3,865	4,675
8: 1+2+7	168,885	85,295	84,400	-38,985	15,175	24,835	-28,845	50,455	-71,965	94,375
9: Schwingwirkung	16,889	8,530	8,440	-3,899	1,518	2,484	-2,885	5,046	-7,197	9,438
10 Aufliegen d. Auslegers	50,800	0,000	0,000	-30,100	30,100	0,900	-0,900	0,900	-0,900	0,900
11: Bandzug	0,000	-10,590	-15,900	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
12: Wind 80 senkrecht	62,600	62,600	0,000	-28,700	28,700	28,700	-28,700	28,700	-28,700	28,700
13: Wind 25 senkrecht	19,500	19,500	0,000	-9,000	9,000	9,000	-9,000	9,000	-9,000	9,000
14: Neigung 10% senkrecht	33,053	33,053	0,000	-15,154	15,154	15,154	-15,154	15,154	-15,154	15,154
15: Neigung 5% senkrecht	16,526	16,526	0,000	-7,577	7,577	7,577	-7,577	7,577	-7,577	7,577
16: Neigung 3% senkrecht	9,891	9,891	0,000	-4,535	4,535	4,535	-4,535	4,535	-4,535	4,535
17: H (8+9+11+16)	195,664	93,125	76,940	-47,418	21,227	31,853	-36,264	60,035	-83,696	108,347
18: Hz^{extr} (17+3+13)	207,364	104,825	76,940	-48,618	22,427	48,653	-53,064	76,835	-100,496	125,147
19: Hz^a (1+7+11+12+15)	218,111	127,831	64,900	-57,362	41,652	54,812	-58,722	72,232	-85,642	99,952
20: S - Verstopfte Schurre (17+4+13)	204,464	101,925	76,940	-45,718	19,527	51,553	-55,964	79,735	-103,396	128,047
21: S - Ausleger aufliegend (17+10+13)	265,964	112,625	76,940	-86,518	60,327	41,753	-46,164	69,935	-93,596	118,247

Anlage A3: Lastkombination zur Ermittlung der Stabkraftschwingbreite für die Berechnung der Spannungsschwingbreite

LF	D' ₀ MIN	D' ₀ MAX	D' _{0Δ}	D' _{1,0} MIN	D' _{1,0} MAX	D' _{1,0Δ}	D ₈ MIN	D ₈ MAX	D _{8Δ}
1: Eigengewicht	131,650	131,650	0,000	70,820	70,820	0,000	58,900	58,900	0,000
2: Fördergut	29,360	29,360	0,000	2,490	2,490	0,000	29,840	29,840	0,000
3: Verstopfte Schurre (HZ)	-8,130	-8,130	0,000	-0,310	-0,310	0,000	7,330	7,330	0,000
4: Verstopfte Schurre (S)	-11,170	-11,170	0,000	-0,490	-0,490	0,000	10,030	10,030	0,000
5: 10% Fördergut	2,936	2,936	0,000	0,249	0,249	0,000	2,984	2,984	0,000
6: 15% Verstopfte Schurre (S)	-1,676	-1,676	0,000	-0,074	-0,074	0,000	1,505	1,505	0,000
7: Verkrustung	1,261	1,261	0,000	0,176	0,176	0,000	4,489	4,489	0,000
8: 1+2+7	162,271	162,271	0,000	73,486	73,486	0,000	93,229	93,229	0,000
9: Schwingwirkung	-16,227	16,227	32,454	-7,349	7,349	14,697	-9,323	9,323	18,646
10 Aufliegen d. Auslegers	50,800	50,800	0,000	0,000	0,000	0,000	0,900	0,900	0,000
11: Bandzug	0,000	0,000	0,000	-10,590	0,000	10,590	0,000	0,000	0,000
12: Wind 80 senkrecht	-64,120	64,120	128,240	-5,280	5,280	10,560	-15,380	15,380	30,760
13: Wind 25 senkrecht	-19,920	19,920	39,840	-1,640	1,640	3,280	-4,780	4,780	9,560
14: Neigung 10% senkrecht	-33,855	33,855	67,711	-2,788	2,788	5,576	-8,121	8,121	16,241
15: Neigung 5% senkrecht	-16,928	16,928	33,855	-1,394	1,394	2,788	-4,060	4,060	8,121
16: Neigung 3% senkrecht	-10,131	10,131	20,262	-0,834	0,834	1,668	-2,430	2,430	4,860
17: H (8+9+11+16)	135,912	188,629	52,716	54,713	81,668	26,956	81,476	104,981	23,506
18: Hz ^{extr} (17+3+13)	107,862	200,419	92,556	52,763	82,998	30,236	84,026	117,091	33,066
19: Hz ^a (1+7+11+12+15)	51,863	213,958	162,095	53,732	77,669	23,938	43,948	82,829	38,881
20: S - Verstopfte Schurre (17+4+13)	104,822	197,379	92,556	52,583	82,818	30,236	86,726	119,791	33,066
21: S - Ausleger aufliegend (17+10+13)	166,792	259,349	92,556	53,073	83,308	30,236	77,596	110,661	33,066