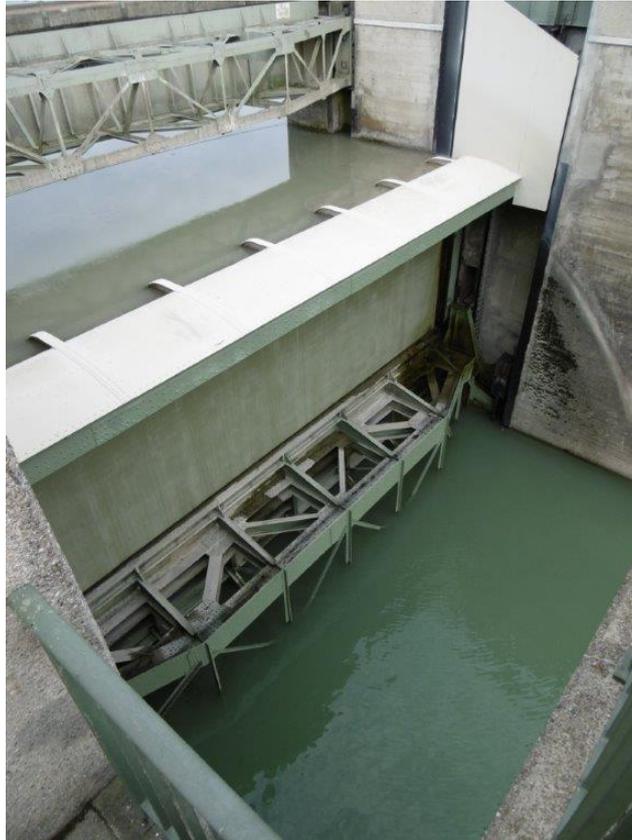


Verbund

KW Ering-Frauenstein Wehranlage - Doppelhakenschütze Statischer Nachweis

BEMB 16023



Dieser Bericht beinhaltet den statischen Nachweis der Wehrverschlüsse (Ober- und Unterschütz) des Innkraftwerks Ering-Frauenstein im Zuge des Wiederverleihungsverfahrens bedingt durch das Auslaufen der Kraftwerks-Konzessionsdauer und dient als Vorlage für den Maschinenbau-Sachverständigen DI Hirtenlehner.

Stand:

21.3. 2016

Verfasser:

VHP, EMB, Engelke, 50536

Berichtsart:

Berechnungsbericht

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Aufgabenstellung	3
2	Allgemeine Daten der Wehranlage	3
3	Hauptdaten des Ober- und Unterschütz	6
4	Werkstoffeigenschaften der verwendeten Stähle	7
5	Geometriemodell der Verschlüsse	11
6	Randbedingungen des Berechnungsmodells	14
7	Belastungsannahmen des Berechnungsmodells	20
8	Lastfälle des Berechnungsmodells	21
9	Berechnungsergebnisse	22
9.1	Verformungen	22
9.1.1	Lastfall 1: Schwerkraft und hydrostatische Wasserlast	22
9.1.2	Lastfall 2: Schwerkraft, hydrostatische Wasserlast und Eisdruck	24
9.2	Von Mises Vergleichsspannungen	26
9.2.1	Lastfall 1: Schwerkraft und hydrostatische Wasserlast	26
9.2.2	Lastfall 2: Schwerkraft und hydrostatische Wasserlast plus Eislast	33
9.2.3	Statischer Spannungsnachweis	39

1 Aufgabenstellung

Im Zuge des Wiederverleihungsverfahrens ist aufgrund fehlender Bestandsunterlagen zur Statik der Wehrfeld-Verschlüsse, ein statischer Nachweis für den Maschinenbau-Sachverständigen der österreichischen Wasserrechtsbehörde des BMLFUW, zu führen. Aufgrund der Tatsache, dass sich die 4 x orographisch linksufrig liegenden Wehrfelder auf österr. Staatsgebiet befinden, fällt die Beurteilung der Wehranlage dem SV der österr. Wasserrechtsbehörde zu.

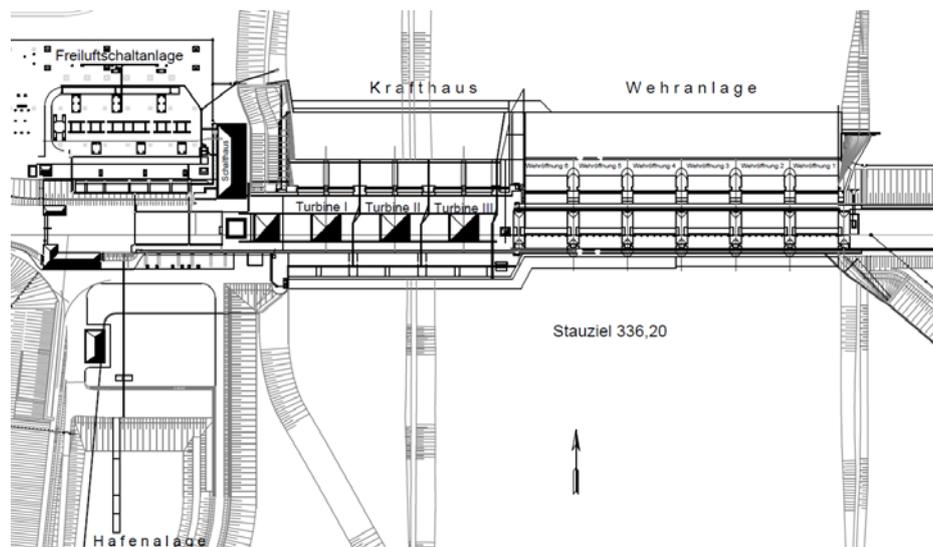


Bild 1: Gesamtansicht KW Ering-Frauenstein

2 Allgemeine Daten der Wehranlage

Hauptdaten der Wehrverschlüsse:

- ⇒ Bauart: Doppelhakenverschluss, Ober- und Unterschütz
- ⇒ Inbetriebnahme der Wehranlage: 1942
- ⇒ Hersteller: Dortmunder Union Brückenbau – Abteilung Wasserbau
- ⇒ Bauform: genietete Stahlkonstruktion
- ⇒ Antriebe: Elektromechanischer Hubkettenantrieb
- ⇒ Anzahl: 6 Wehrfelder (2x auf deutsches Staatsgebiet, 4x auf österr. Staatsgebiet)
- ⇒ Lichte Wehrfeldbreite x Gesamt-Verschlusshöhe: 18m x 12,30m
- ⇒ Kote-Stauziel: 336,20müNN
- ⇒ Kote-Wehrschwelle: 324,20müNN
- ⇒ max. UW-Pegel: HHQ 331,71müNN
- ⇒ Ausbaudurchfluss KW Ering-Frauenstein 1040 m³/s
- ⇒ Abfuhrvermögen der 6 x Wehrfelder: max. 7800m³/s bei Stauziel 336,20müNN
lt. Modellversuch TU-München, Versuchsbericht Nr. 340, 05.1999 (Anlage 1)
- ⇒ Abfluss bei Einhaltung der (n-1)-Regel mit 0,5 m Überstau: 6900 m³/s
- ⇒ Werkstoff der Verschluss-Struktur: St37, Festigkeit entsprechend S235JR (unlegierter Baustahl nach DIN EN 10025-2)

3 Hauptdaten des Ober- und Unterschütz

Die Hauptdaten des Oberschützes (OS) gliedern sich wie folgt:

- ⇒ Gesamtbreite: 18m
- ⇒ Gesamthöhe: 7,53m
- ⇒ Laufarmaturen: je 1 x Hauptlaufwagen pro Verschlussseite
- ⇒ Theoretische Maximal-Absenkung: 4,30m
- ⇒ Maximale Absenkung lt. Wehrbetriebsordnung: 2,50m
- ⇒ Kote Überfallshaube OK in Staustellung: 336,50müNN
- ⇒ Kote Überfallshaube OK bei max. Absenkung: 332,20müNN
- ⇒ Kote Überfallshaube OK bei max. Anhebung: 344,70müNN
- ⇒ Betätigung mittels Laschen-Hubkette

Die Hauptdaten des Unterschützes (US) gliedern sich wie folgt:

- ⇒ Gesamtbreite: 18m
- ⇒ Gesamthöhe: 5,90m
- ⇒ Laufarmaturen: je 2 x Hauptlaufwagen pro Verschlussseite
- ⇒ Gesamthub: 12,50m
- ⇒ Betätigung mittels Laschen-Hubkette
- ⇒ ab 175m³/s Wehrabfluss je Feld werden über den Unterschütz abgeführt

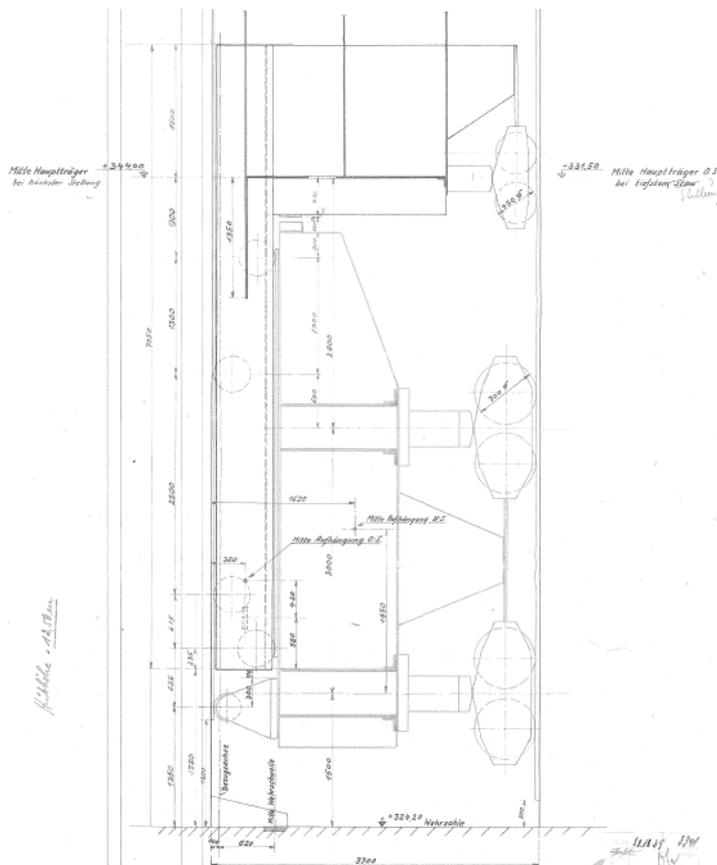


Bild 6: Schematisch Darstellung von Ober- und Unterschütz mit Laufarmaturen

4 Werkstoffeigenschaften der verwendeten Stähle

Zur Beurteilung der Werkstoffeigenschaften der Verschlüsse zum Zeitpunkt der Errichtung, wird ein Verweis auf die zulässigen Spannungen im Brückenbau im Jahr 1939 durchgeführt.

Als Quellenverweis dient folgendes Werk:

Betrachtung über geschweißte Brücken - Erkenntnisse, Erfahrungen und Folgerungen, Dr. Schächterle (Berlin 1939).

⇒ Zulässige *Spannungs-Schwingweite* des Baustahls St37:

Für den Grundwerkstoff galt im Zug- Druckgebiet ein zul. Wert von 14kg/mm^2 (**137MPa - schwellende Beanspruchung**) bzw. 7kg/mm^2 (**68MPa - wechselnde Beanspruchung**) von nicht geschweißten Bauteilen.

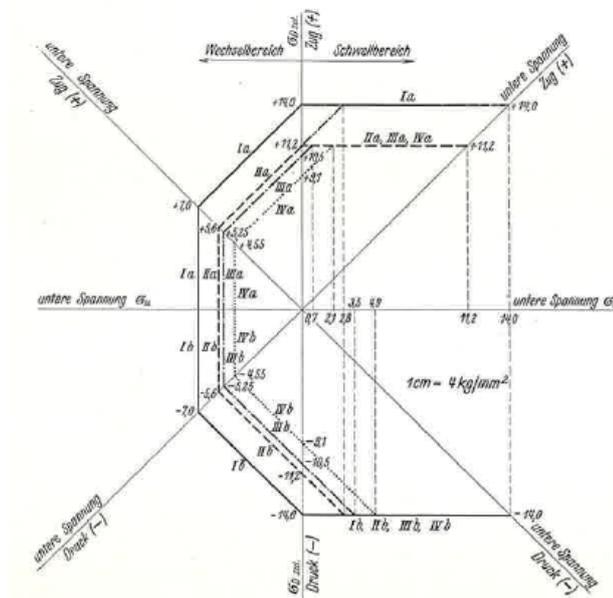


Bild 7: Dauerfestigkeitsschaubild St37 - 1939

Im Vergleich hierzu wird ein Dauerfestigkeitsschaubild nach Smith für den unlegierten Baustahl S235 dargestellt, welcher in Bezug auf die Festigkeitswerte mit dem verwendeten Baustahl St37 verglichen werden kann (Quelle: Lehrbuch Muokatut teräkset ISBN 951-817-751-1).

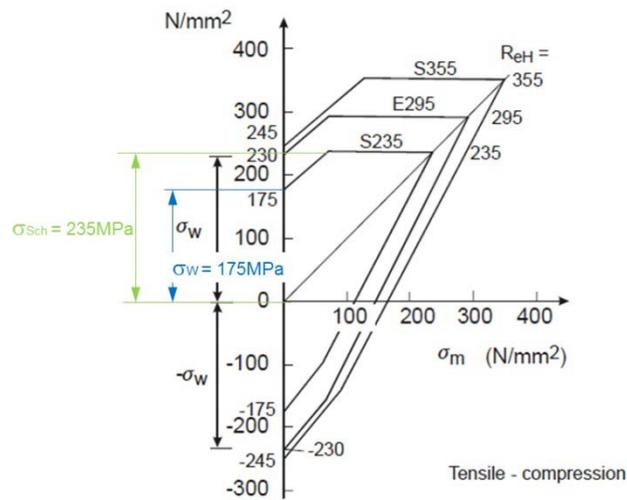


Bild 8: Dauerfestigkeitsschaubild S235 nach DIN EN10025

Unter Berücksichtigung eines Teilsicherheitsbeiwertes von 1,35 (Referenz: DIN EN 1993-1-9_2013, Tabelle 3.1), ergeben sich für den Baustahl S235, basierend aus den Werten aus dem Smith-Diagramm, folgende Werte:

⇒ $\sigma_{\text{Schwell_zul}} = 174 \text{ MPa}$

⇒ $\sigma_{\text{W_zul}} = 130 \text{ MPa}$.

⇒ Zulässige *Spannungs-Schwingweite* für den Baustahl St52:

Für den Grundwerkstoff galt im Zug- Druckgebiet ein zul. Wert von 16 kg/mm^2 (**157 MPa - schwellende Beanspruchung**) bzw. 8 kg/mm^2 (**79 MPa - wechselnde Beanspruchung**) von nicht geschweißten Bauteilen.

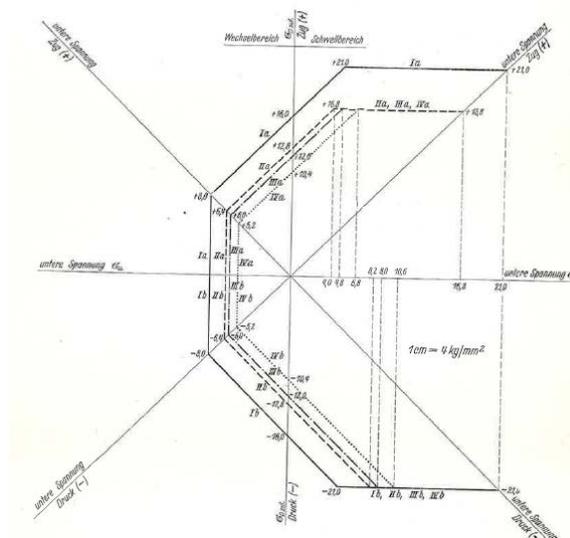


Bild 9: Dauerfestigkeitsschaubild St52 - 1939

Zur Beurteilung eines ev. erforderlichen Betriebsfestigkeitsnachweises wird auf die gültige Version der DIN 19704-1:2014:11, Kapitel 9.5.3 – Nachweis der Ermüdung verwiesen.

Der Nachweis lt. Norm kann entfallen:

⇒ Wenn die Gesamtanzahl der Spannungsspiele $N_{\max} < 10^4$ beträgt

⇒ Wenn die Schwingbreiten der Nennspannungen $\Delta\sigma < 26/\gamma_{Mf}$ und $\Delta\tau < 36/\gamma_{Mf}$ sind.

Basierend auf einer Auswertung der Betriebstage mit Wehrüberfall über die letzten 3 Jahre ergibt sich ein Mittelwert der Lastspiele pro Jahr von $N' = 116,8$.

Dies entspricht 16% aller Tage mit Q-Tagesmittel über dem Ausbaudurchfluß von 1010 m³/s, wobei angenommen wird, dass an jedem dieser Tage jeder Verschluss der 6 x Wehrfelder (Ober- und Unterschütz) jeweils 2 x bewegt wird.

Diese Anzahl wird über die Bestandsdauer der Wehranlage (Inbetriebnahme: 1942) hochextrapoliert und ergibt einen worst-case Ansatz in Bezug auf die Gesamt-Lastspielzahl für jedes Wehrfeld über die Bestandsdauer von $N = 8.643$.

Um auch die in Zukunft zu erwartenden Lastspiele zu berücksichtigen, wird eine Konzessionsdauer nach dem abgeschlossenen Wiederverleihungsverfahren von 30 Jahren angenommen. Damit ergibt sich für jeden Wehrverschluss eine Gesamt-Lastwechselzahl von $N_{\text{Betrieb}} = 12.147$ Lastzyklen.

Auf Grund der Tatsache, dass ein Wehrüberlauf keinen kompletten Lastzyklus einer schwellenden Betriebsbelastung zwischen $\sigma_{\max} = \sigma_O$ und $\sigma_U = 0$ darstellt, kann trotz der geringfügigen Überschreitung der Grenz-Lastspielzahl N_{\max} durch die angenommene, betriebliche Lastspielzahl N_{Betrieb} ein Betriebsfestigkeitsnachweis entfallen.

Nur bei Abdämmung eines Wehrfeldes während der Revisionsmaßnahmen ergibt sich ein kompletter Lastzyklus in Form einer Zug- bzw. Druck-Schwellbelastung.

Es wird daher ein statischer Spannungsnachweis der Wehrverschlüsse geführt. Für die rein statische Beanspruchung wird als Referenz die Stahlwasserbau-Norm DIN19704-1/11.2014 für den Werkstoff S235 bzw. S355 herangezogen: Nach Tabelle 6 ist für Konstruktionen mit Zugbeanspruchung gegenüber Bruchversagen ein Teilsicherheitsbeiwert der Beanspruchbarkeit von $\gamma_{M2} = 1,25$ anzuwenden.

Als konservativer Ansatz kommt allerdings der etwas höhere Teilsicherheitsfaktor lt. DIN EN 1993-1-9 mit $\gamma_{Mf} = 1,35$ zur Anwendung.

Der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit ergibt daher für den Werkstoff S235JR (Werkstoffnummer 1.0038) mit einem charakteristischen Wert der Streckgrenze von $R_{eH} = 235 \text{ MPa}$ für Blechstärken $< 16 \text{ mm}$ einen (Amplituden)-Wert von **174 MPa**.

Der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit ergibt daher für den Werkstoff S355JR (Werkstoffnummer 1.0045) mit einem charakteristischen Wert der Streckgrenze von $R_{eH} = 355 \text{ MPa}$ für Blechstärken $< 16 \text{ mm}$ einen (Amplituden)-Wert von **263 MPa**.

5 Geometriemodell der Verschlüsse

Für die Berechnung der Wehrverschlüsse wurde basierend auf Bestandsunterlagen bzw. Naturmaßaufnahmen vor Ort ein 3D-Geometriemodell von Ober- und Unterschütz im CAD-System Inventor Professional 2013 erstellt.

Auf Grund der Tatsache, dass es sich bei den Wehrverschlüssen um genietete Stahlkonstruktionen handelt, wurden die Überlappungsbereiche der Nietstöße nicht modelliert.

Dadurch ergeben sich im Modell teilweise geringere Gesamtwandstärken als in der Realität und weiters zeigt das Modell Blechstärkensprünge bzw. lokale Kerben bei Anschlüssen von Trägern, die in der Realität auf Grund der Blechdopplungen im Nietstoßbereich so nicht vorhanden sind.

Ebenso können die bei der Verformung der Verschlüsse aktivierten Reibungseffekte im Kontaktbereich der Nietstöße nicht abgebildet werden, welche zu einem „Verschmieren“ der effektiv auftretenden Spannungen im Überlappungsbereich der vernieteten Bleche führen.

Andererseits wird die lokale Kerbwirkung der Nietbohrungen der Bleche im Modell nicht berücksichtigt.

Dieser Modellierungsansatz kann zusammenfassend als ausreichend konservativ beurteilt werden.

Um die lokalen Steifigkeitsverhältnisse der Bauteilstruktur möglichst real abzubilden, wurden sämtliche Aussteifungsträger entsprechend der realen Bauteilgeometrie abgebildet.

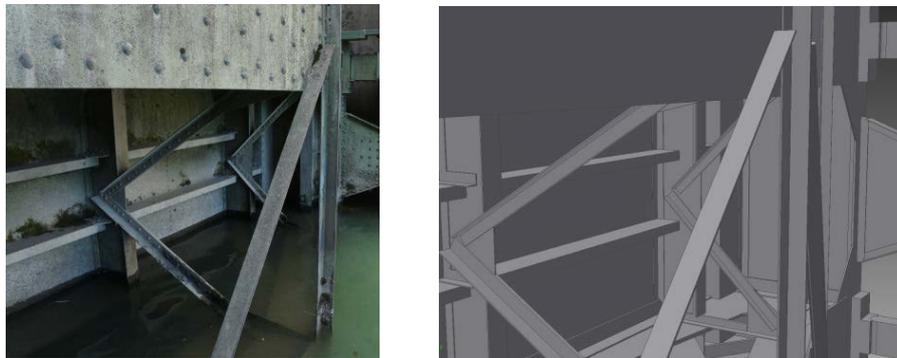


Bild 11: Gegenüberstellung Realgeometrie-Modell (Unterschütz/Zuggurt)



Bild 12: Gegenüberstellung Realgeometrie-Modell (Unterschütz/Stauhaut)

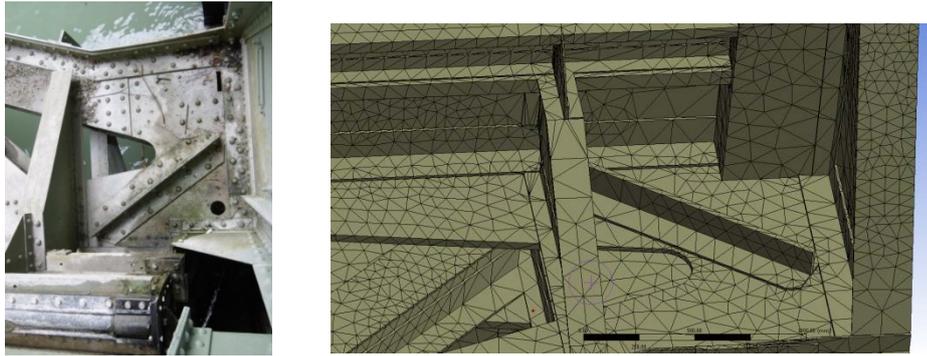


Bild 13: Gegenüberstellung Realgeometrie-vernetztes Modell (Unterschütz/Seitenbereich)

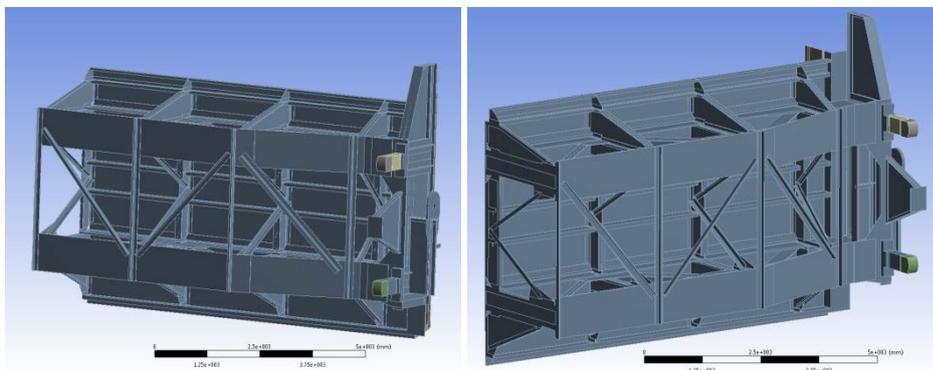


Bild 14: Modell - Unterschütz

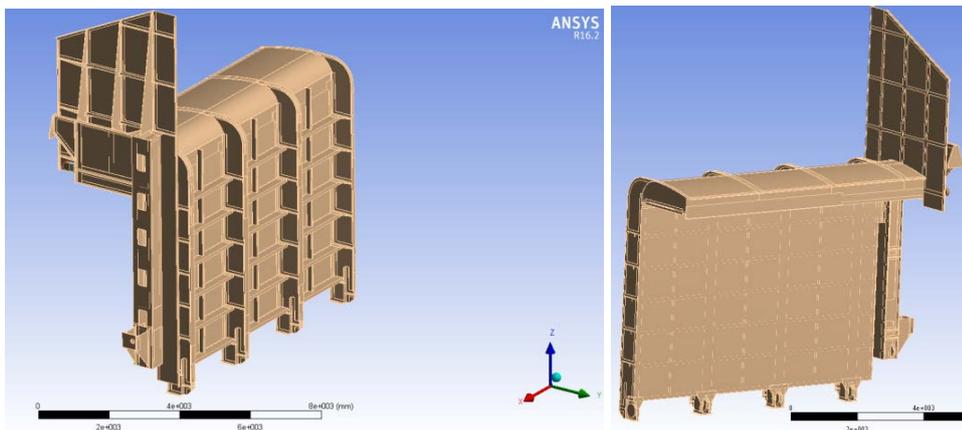


Bild 15: Modell – Oberschütz

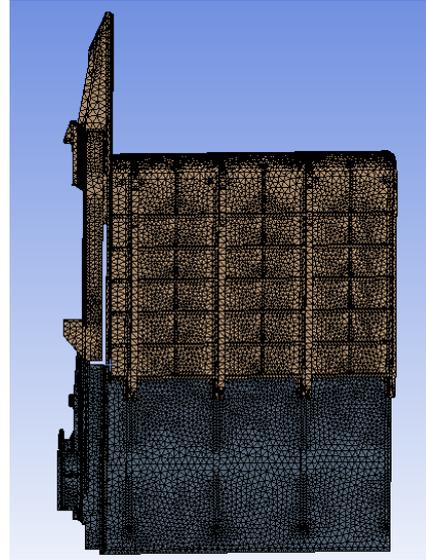
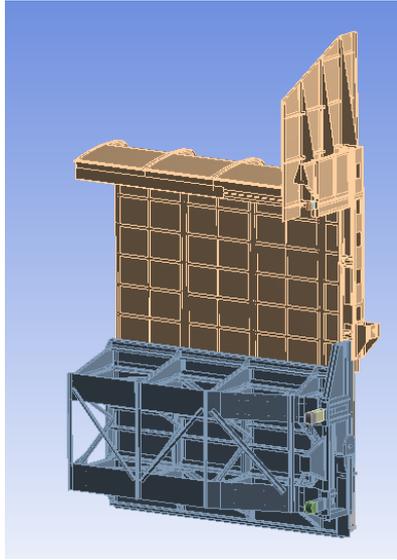


Bild 16: globales Geometriemodell / vernetztes Modell – Oberschütz und Unterschütz

6 Randbedingungen des Berechnungsmodells

Neben einer möglichst real abgebildeten Bauteilgeometrie ist eine Definition der Lagerungsbedingungen des Bauteils erforderlich, welche der physikalischen Realität im Betrieb der Anlage entspricht und daher das mechanische Ersatzmodell möglichst exakt abbildet. Auf Grund der symmetrischen Ausführung der Wehrverschlüsse wurde nur eine Hälfte von Ober- und Unterschütz modelliert, wodurch der Rechenaufwand deutlich reduziert werden konnte, ohne die Genauigkeit der Ergebnisse negativ zu beeinflussen.

Kontaktbereiche des Oberschützes:

- ⇒ zum Unterschütz: Spant-Laufrollen zur Abtragung der äußeren Lasten im mittleren Bereich des Verschlusses
- ⇒ zum Unterschütz: Brustdichtung über den gesamten Hubbereich des Oberschützes
- ⇒ zum Bauwerk: Hauptlaufrollen zur Abtragung der äußeren Lasten des Randbereiches
- ⇒ zum Bauwerk: Seitendichtung über den gesamten Hubbereich des Oberschützes

Kontaktbereiche des Unterschützes:

- ⇒ zum Bauwerk: Hauptlaufrollen zur Abtragung der gesamten, äußeren Lasten
- ⇒ zum Bauwerk: Seitendichtung über den gesamten Hubbereich des Unterschützes
- ⇒ zum Drempe!l: Sohldichtung über die gesamte Verschlussbreite

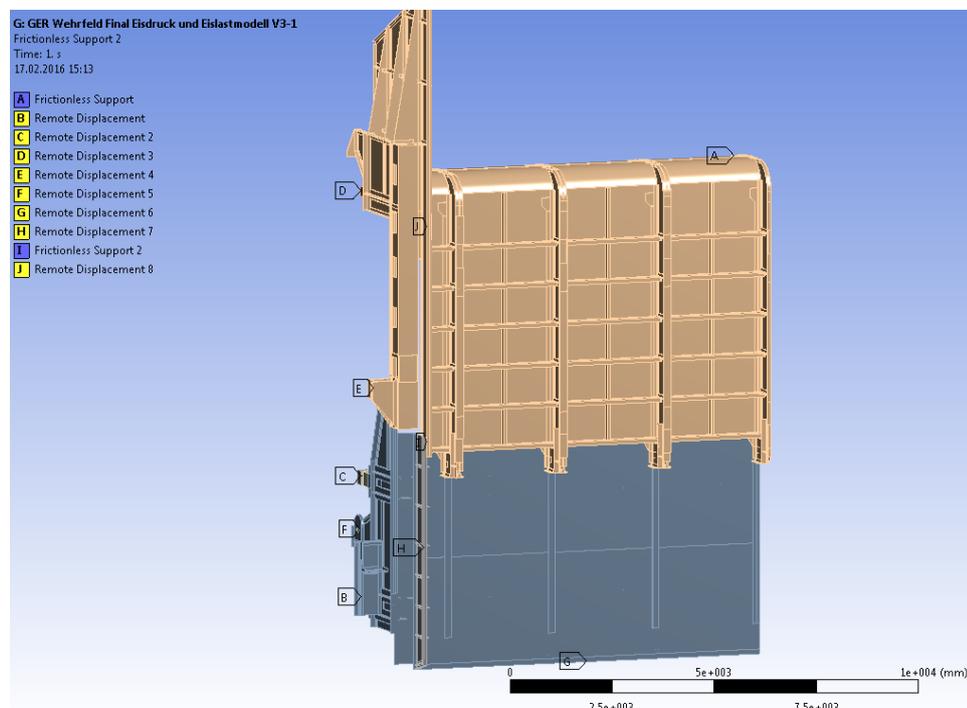


Bild 17: Lagerungs- und Randbedingungen der Berechnung

Koordinatensystem:

- ⇒ X-Richtung: vom orographisch linken Ufer zum rechten Ufer
- ⇒ Y-Richtung: entgegen der Fließrichtung (Staudruck)
- ⇒ Z-Richtung: senkrecht nach oben

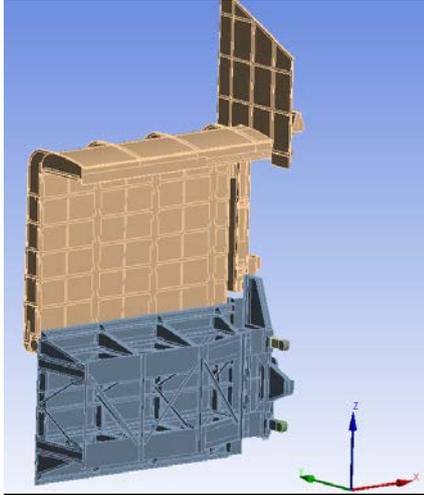


Bild 18: Globales Koordinatensystem der Wehrverschlüsse

Beschreibung der Lagerungs-Randbedingungen lt. Bild 17:

- ⇒ A: Bauteil Symmetrie-Ebene

Durch die Festlegung der mittleren Symmetrie-Ebene der beiden Bauteile in Form der Lagerung als *frictionless support* wird eine ungehinderte Verformung der Verschlüsse in der Mittelebene sichergestellt, ein Ausweichen der Bauteile aus dieser Ebene ist nicht möglich. Dies entspricht dem in der Realität auftretenden Verformungsverhalten des kompletten Bauteiles.

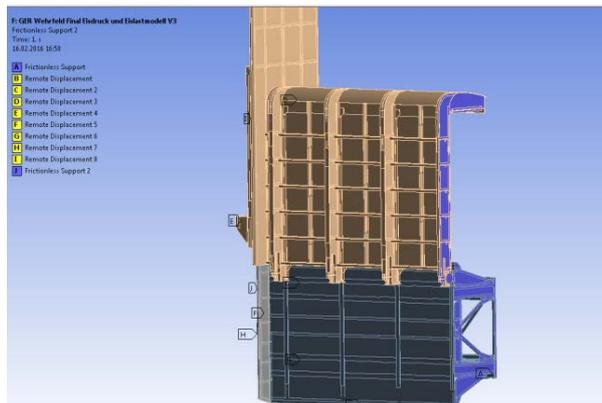


Bild 19: Lagerungsdefinition der Symmetrie-Ebene der Verschlüsse

- ⇒ B, C, D: Kippstelenlagerung

Lagerung im Modell: „remote displacement“

- Verschiebung in X-Richtung: gesperrt
- Verschiebung in Y-Richtung: gesperrt

Verschiebung in Z-Richtung:	gesperrt
Rotation um X-Achse:	frei
Rotation um Y-Achse:	frei
Rotation um Z-Achse:	frei

Anmerkung:

Mit der Funktion „remote displacement“ kann mit der FE-Software ANSYS 16.2 eine Körperkante bzw. Berührungsfläche in Bezug auf ihre 6 x Freiheitsgrade definiert werden. Es können aber auch Verschiebungen bzw. Rotationen Betrags- und Richtungsmäßig vordefiniert werden.

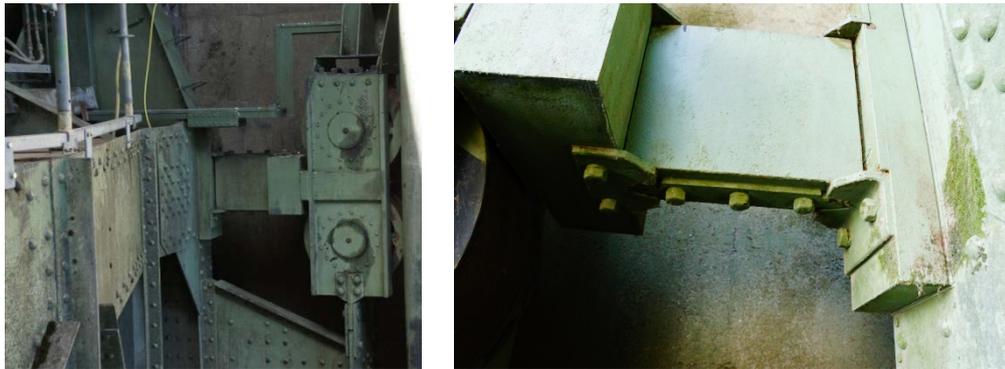


Bild 20: Kippstelzenlagerungen Unterschütz / Oberschütz

⇒ E, F: Anhängungspunkte der Hubkette

Lagerung im Modell: „remote displacement“

Verschiebung in X-Richtung:	gesperrt
Verschiebung in Y-Richtung:	frei
Verschiebung in Z-Richtung:	gesperrt
Rotation um X-Achse:	frei
Rotation um Y-Achse:	frei
Rotation um Z-Achse:	frei



Bild 21: Oberschütz – Anhängung der Hublaschen Kette

⇒ G: Aufstandslinie der Sohldichtung
Lagerung im Modell: „remote displacement“

Verschiebung in X-Richtung:	frei
Verschiebung in Y-Richtung:	frei
Verschiebung in Z-Richtung:	gesperrt
Rotation um X-Achse:	frei
Rotation um Y-Achse:	frei
Rotation um Z-Achse:	frei

Anmerkung:

Dadurch kann die freie Durchbiegung des Unterschützes in Fließrichtung entlang der Aufstandskante der Sohldichtung auf der Wehrschwelle sichergestellt werden.

⇒ H, I: Aufstandslinie der Seitendichtung am Unter- bzw. Oberschütz
Lagerung im Modell: „remote displacement“

Verschiebung in X-Richtung:	gesperrt
Verschiebung in Y-Richtung:	frei
Verschiebung in Z-Richtung:	frei
Rotation um X-Achse:	frei
Rotation um Y-Achse:	frei
Rotation um Z-Achse:	frei

⇒ J: Aufstandslinie der Seitendichtung am Oberschütz

Lagerung im Modell: *frictionless support*

Durch die Randbedingung J wird zusätzlich ein Ausweichen der relativ weichen Seitendichtungsstruktur quer zur Fließrichtung verhindert, dies tritt auch in der Realität durch das Anliegen der Seitendichtungsprofile an die bauwerksseitigen Schleifbleche auf.

⇒ Kontaktbereich der Spant-Laufrollen des OS auf den Schienen des US:

Definition als reibungsbehafteter Kontakt. Der gewählte Reibwert zwischen Laufrad und Schiene von $\mu_{\text{Roll}} = 0,05$ entspricht dem Maximalwert für Stahl/Stahl für geschmierten Kontakt (Referenz: DIN 19704-1:2014:11, Tabelle 4).

Damit wird der Bestandssituation auf Grund des Anlagenalters Rechnung getragen. Laut gültiger STWB-Norm (Kapitel 6.4.2) würden sich ein Rollreibungskoeffizient für die Spantlaufrollen $\varnothing 430\text{mm}$ und Brinellhärte $<150\text{HBS}$ von $\mu_{\text{Roll}} = 0,0023$ ($f=1,0\text{mm}$) ergeben.

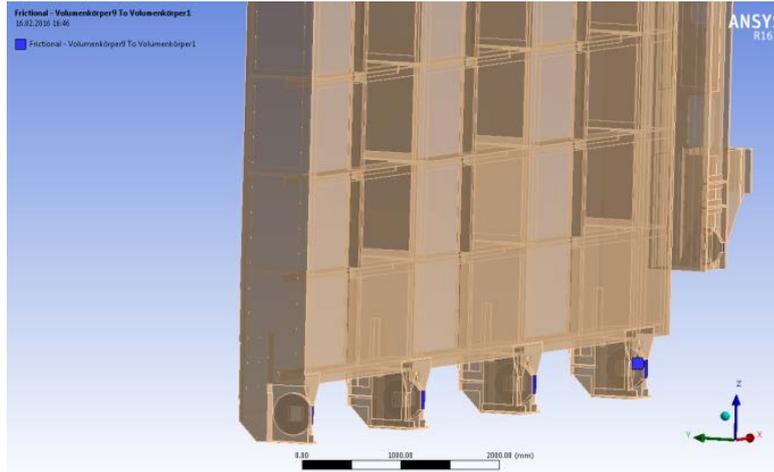


Bild 22: Kontaktdefinition der Spant-Laufrollen auf dem Oberschütz

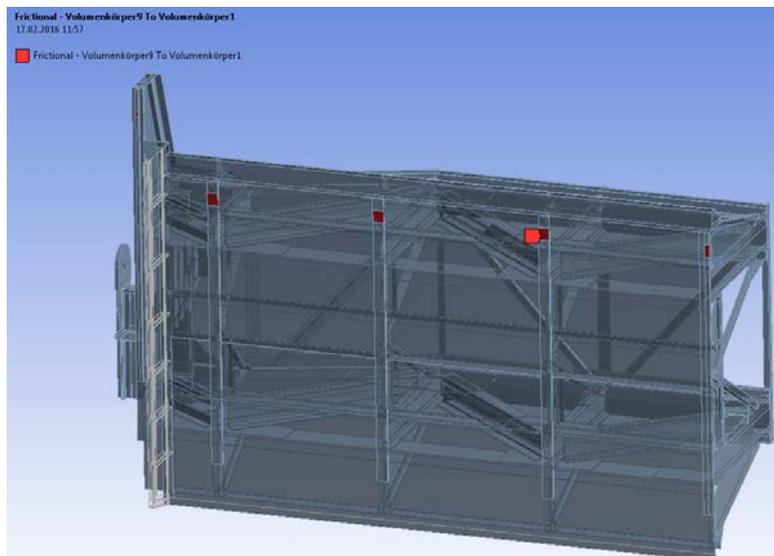


Bild 23: Kontaktdefinition auf den Spantlaufschienen auf dem Unterschütz

<input type="checkbox"/> Friction Coefficient	5.e-002
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Each Iteration
Stabilization Damping Factor	0.
Pinball Region	Program Controlled
Time Step Controls	None
Geometric Modification	
Interface Treatment	Add Offset, No Ramping
<input type="checkbox"/> Offset	0. mm
Contact Geometry Correction	None
Target Geometry Correction	None

Bild 24: Randbedingungen der Kontaktdefinition mit Rollreibungskoeffizienten $\mu=0,05$

⇒ Kontaktbereich der Kippstelzen (Anbindung zu den Hauptlaufwagen)
 Definition als reibungsbehafteter Kontakt mit Reibwert $\mu=0,1$. Dies entspricht dem Mindestwert des Gleitreibungskoeffizienten für Kontaktpartner Stahl/Stahl im wasserbenetzten Bereich nach DIN 19704-1:2014:11, Tabelle 4.

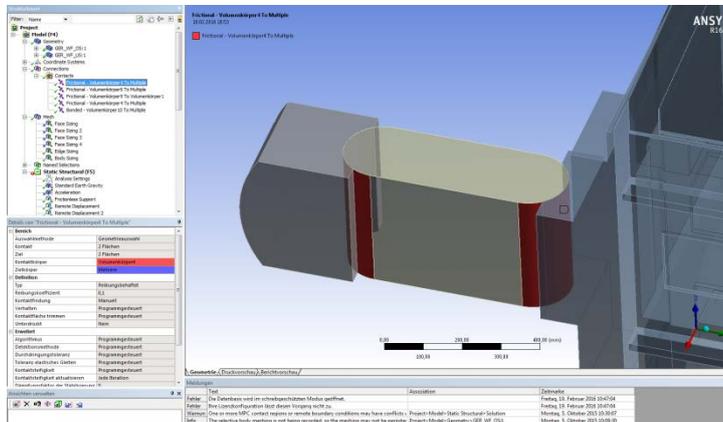


Bild 25: Kontaktdefinition Unterschutz – oberer Hauptlaufwagen

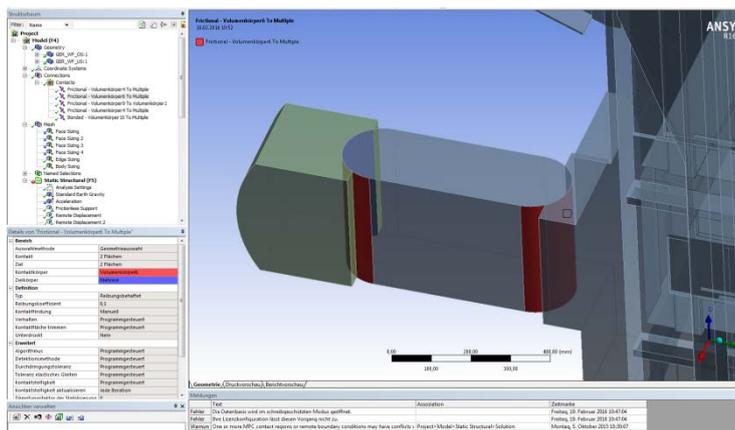


Bild 26: Kontaktdefinition Unterschutz – unterer Hauptlaufwagen

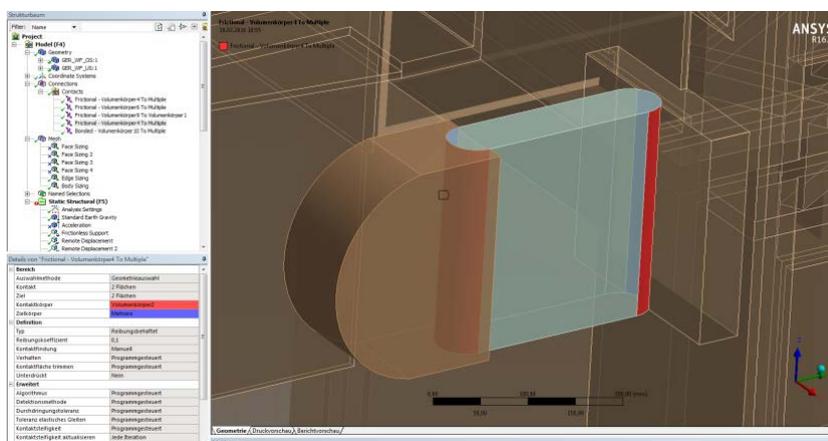


Bild 27: Kontaktdefinition Oberschutz –Hauptlaufwagen

7 Belastungsannahmen des Berechnungsmodells

Als äußere Lasten wurden im FE-Modell folgende charakteristische Einwirkungen definiert:

Hydrostatische Wasserlast:

Bis zur Kote OK-Oberschütz in der Geschlossen-Stellung der Verschlüsse.

Dieser Ansatz stellt eine konservative Lastannahme dar, da bei der hydrostatischen Wasserlast ein Wellenschlag von 0,3m mitberücksichtigt wurde:

OK-Oberschütz in Staustellung 336,50müNN vs. Stauziel 336,30müNN.

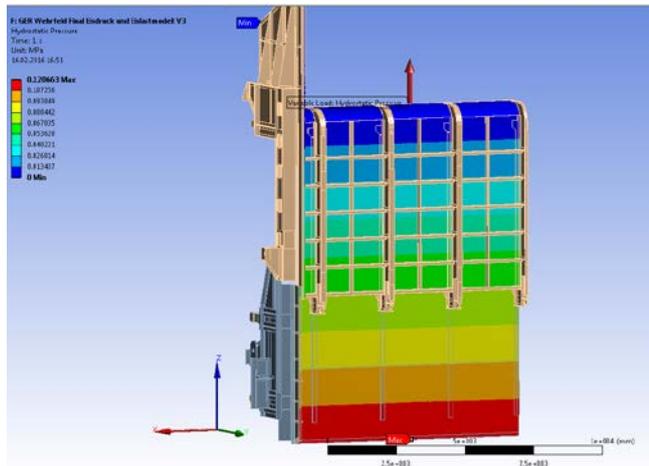


Bild 28: Definition der hydrostatischen Wasserlast auf den Verschluss

Eisdruck nach DIN 19704-1-11. 2014:

Für Binnengewässer wird ein Eisdruck von 150kN/m^2 von Kote OK-Oberschütz bis 30cm unterhalb der Verschluss-OK angesetzt.

Dieser Ansatz entspricht einer konservativen Lastfall-Annahme, da sämtliche Wehrfelder über eine Luftperlanlage verfügen, welche in den Wintermonaten unabhängig von der aktuellen Außentemperatur im Durchlaufbetrieb aktiviert wird.

Anmerkung: Zur Verbesserung des Konvergenzverhaltens des Gesamtmodells wird der Eisdruck erst in einem zweiten Lastschritt aufgebracht ($150\text{kN/m}^2 - 0,15\text{MPa}$).

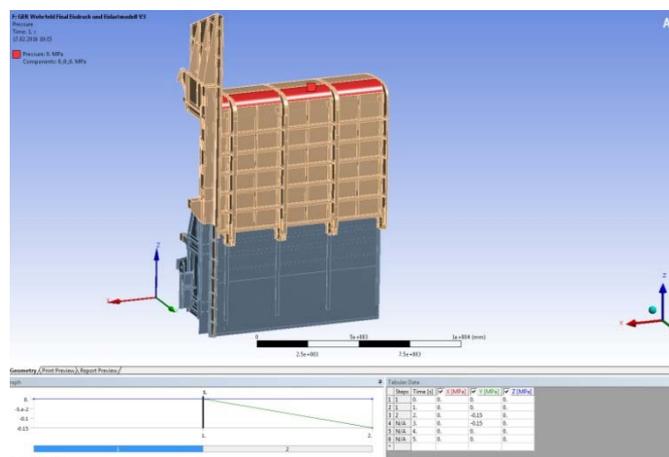


Bild 29: Definition des Eisdruckes auf den Verschluss

Struktur-Eigengewicht:

Das Eigengewicht der Verschlüsse wird durch aufbringen der Erdbeschleunigung auf die Struktur berücksichtigt.

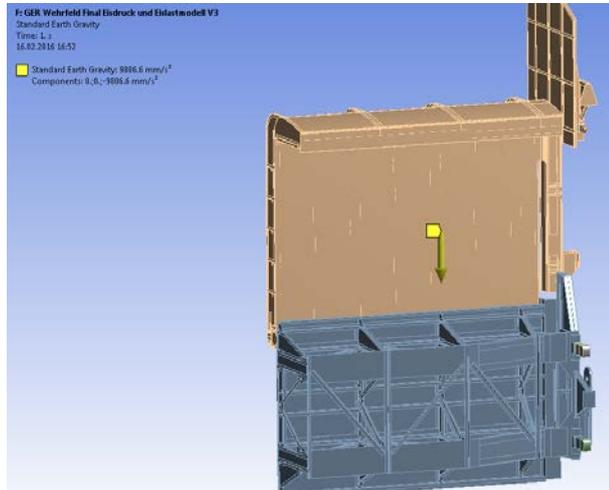


Bild 30: Definition der Erdbeschleunigung (Eigengewicht)

8 Lastfälle des Berechnungsmodells

Die äußeren Lasten wurden im Berechnungs-Modell wie folgt berücksichtigt:

⇒ Lastfall 1: Hydrostatische Wasserlast + Eigengewicht

⇒ Lastfall 2: Hydrostatische Wasserlast + Eigengewicht + Eisdruck nach DIN19704

9 Berechnungsergebnisse

9.1 Verformungen

Der Übersichtlichkeit halber werden die Verformungen für die beiden Verschlüsse getrennt dargestellt.

9.1.1 Lastfall 1: Schwerkraft und hydrostatische Wasserlast

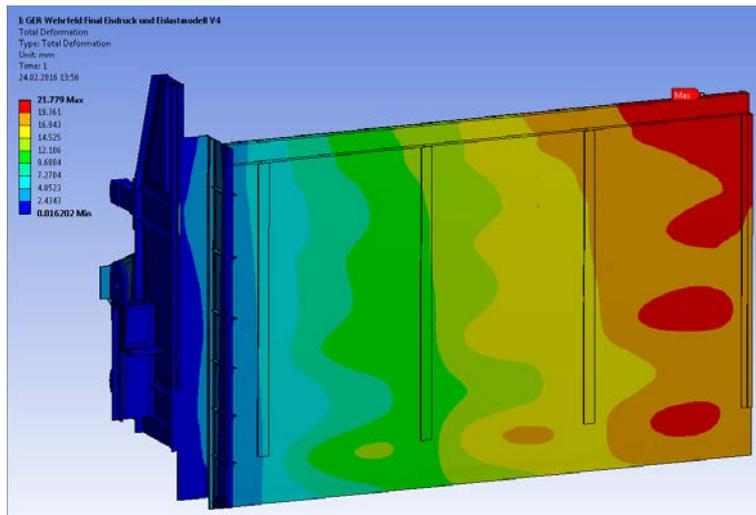


Bild 31: Unterschütz – Gesamtverformung OW-seite

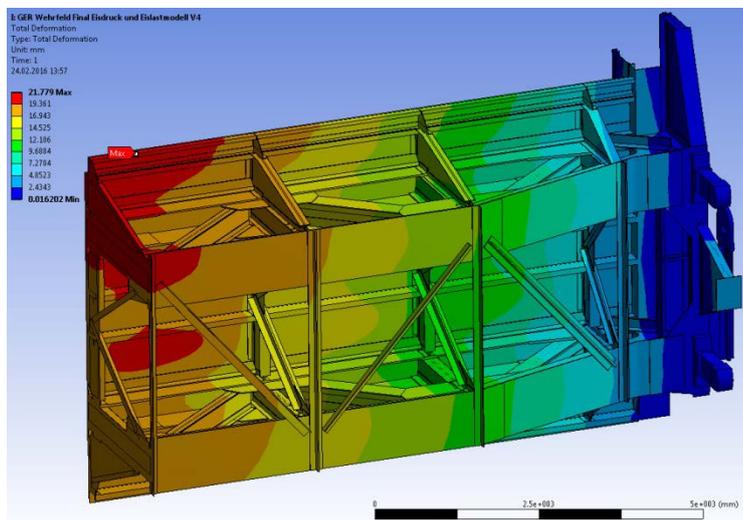


Bild 32: Unterschütz – Gesamtverformung UW-seite

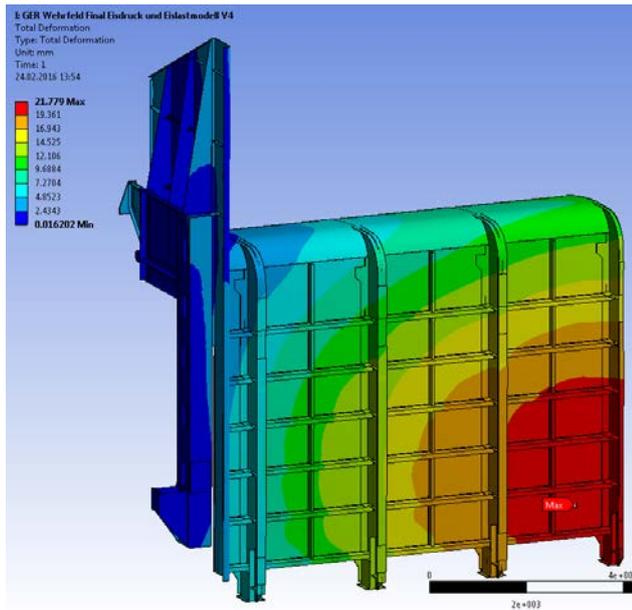


Bild 33: Oberschütz – Gesamtverformung OW-seite

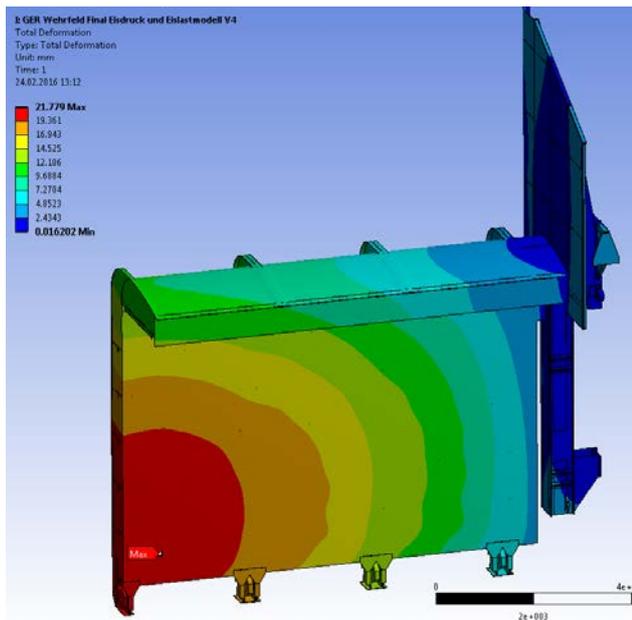


Bild 34: Oberschütz – Gesamtverformung UW-seite

Das Maximum der Gesamtverformung ergibt sich im mittleren, unteren Stauhaut-Bereich Oberschützes, sowie im oberen, mittleren Bereich des Unterschützes. Dieser Verformungsverlauf entspricht auch den Erwartungen, da der Lastabtrag der Obertafel die Verformungen des Unterschützes durch die hydrostatische Wasserlast überlagert und daher im oberen Bereich der Untertafel ein entsprechendes Maximum erreicht. Die Gesamtverformungen erreichen Maxima bis 22mm.

9.1.2 Lastfall 2: Schwerkraft, hydrostatische Wasserlast und Eisdruck

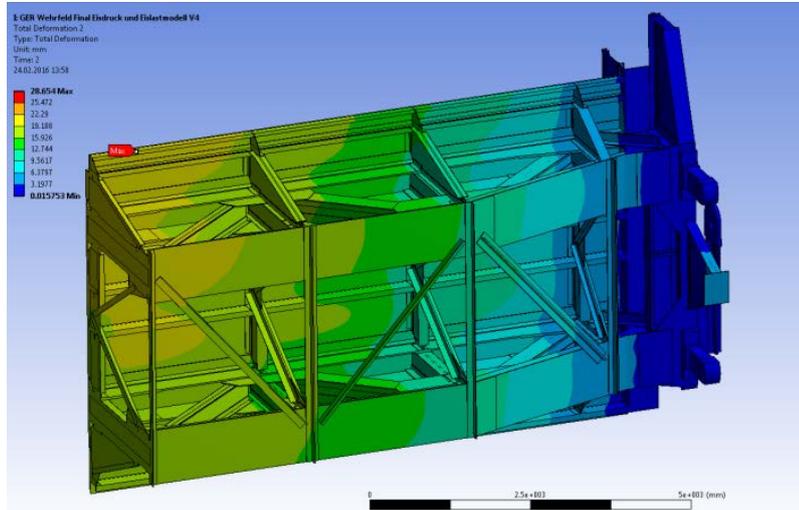


Bild 35: Unterschütz – Gesamtverformung OW-seite

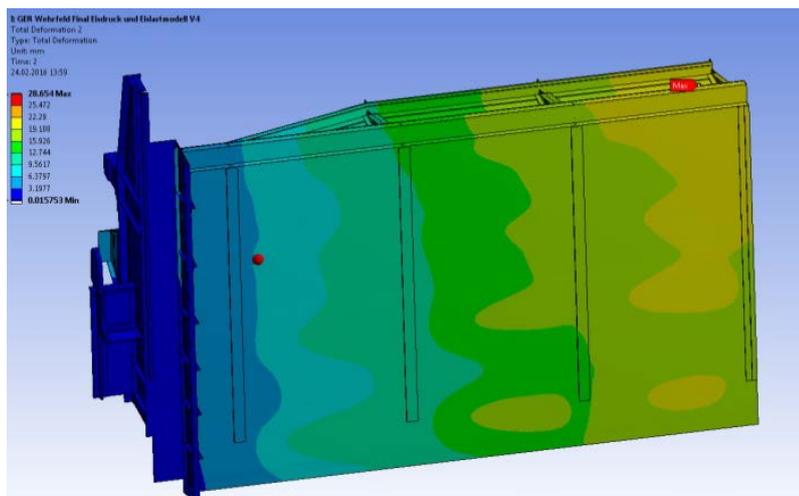


Bild 36: Unterschütz – Gesamtverformung UW-seite

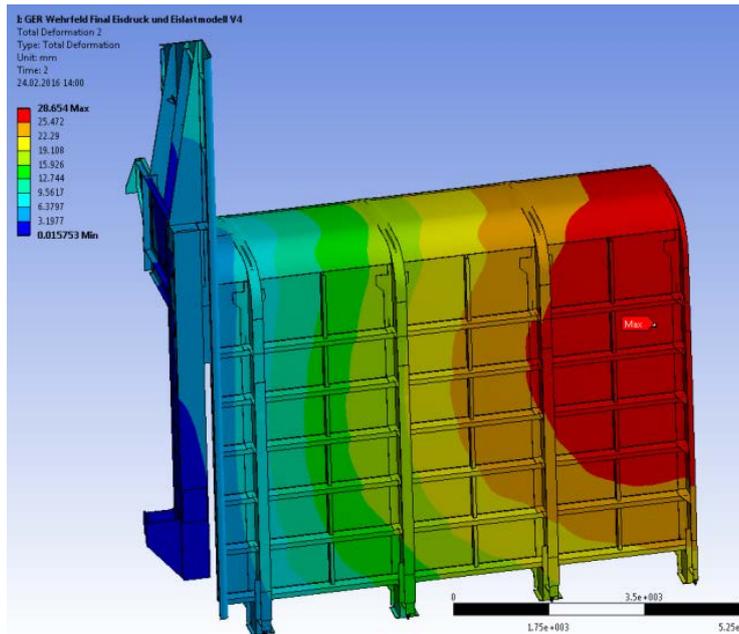


Bild 37: Oberschütz – Gesamtverformung OW-seite

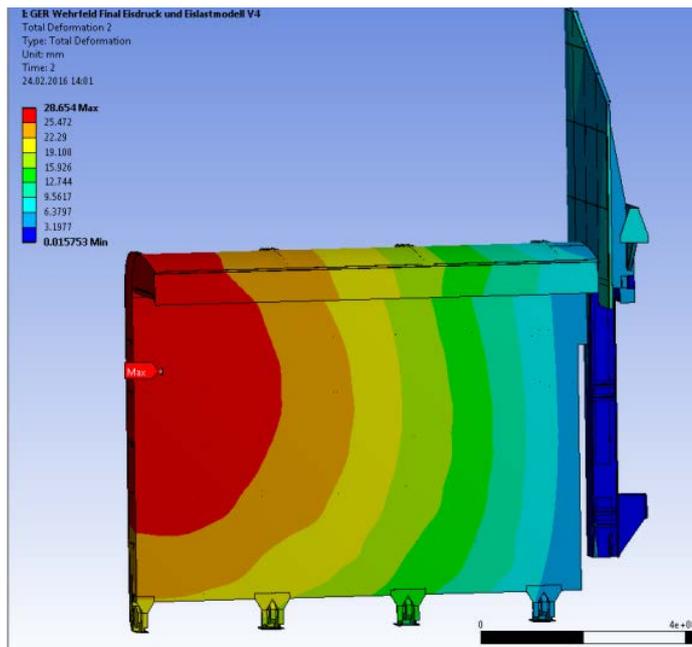


Bild 38: Oberschütz – Gesamtverformung UW-seite

Das absolute Maximum verlagert sich bei LF2 erwartungsgemäß zur Obertafel, da im oberen Bereich der Stauhaut der Eisdruk die hydrostatische Wasserlast zusätzlich überlagert. Der Unterschütz zeigt wieder im mittleren, oberen Bereich der Stauhaut sein Maximum.

Der Maximalwert von 29mm kann für die Gebrauchstauglichkeit als unkritisch bewertet werden.

9.2 Von Mises Vergleichsspannungen

Der Übersichtlichkeit halber werden die Vergleichsspannungen für die beiden Verschlüsse getrennt dargestellt.

9.2.1 Lastfall 1: Schwerkraft und hydrostatische Wasserlast

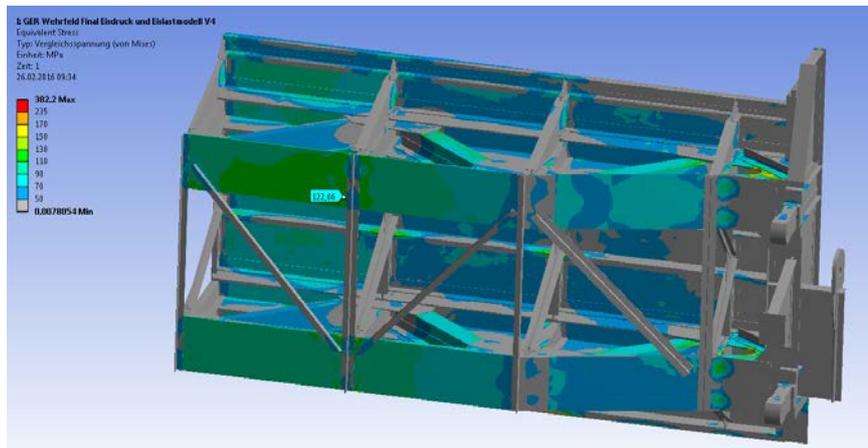


Bild 39: Unterschütz – Vergleichsspannungen OW-seite

Die Stauhaut des Unterschützes zeigt maximale Vergleichsspannungswerte von 123MPa im mittleren Bereich der Stauhaut.

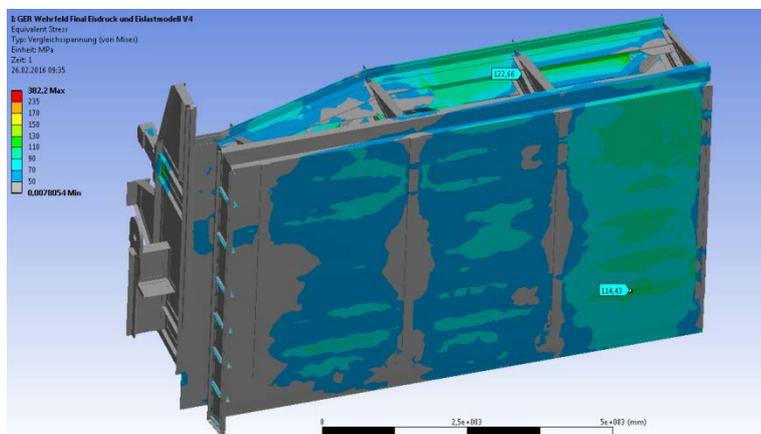


Bild 40: Unterschütz – Vergleichsspannungen UW-seite

Der Zuggurt des Unterschützes zeigt maximale Vergleichsspannungswerte von 114MPa im mittleren Bereich der tragenden Struktur.

Die Spannungsspitze im Bereich des obersten, seitlichen Deckblechs kann durch den lokalen Steifigkeitssprung der modellierten Blech-Aufdopplung des entsprechenden Nietstoßes erklärt werden, welcher in der Realität nicht vorhanden ist (Maximum-Marker mit 382MPa in Bild 41, 42).

Dieser Effekt führt zu einer lokalen Spannungskonzentration am modellierten Blechübergang und zeigt entsprechend hohen Zugspannungen.

Die farblich rot ausgewiesenen Flächen zeigen generell Vergleichsspannungen $>235\text{MPa}$, wobei der hohe Vergleichsspannungswert in dem, dem Marker gegenüberliegenden Rundungsbereich, aus lokal hohen Druckspannungen resultiert (siehe Bild 42).

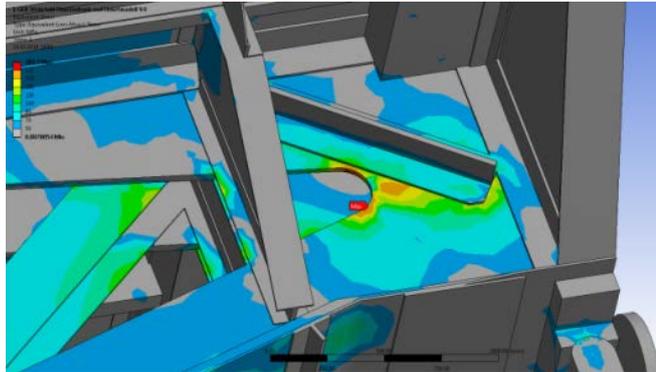


Bild 41: Unterschütz – Vergleichsspannungen im seitlichen Bereich der Struktur

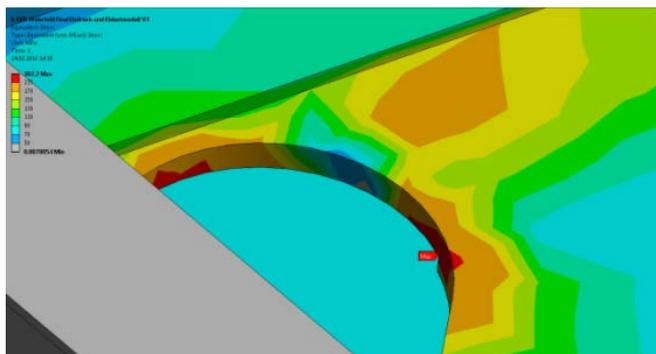


Bild 42: Unterschütz – Vergleichsspannungen im seitlichen Bereich der Struktur – Detail

Zur Beschreibung der Ausprägung dieses lokalen Spannungsmaximums wird ein Spannungspfad durch diesen Bereich zur Darstellung des Spannungsgradienten gelegt.

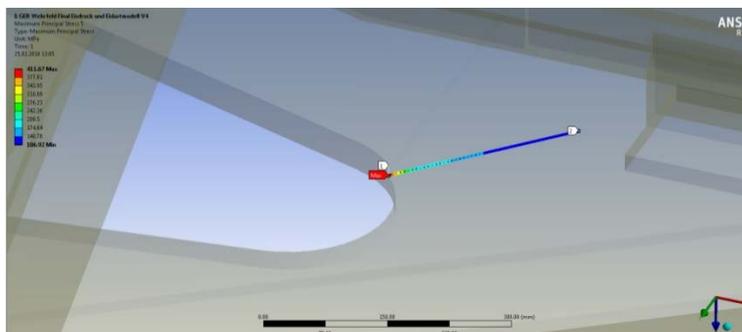


Bild 43: Unterschütz – von Mises Spannungspfad

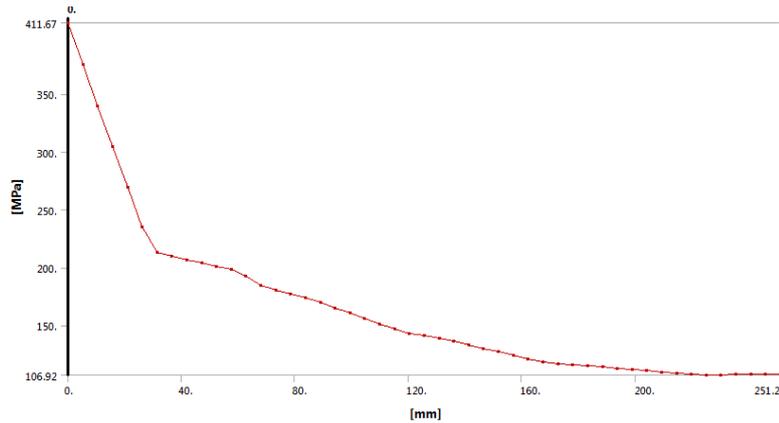


Bild 44: Unterschütz – von Mises Spannungen, Spannungsverlauf

Die in Bild 41 bzw. 42 dargestellten Vergleichsspannungsplots mit dem lokalen Spannungsmaximum im Bereich des Blechdickensprunges werden geometrisch in der Unteransicht des entsprechenden Bereiches in Bild 45 verdeutlicht.

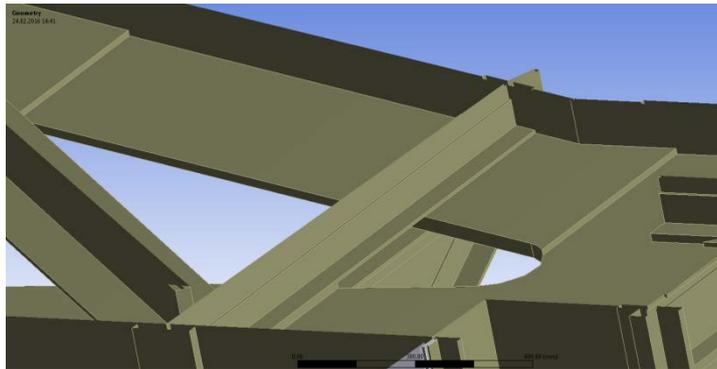


Bild 45: Unterschütz – Unteransicht des obersten Seitenbleches

Der entsprechende Bereich des überlappenden Nietstoßes ist in Bild 46 und 47 dargestellt.

In der Realität erfolgt der Lastabtrag von der Stauhaut in Richtung des oberen Zuggurtes über den Reibschluss des entsprechenden Verbindungsstoßes, das lokale Spannungsmaximum im Bereich der Rundung tritt daher in der Realität nicht auf und kann daher auch unberücksichtigt bleiben.

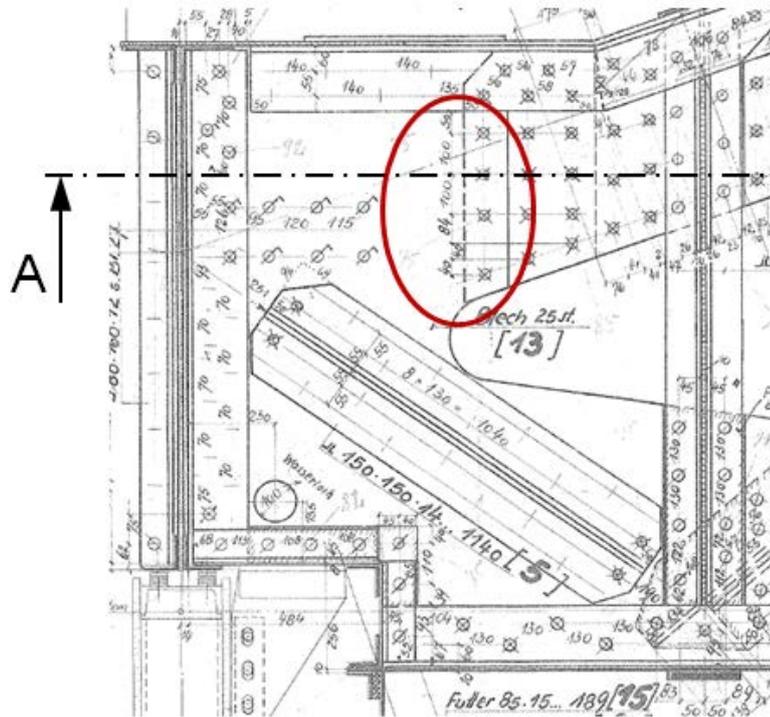


Bild 46: Unterschütz – Grundriss des obersten Seitenblechs

Schnitt A-A:

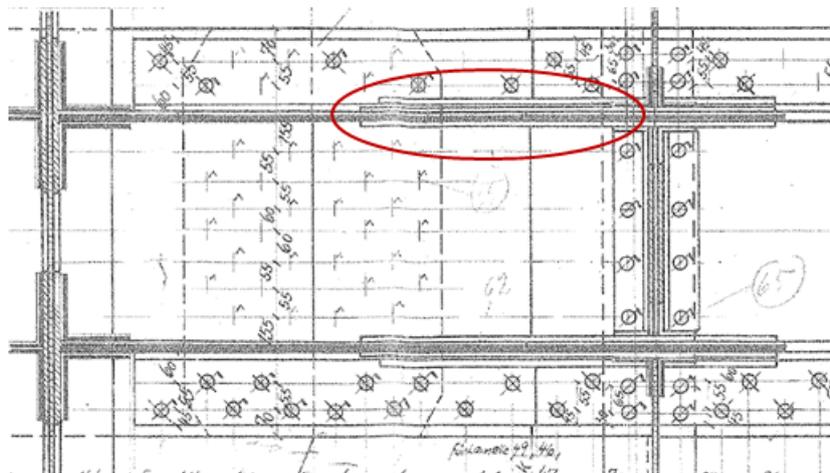


Bild 47: Unterschütz – Aufriss des obersten Seitenblechs

Die max. Zug- und Druckspannungen des obersten Deckbleches in der Unteransicht ergeben folgende Spannungsbilder:

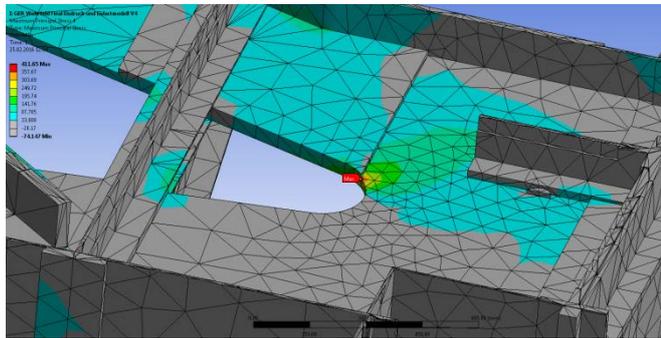


Bild 48: Unterschütz – Zugspannungen (max. principal stress)

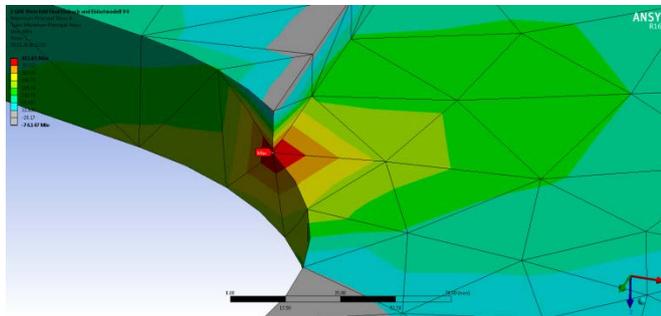


Bild 49: Unterschütz – Zugspannungen (max. principal stress) Detailauswertung

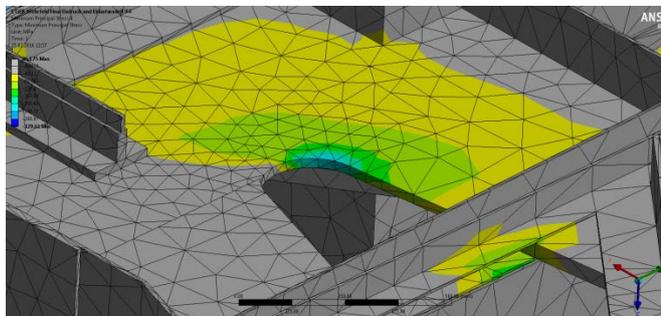


Bild 50: Unterschütz – Druckspannungen (min. principal stress)

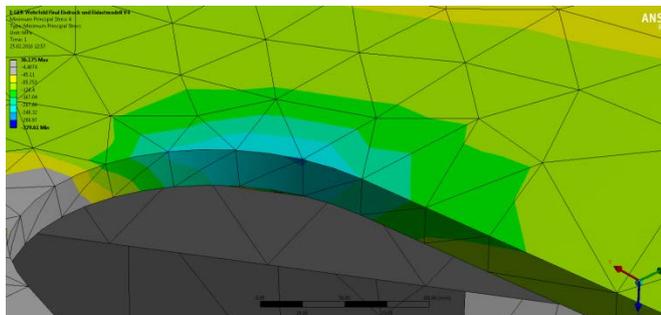


Bild 51: Unterschütz – Druckspannungen (min. principal stress) Detailauswertung

Der Oberschütz zeigt im LF1 maximale Vergleichsspannungen von 89MPa im mittleren Bereich der Überfallshaube.

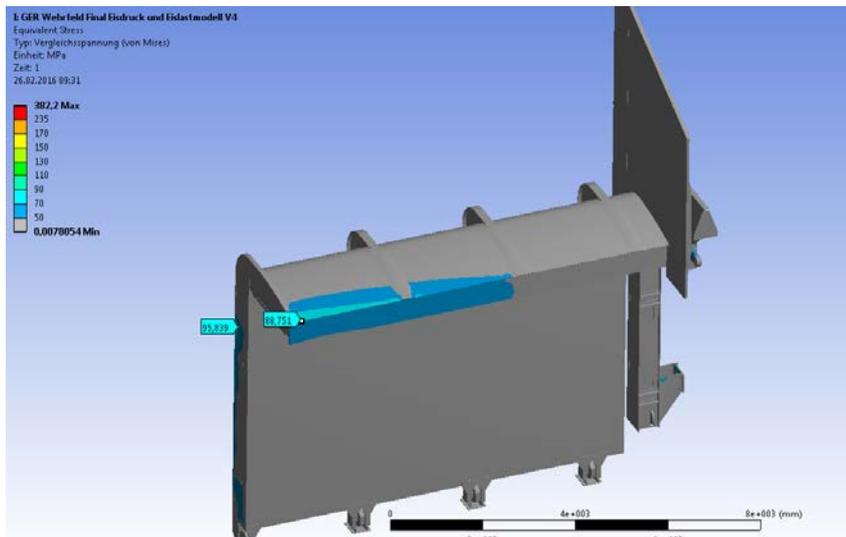


Bild 52: Oberschütz – Vergleichsspannungen UW-seite

Der OW-seitige Bereich des Oberschützes zeigt max. Vergleichsspannungen von 96MPa.

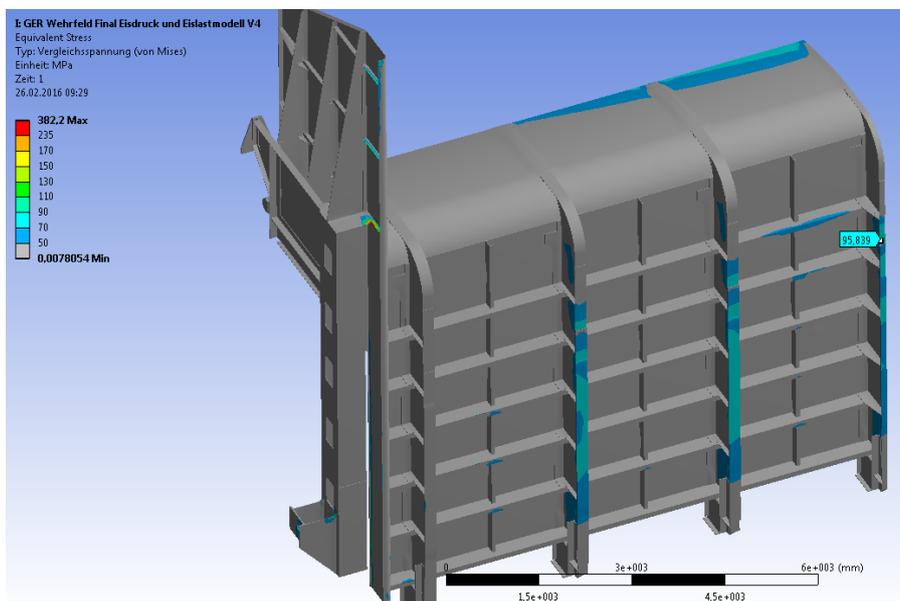


Bild 53: Oberschütz – Vergleichsspannungen OW-seite

Ein lokales Spannungsmaximum von 289MPa im Bereich eines Aussteifungsbleches des Seitendichtungsträgers des Oberschützes kann modellbedingt erklärt werden und bleibt für die weitere Auswertung unberücksichtigt.

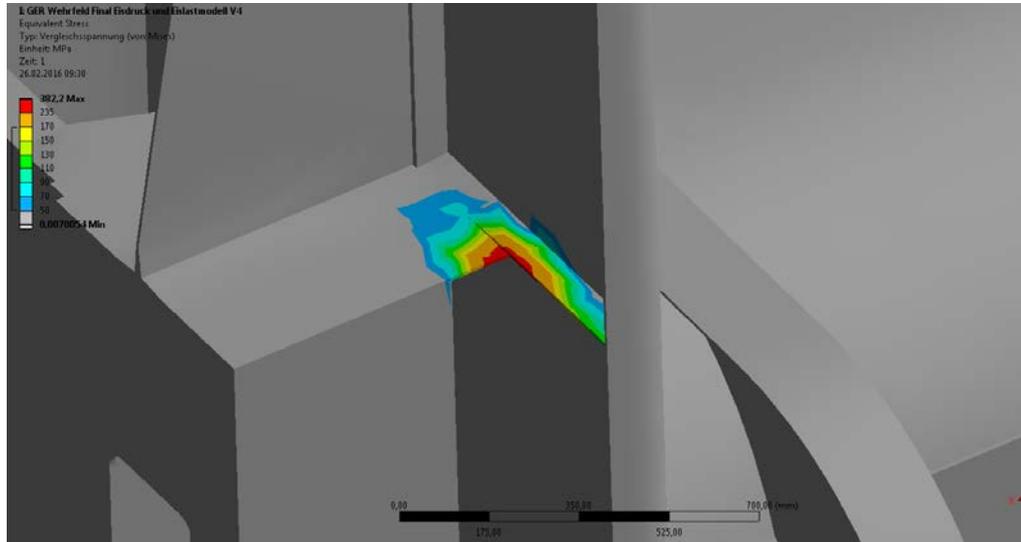


Bild 53: Oberschütz – Detail des lokalen Spannungsmaximums

Sämtliche Nachweise werden im Kapitel 9.2.2 für den bemessenden LF2 geführt, da dieser lokal höhere Spannungen bzw. Verformungen zeigt.

9.2.2 Lastfall 2: Schwerkraft und hydrostatische Wasserlast plus Eislast

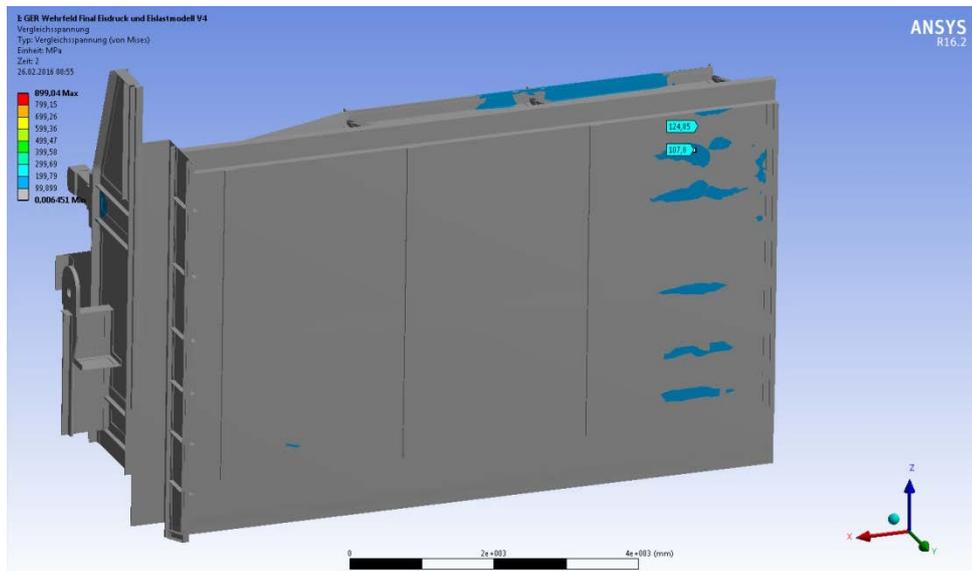


Bild 54: Unterschütz – Vergleichsspannungen OW-seite

Die Stauhaut des Unterschützes zeigt maximale Vergleichsspannungswerte von 108MPa im mittleren Bereich der Stauhaut.

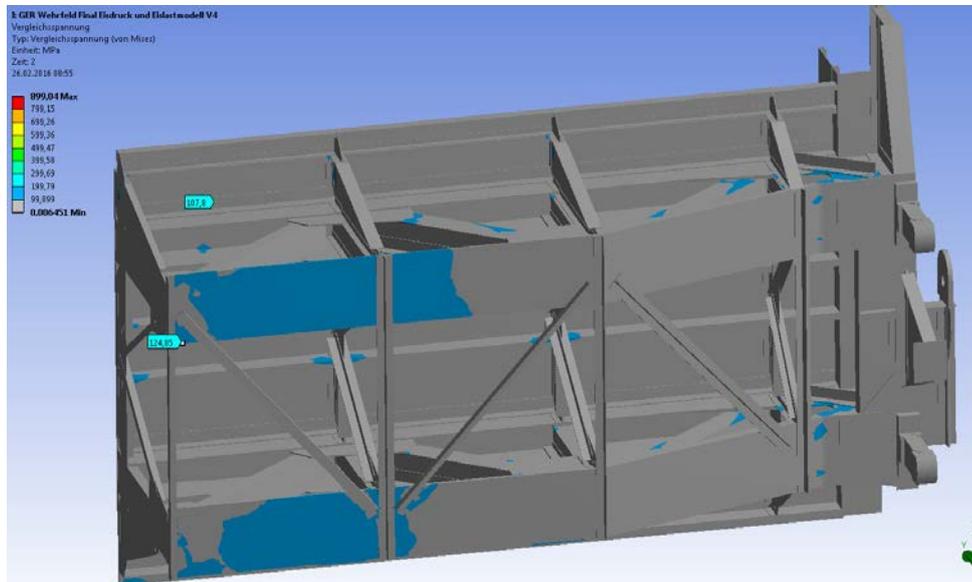


Bild 55: Unterschütz – Vergleichsspannungen UW-seite

Der Zuggurt des Unterschützes zeigt maximale Vergleichsspannungswerte von 125MPa im mittleren Bereich der tragenden Struktur.

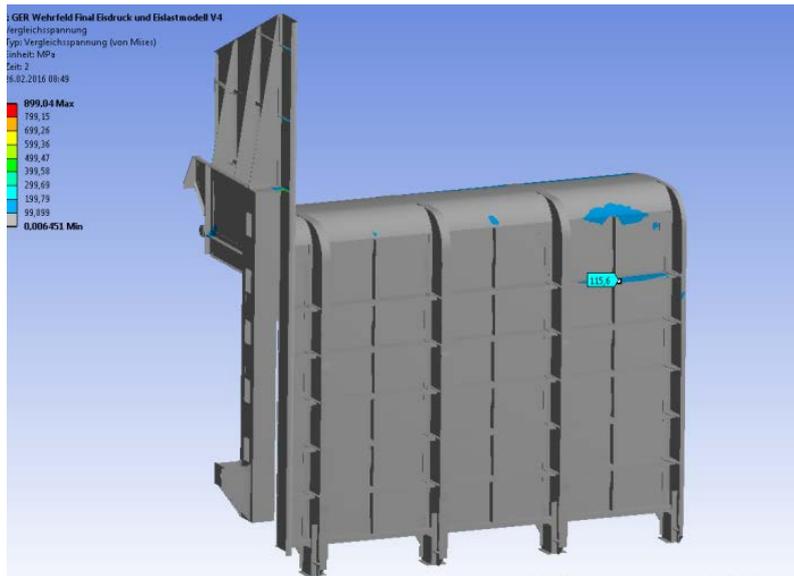


Bild 56: Oberschütz – Vergleichsspannungen OW-seite

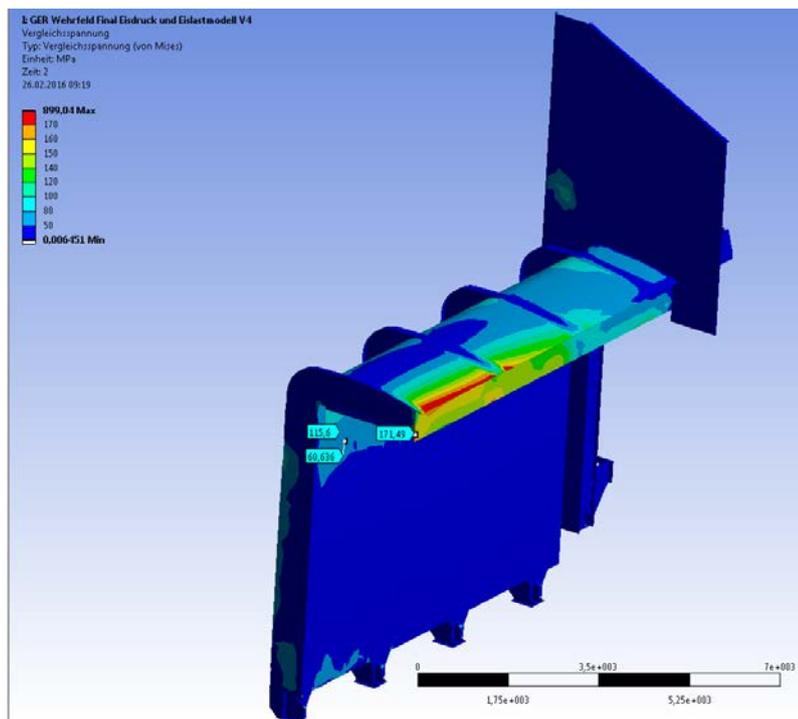


Bild 57: Oberschütz – Vergleichsspannungen UW-seite

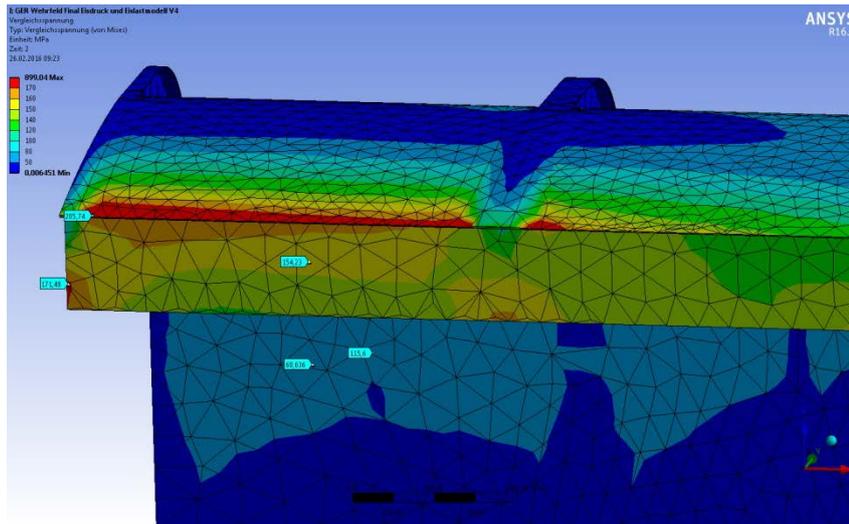


Bild 58: Oberschütz – Vergleichsspannungen OW-seite Spannungsdetail

Die max. Vergleichsspannung beim Oberschütz ergibt sich im mittleren Bereich der UW-seitigen Struktur mit 115MPa (Bild 57).

Der mittlere Bereich der Überfallshaube zeigt max. Vergleichsspannungen von 205MPa (Bild 58).

Eine entsprechende Auswertung der Zugspannungen (max. principal stress) zeigen dominante Zugspannungen in diesem Bereich (Bild 58-1) von max. 204MPa.

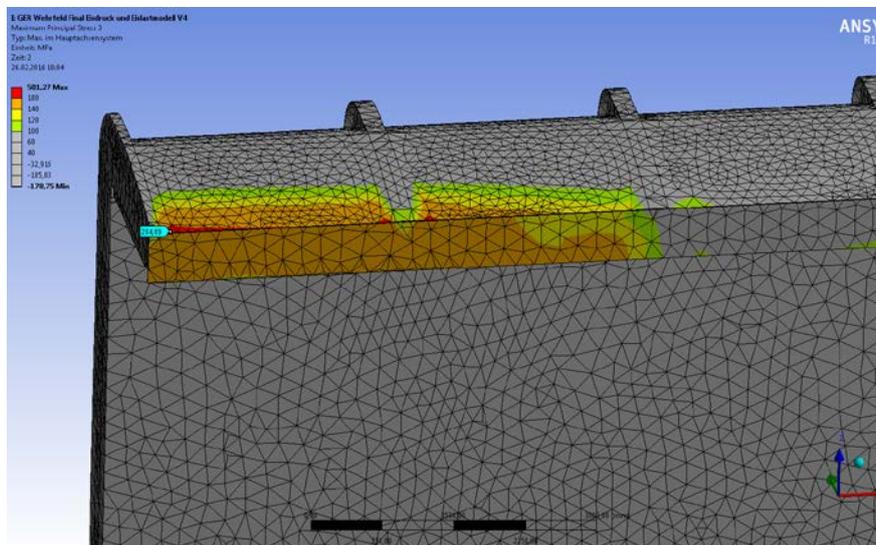


Bild 58-1: Oberschütz – Zugspannungen Detailauswertung

Das absolute Maximum im Bereich des obersten Stützbleches des Seitendichtungsträgers bleibt wie bei LF1 modellbedingt unberücksichtigt. Auf Grund der Tatsache, dass der LF2 zusätzlich den Einfluss der Eislast mitberücksichtigt, welcher auf Grund der installierten Luftperlanlage einen BLF dargestellt, wird in der statischen Spannungsnachweis (Kapitel 9.2.3) eine höhere Werkstoffausnutzung akzeptiert.

In der Untersicht ist der Bereich des obersten, horizontalen Seitenbleches in Bezug auf die auftretenden Vergleichsspannungen für den LF2 dargestellt.

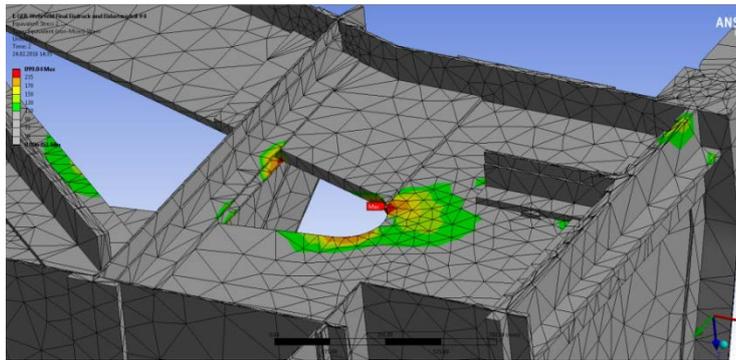


Bild 59: Unterschütz – Vergleichsspannungen Untersicht

Der Bereich des lokalen Spannungsmaximums lt. Bild 59:

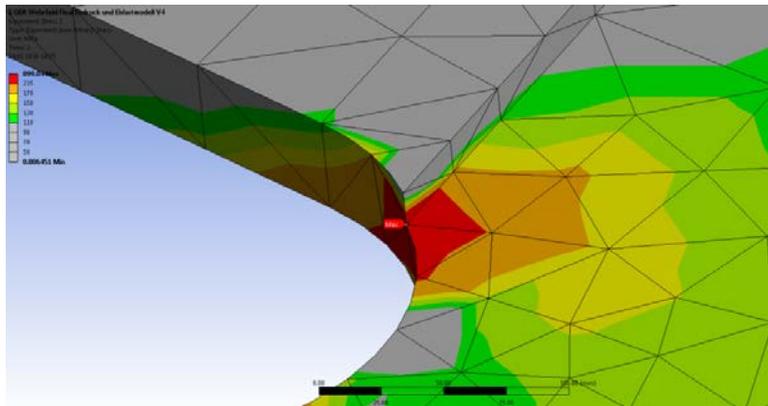


Bild 60: Unterschütz – Vergleichsspannungen Untersicht

Zur Erläuterung des lokalen von Mises Spannungsmaximums im obersten, horizontalen Seitenblech des Unterschützes werden die maximalen Zugspannungen (*max. principal stress*) ausgewertet.

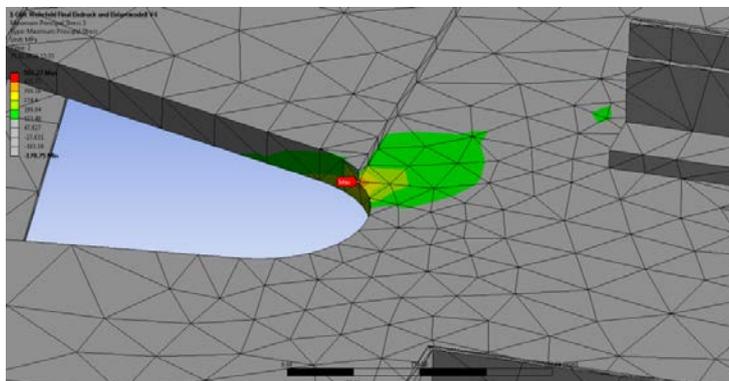


Bild 61: Unterschütz – Auswertung der maximalen Zugspannungen im höchstbelasteten Bereich

Der Bereich des lokalen Zugspannungsmaximums lt. Bild 61 im Detail:

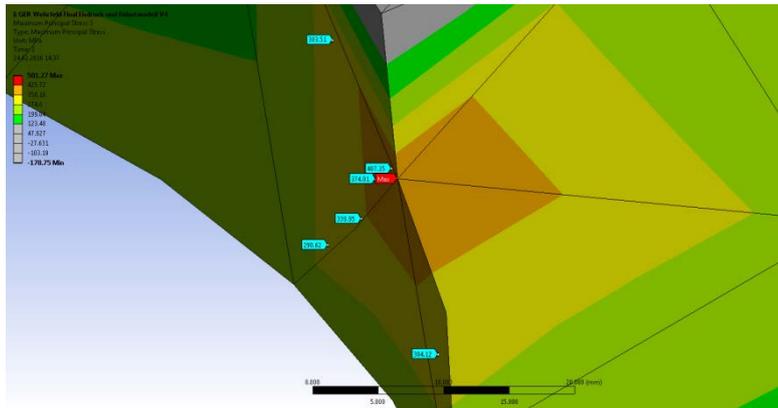


Bild 62: Unterschütz – Detailansicht der maximalen Zugspannungen im höchstbelasteten Bereich

An der gegenüberliegenden Seite der Ausrundung resultieren die lokal hohen Vergleichsspannungen aus hohen Druckspannungen. Der entsprechende Bereich mit der Auswertung der maximalen Druckspannungen (*min. principal stress*) ist in Bild 63 bzw. 64 dargestellt.

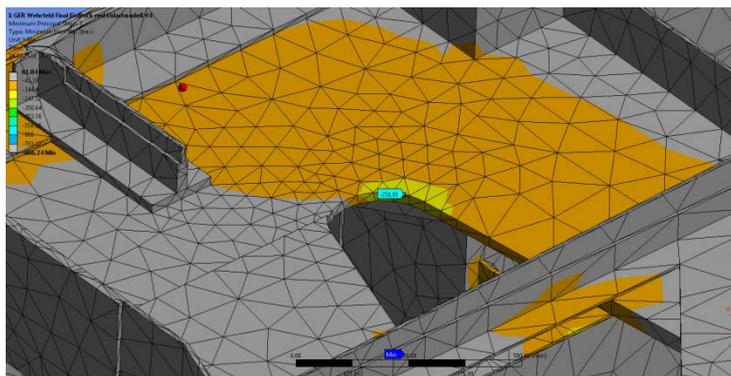


Bild 63: Unterschütz – Auswertung der maximalen Druckspannungen im höchstbelasteten Bereich

Der Bereich des lokalen Druck-Spannungsmaximums in der Höhe von 253MPa lt. Bild 64:

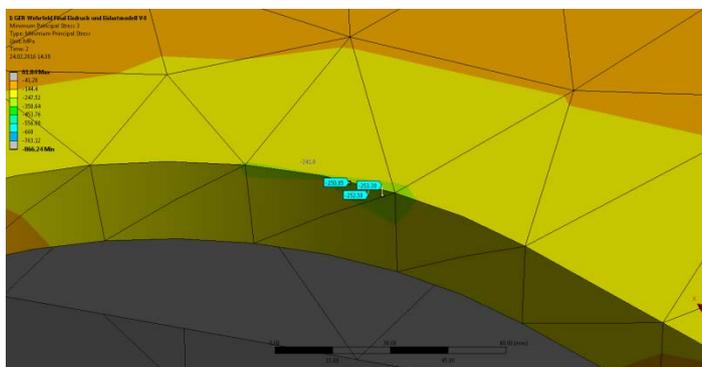


Bild 64: Unterschütz – Detailauswertung der maximalen Druckspannungen im höchstbelasteten Bereich

Die Ergebnisse der Spannungsplots entsprechen auch den Erwartungen des Beanspruchungsverlaufes, da der OW-seitige Bereich der Blechöffnung auf Grund der Durchbiegung des Unterschützes unter der Wasserlast auf (-) Druck beansprucht wird (Bild 63,64), die gegenüberliegende Seite der Öffnung jedoch weist Spannungsmaxima im (+) Zugbereich (Bild 61,62) auf.

Die für eine eventuelle Rissöffnung relevanten, maximalen Zugspannungen stellen jenen Bereich dar, welcher detaillierter auszuwerten ist.

Hierzu wird im lokal höchstbelasteten Zugbereich ein Spannungspfad in das Bauteil gelegt, um eine Aussage über den Spannungsgradienten in Blechdickenrichtung treffen zu können.

Der hohe Spannungsgradient innerhalb einer Pfadlänge von 40mm weist auf die nur sehr lokale Ausprägung der Spitzenspannung hin.

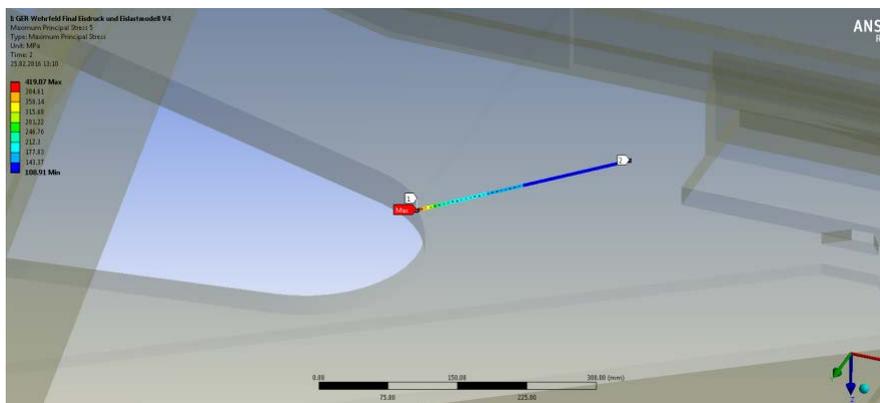


Bild 65: Unterschütz – Auswertung des Spannungspfad in das Bauteil mit max. Zugspannung

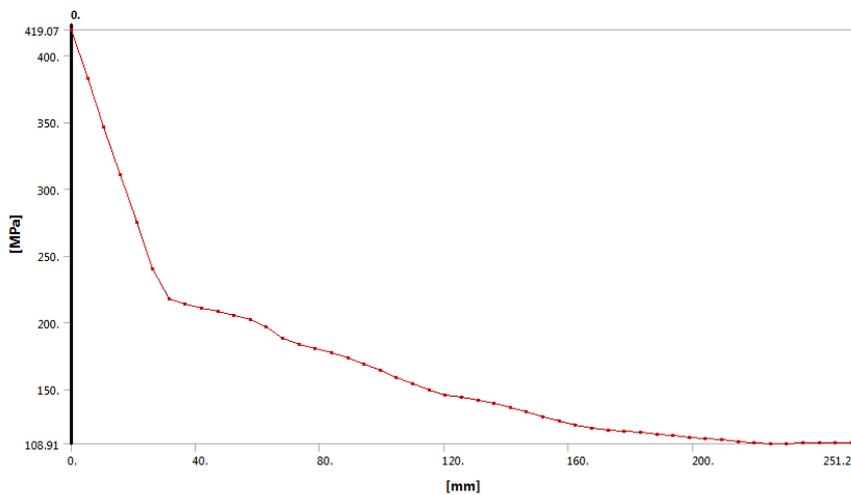


Bild 66: Unterschütz – Auswertung des Spannungspfad in das Bauteil mit max. Zugspannung

Für den in Kapitel 9.2.3 geführten Spannungsnachweis bleibt der Bereich des oberen Deckblechs daher wie beschrieben unberücksichtigt.

9.2.3 Statischer Spannungsnachweis

Zur Führung des Spannungsnachweises werden die jeweiligen max. Vergleichsspannungen im bemessenden LF2 für Ober- und Unterschütz ausgewertet und der entsprechende Bemessungswert der Beanspruchung mit $\gamma_{f,sup}=1,10$ nach DIN 19704-1:2014:11, lt. Tabelle 5 berechnet. Hier wird der außergewöhnlichen Bemessungssituation auf Grund der Annahme des Eisdruckes Rechnung getragen.

Der Bemessungswert der Beanspruchung basiert auf folgenden Annahmen:

- ⇒ Hydrostatische Einwirkung als ständige Einwirkung
- ⇒ Eislast als außergewöhnliche Einwirkung (bei Ausfall der Luftperlanlage)

⇒ Oberschütz: Maximale Vergleichsspannung lt. Bild 58 mit 205MPa

⇒ Unterschütz: Maximale Vergleichsspannung lt. Bild 55 mit 125MPa

In Bezug auf den Bemessungswert der Beanspruchbarkeit wird der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M2}=1,10$ nach DIN 19704-1:2014-11 nach Tabelle 6 angenommen (bei Zug- und Druckbeanspruchungen, da lokales oder globales Stabilitätsversagen ausgeschlossen werden kann).

Oberschütz:

$$\text{Sicherheitsfaktor} = \frac{\text{Streckgrenze}}{\text{maximale Vergleichsspannung} * \gamma_{M2} * \gamma_{F,A}}$$

$$\text{Sicherheitsfaktor} = \frac{235\text{MPa}}{205\text{MPa} * 1,10 * 1,10} = \mathbf{0,95}$$

Unterschütz:

$$\text{Sicherheitsfaktor} = \frac{\text{Streckgrenze}}{\text{maximale Vergleichsspannung} * \gamma_{M2} * \gamma_{F,A}}$$

$$\text{Sicherheitsfaktor} = \frac{235\text{MPa}}{125\text{MPa} * 1,10 * 1,10} = \mathbf{1,55}$$

Ein Sicherheitsfaktor mit einem Wert von 1,0 würde sich bei einem Bemessungswert der Beanspruchbarkeit von 194MPa ergeben.

Die Darstellung des Bereiches mit diesem minimalen Sicherheitsfaktor von **0,95** (LF2-Oberschütz im Mittenbereich der Überfallshaube) wird nun auf diesen Wert skaliert und entsprechend dargestellt (siehe Bild 67 – 69).

Auf Grund der nur sehr lokalen Ausprägung des Flächenbereiches mit Sicherheitsfaktor <1,0 kann der statische Nachweis trotzdem als geführt betrachtet werden.

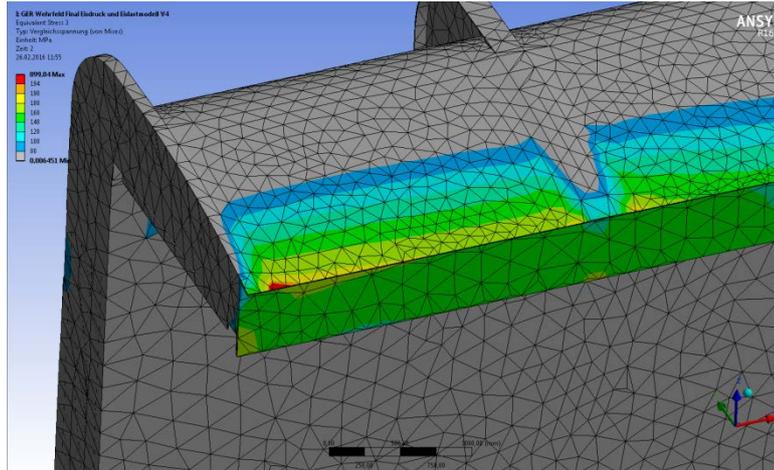


Bild 67: Oberschütz – Auswertung der von Mises Spannung im Bereich der Überfallshaube

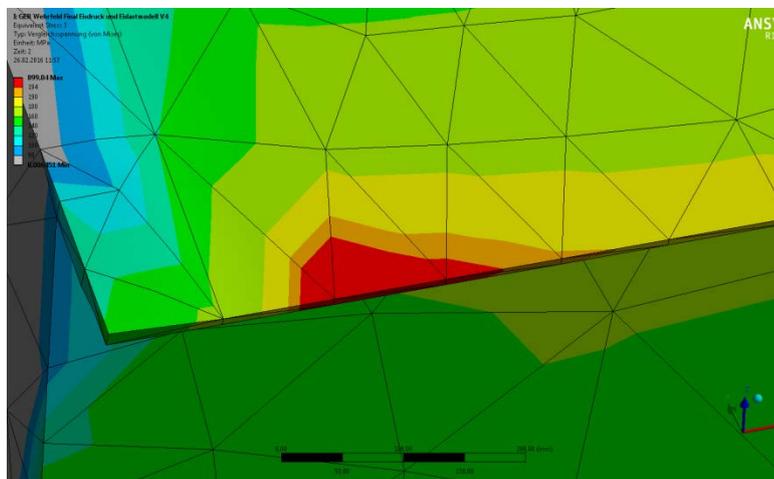


Bild 68: Oberschütz – Auswertung der von Mises Spannung im Bereich der Überfallshaube, Draufsicht

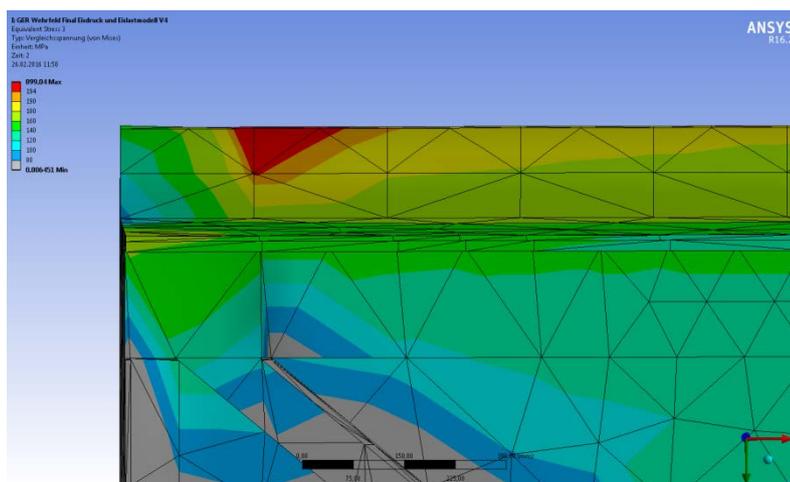


Bild 69: Oberschütz – Auswertung der von Mises Spannung im Bereich der Überfallshaube, Untersicht

MASCHINENBAU UND STAHLWASSERBAU

gez. Penninger, 21.3.2016

Verfasser: *gez. Engelke*

Verteiler: EBN/Schmalfuß

Anlage:

Bericht zum hydraulischen Modellversuch der Wehranlage des KW Ering-Frauenstein



Wehranlage_Hydraul
ischer Modellversuch_