

Statische Berechnung dünnwandiger Konstruktionen von Tagebaugroßgeräten mit Hilfe von Semiloof-Schalenelementen

Dietmar Fels, Harald Berger, Günter Lüdecke, Hans-Joachim Schulz

1. Einleitung

Stahlbaukonstruktionen in Form von Flächentragwerken stellen häufig auftretende technische Gebilde dar und zählen damit zu einem wichtigen Anwendungsgebiet der Finite-Elemente-Methode (FEM). Innerhalb des Programmsystems (PS) COSAR wurde dieser Tatsache durch Implementierung entsprechender Typen von finiten Elementen Rechnung getragen (siehe Abschn. 2.).

Am Beispiel von Berechnungen an Teilen von Tagebaugroßgeräten des VEB Schwermaschinenbau „Georgi Dimitroff“ Magdeburg, Betrieb des VEB Schwermaschinenbaukombinat TAKRAF, soll der Einsatz des PS COSAR zur Berechnung von Flächentragwerken mit komplexem Charakter demonstriert werden.

Das Anliegen des Artikels konzentriert sich auf die Darstellung der Vorgehensweise zur Lösung solcher Aufgaben unter den Bedingungen des PS COSAR. Dies betrifft vor allem die eingesetzten Typen von finiten Elementen, die Verwendung der Substrukturtechnik sowie das Pre- und Postprocessing.

2. Semiloof – Schalenelemente

Das Programmsystem COSAR ist mit einer umfangreichen Elementbibliothek ausgestattet. Für die klassischen Modelle der Festkörpermechanik (3D-Modell, Rotationskörper, Scheibe, Platte, Schale, Balken, Stab) wurden jeweils spezielle Typen von finiten Elementen implementiert (siehe [1]). Zur Berechnung von Schalen und Platten sind dies die sogenannten Semiloof-Elemente. Auf die Theorie der für die Berechnungen verwendeten Semiloof-Schalenelemente soll in diesem Artikel nicht eingegangen werden, hierzu sei auf die Literaturstellen [2], [3] und auch [1] verwiesen. Bild 1 enthält die in COSAR implementierten Semiloof-Elemente zur Scha-

lenberechnung. Die Semiloof-Elemente gehören zur Klasse der isoparametrischen Elemente, womit eine Einordnung in das gesamte Elementkonzept von COSAR gegeben ist. Die Ableitung der Elemente (siehe [2]) erfolgte auf der Grundlage einer speziellen Schalentheorie, die letztendlich die Berechnung dünner Schalen ermöglicht. Wie in Bild 1 ersichtlich, sind als Freiheitsgrad der Schalenelemente drei Verschiebungen in globaler Koordinatenrichtung an jedem der acht bzw. sechs Knotenpunkte sowie zwei Verdrehungen tangential zum Rand an jeder der vier bzw. drei Elementkanten (genau in den Gauß-Punkten 2. Ordnung des Elementrandes; werden als Freiheitsgrad den Seitenmittelnknoten zugeordnet) definiert. Gerade diese Konfiguration der Elementfreiheitsgrade ermöglicht die Modellierung von Schalen mit unstetigen Veränderungen der Mittelfläche (d. h. Knicke, Verzweigungen, Verrippungen), für viele technische Problemstellungen eine notwendige Voraussetzung. Das Semiloof-Balkenelement besitzt die Freiheitsgradkonfiguration einer Kante der Schalenelemente und zusätzlich die drei Verdrehungen in globaler Koordinatenrichtung an den zwei Eckknoten. Aus Gründen der Paßfähigkeit zum Schalenelement wurden für diese Freiheitsgrade gesonderte Knoten eingeführt.

Neben der Knotenkonfiguration bestimmt natürlich das Konvergenzverhalten den Einsatz von finiten Elementen. Durch eigene Untersuchungen [6] auf der Grundlage international verbreiteter Standardtests (siehe u. a. [5], [6]) konnten Aussagen aus der Literatur bekräftigt werden, daß der Einsatz der Semiloof-Elemente auch unter diesem Aspekt lohnenswert ist. Dabei zeigte sich für Platten, Schalen mit schwach gekrümmter Mittelfläche sowie für Scheiben-/Plattenmodelle ein sehr gutes Konvergenzverhalten der Semiloof-Elemente. Bei Schalen mit stark gekrümmter Mittelfläche sinkt die Qualität der Ergebnisse zwar teilweise ab, dennoch ist die Anwendbarkeit die-

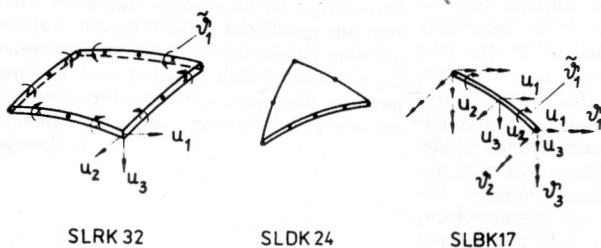


Bild 1
 Semiloof-Elemente zur Schalenberechnung

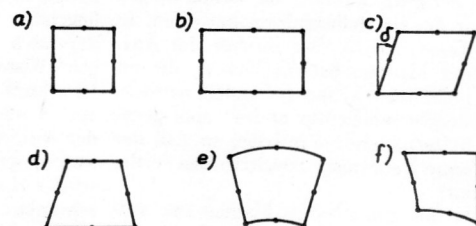


Bild 2
 Abweichungen von der optimalen Elementgeometrie bei ebener Mittelfläche

ser Elementtypen auch für solche Probleme gewährleistet. In Bezug auf das Konvergenzverhalten konnte des weiteren bekräftigt werden, daß die Semiloof-Elemente hinsichtlich Abweichungen von der optimalen Elementgeometrie (siehe z. B. Bild 2) nur eine geringe Empfindlichkeit aufweisen, d. h. daß in solchen Fällen auch im Vergleich zu anderen Elementtypen nur eine geringfügige Verschlechterung der Ergebnisqualität eintritt (vgl. [6]). Diese geringe Empfindlichkeit ist gerade im Hinblick auf den Einsatz zur Berechnung technischer Konstruktionen von großer Bedeutung, denn in der Mehrzahl aller ist bei der Modellierung die Verwendung der z. B. in Bild 2b-f dargestellten Elementformen nicht zu umgehen.

Eine Quantifizierung der getroffenen Aussagen ist im Rahmen dieses Artikels nicht möglich, dazu sei auf die Literaturstelle [6] verwiesen.

Abschließend sei zum Einsatz der Semiloof-Elemente angemerkt, daß diese zwar nicht durchgängig, aber doch bei einer Reihe international bekannter FEM-Systeme zur Elementbibliothek gehören (siehe [7]).

3. Spannungsanalyse für einen ausgewählten Bereich im Unterbau eines Verladegerätes

Das zu untersuchende Verladegerät ist Teil einer Förderanlage (siehe Bild 3). Obwohl sich die Untersuchungen auf den Unterbau des Verladegerätes beschränken, verbleibt eine komplizierte Konstruktion, die es in geeigneter Weise zu modellieren gilt. Eine detaillierte Beschreibung der Konstruktion kann dabei nicht Gegenstand dieses Artikels sein. Es gilt lediglich, die für eine FEM-Modellierung wichtigsten Aspekte herauszuarbeiten.

3.1. Modellfindung

Die Konstruktion besteht im wesentlichen aus miteinander verschweißten Blechen. Somit erscheint ein Schalenmodell, mit dem die Verbindungen der Bleche als biegesteif erfaßt werden, am geeignetsten. Das Schalenmodell gestattet sowohl die Wiedergabe einer, möglicherweise im globalen vorliegenden, Membranbeanspruchung der Bleche als auch lokaler Biegeeffekte im Bereich der Blechverzweigungen. Zur Erhöhung der Steifigkeit der

Konstruktion dienen eine Reihe von Hilfsstäben, die es im Berechnungsmodell auf Grund ihrer konstruktiven Anordnung als Fachwerkstäbe zu erfassen gilt.

Das Bild 4 beinhaltet eine Prinzipdarstellung des Unterbaus vom Verladegerät. Der Unterbau setzt sich grob betrachtet aus dem Ringträger, dem Mittelteil und den Prätzen zusammen. Die Konstruktion ist einfach symmetrisch. Da dies für die Abstützung ebenso zutrifft und die Belastungen entweder auch symmetrisch oder antymetrisch sind, genügt es, eine Hälfte der Konstruktion zu modellieren. Auf diese Problematik wird später noch näher eingegangen.

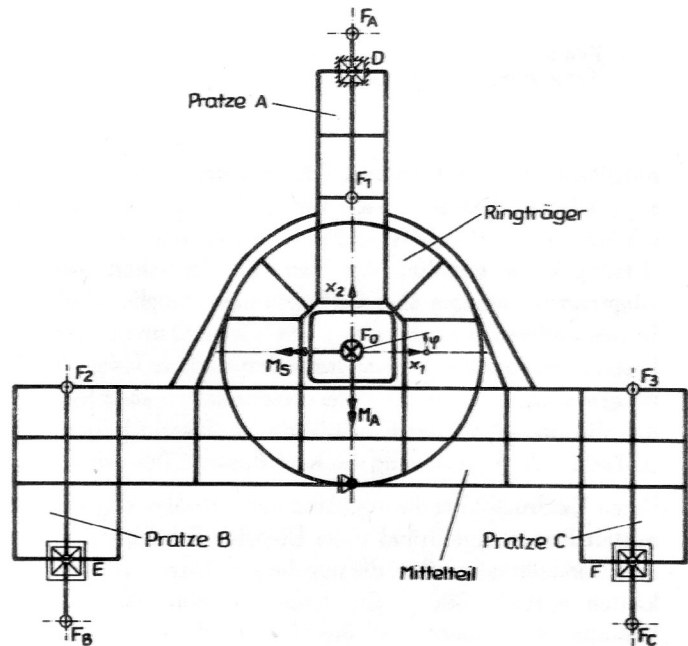


Bild 4
Prinzipdarstellung des Unterbaus vom Verladegerät

3.2. FEM-Vernetzung

Ziel der Berechnungen sind Aussagen über den Spannungsverlauf im Bereich des Ringträgers. Entsprechend ist die FEM-Vernetzung ausgeführt. Im Bereich des Ringträgers wurde versucht, der realen Konstruktion

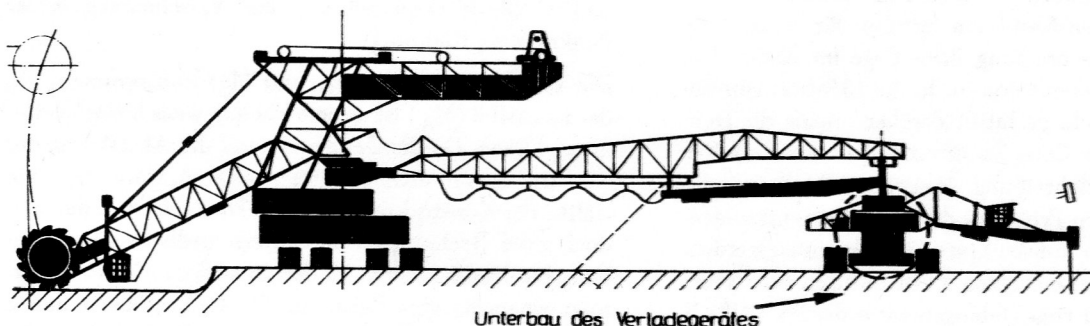


Bild 3
Förderanlage

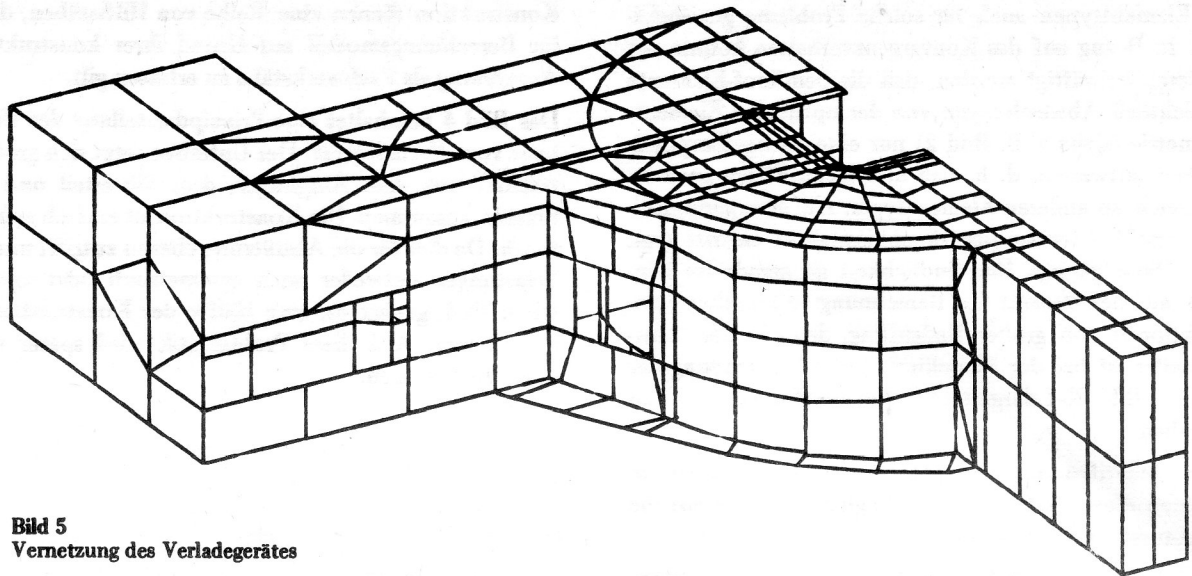


Bild 5
Vernetzung des Verladegerätes

möglichst nahe zu kommen. Dies beinhaltet die Erfassung aller in diesem Bereich vorliegenden Schotte einschließlich deren Aussteifungen. Die Feinheit der Vernetzung ist so gestaltet, daß über den Querschnitt des Ringträgers Aussagen über die Spannungen möglich sind. In den anderen Bereichen, d. h. im Mittelteil und in den Prätzen, wurden aus Aufwandsgründen stärkere Idealisierungen vorgenommen. Die Vernetzung ist so ausgelegt, daß die Steifigkeit der Konstruktion in diesem Bereich und somit die Übertragung des Kraftflusses erfaßt wird.

Einen Eindruck über die vorgenommene Vernetzung vermittelt Bild 5. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde eine Darstellung gewählt, die nur die sichtbaren Elementkanten enthält. Bild 5 gibt keine Auskunft über das komplizierte „Innenleben“ der Vernetzung. Im Berechnungsmodell fanden eine Reihe von Schottblechen, Längs- und Querrippen (letztere dienen zur Vermeidung des Ausbeulens von Blechen) ihre Berücksichtigung. Da die Lage dieser Konstruktionsteile nur mit einer Reihe von Bildern verdeutlicht werden kann, wurde darauf aus Platzgründen verzichtet.

Bei Vernetzungen der vorliegenden Größenordnung (797 Elemente, 2568 Knoten) erweist sich die Verwendung der Substrukturtechnik (siehe z. B. [1]) zweifellos als vorteilhaft. Die gewählte Vernetzung besteht aus 24 Substrukturen, die in der Mehrzahl so angelegt sind, daß sie jeweils ein Blech bzw. einen Teil eines Bleches erfassen. Dies gestattet eine zweidimensionale Vernetzung dieser Substrukturen. Durch einfach zu definierende Koordinatentransformation erfolgt für diese Substrukturen die Beschreibung ihrer Lage im Raum. Die Geometrie der Konstruktion, d. h. die Identität von Boden- und Deckblech, gestattet darüber hinaus die Definition sogenannter Copy-Strukturen. Für diese können sowohl die Netzbeschreibung als auch die Ergebnisse des rechenzeitintensiven Prozesses der Superelementkondensation von anderen Substrukturen übernommen werden. Die Paßfähigkeit der einzelnen Substrukturen auf Hyperstrukturebene wird vom Datengenerator des PS COSAR überprüft (Koordinatenvergleich).

Einen beträchtlichen Aufwand bei der Vernetzung bedeutet die Erfassung diverser Verrippungen. Bei der ge-

wählten Vernetzung wurden zentrisch angeordnete Rippen über Semiloof-Balkenelemente, exzentrisch angeordnete Rippen über Semiloof-Schalenelemente erfaßt.

3.3. Belastungs- und Randbedingungseintragung

Im nicht im Berechnungsmodell berücksichtigten Oberbau entstehen drei wesentliche Belastungen, die durch eine Kugeldrehverbindung übertragen auf den Unterbau einwirken. Diese Belastungen (siehe Bild 4) in ihrer Resultierenden betrachtet stellen eine Einzelkraft F_0 (Lastfall 1) und zwei Einzelmomente M_S und M_A (Lastfälle 2 und 3) dar. In der Konstruktion werden diese Beanspruchungen wie bereits erwähnt durch eine Kugeldrehverbindung übertragen. Dem wird im Berechnungsmodell durch das Aufbringen über dem Umfang konstanter (Lastfall 1) bzw. veränderlicher (Lastfälle 2 und 3) Linienlasten am Ringträger Rechnung getragen. Die Resultierenden der aufgebrachtten Belastungen stellen Einheitslasten dar.

In den Fahrwerken, idealisiert durch die Punkte A, B und C stellen sich Reaktionskräfte ein. Diese über einfache Gleichgewichtsbedingungen berechenbaren Reaktionskräfte werden über die Tragachsen jeweils an zwei Stützpunkten in die Prätzen eingeleitet. Im Berechnungsmodell erfolgt die Erfassung der in den Fahrwerken entstehenden Reaktionskräfte durch Eintragen der in den Punkten 1, 2 und 3 wirkenden Hebelkräfte F_1 , F_2 und F_3 sowie durch Fixierung der Punkte D, E und F (d. h. Verhinderung der Verschiebung dieser Punkte in x_3 -Richtung).

Die Lastfälle 1 und 2 (F_0 und M_S) sind symmetrisch, der Lastfall 3 (M_A) ist antisymmetrisch, jeweils bezüglich der x_2 - x_3 -Ebene. Da die Geometrie und die Abstützung der Konstruktion ohnehin symmetrisch sind, wurde nur eine Hälfte der Konstruktion vernetzt. Dies erfordert dann jedoch zwei Rechnungen mit unterschiedlichen Verschiebungsrandbedingungen in der Symmetrieebene. Es erfolgt einerseits eine Rechnung für die Lastfälle 1 und 2 mit Symmetrierandbedingungen (d. h. Verhinderung der Verschiebung in x_2 -Richtung sowie der Verdrehungen in der x_2 - x_3 -Ebene für alle in dieser Ebene liegenden Kno-

ten) und andererseits eine Rechnung für den Lastfall 3 mit Antimetriebedingungen (d. h. Verhinderung der Verschiebungen in x_2 - und x_3 -Richtung für alle in der x_2 - x_3 -Ebene liegenden Knoten). Auf Grund der Freiheitsgradkonfiguration der Semiloof-Elemente ist die Vorgabe von Symmetrie- bzw. Antimetriebedingungen hinsichtlich der Verdrehungen besonders einfach.

Diese Vorgehensweise mit zwei Rechnungen ist bezüglich des Aufwandes sowohl zur Vernetzung als auch an Rechenzeit effektiver als eine Rechnung mit drei Lastfällen für die gesamte Konstruktion. Dies sei noch dadurch bekräftigt, daß prinzipiell die Möglichkeit besteht, die zweite Rechnung als Wiederanlauf zu gestalten. Bei diesem Wiederanlauf können alle Substruktursteifigkeitsbeziehungen übernommen werden, für Substrukturen ohne Symmetrie- bzw. Antimetriebedingungen sogar die bereits berechneten Superelemente. Es müssen lediglich die Substrukturen neu bearbeitet werden, an denen Symmetrie- bzw. Antimetriebedingungen oder Belastungen (hierbei ist der Aufwand beim Wiederanlauf gering) vorliegen. In vollem Umfang sind die Bearbeitung der Hyperstruktur sowie Verschiebungs- und Spannungsberechnung für alle Substrukturen nochmals auszuführen. Insgesamt beträgt der Aufwand für die zweite Rechnung weniger als die Hälfte des Aufwandes für die erste Rechnung. Diese eben angedeutete Berechnungsstrategie ist darüber hinaus für Variantenrechnungen, bei denen nur einzelne Substrukturen zu modifizieren sind, besonders effektiv.

3.4. Ergebnisse

Da das Ziel der Untersuchungen Aussagen über die Spannungen im Bereich des Ringträgers waren, konnte die Ergebnisauswertung auf diesen Bereich konzentriert werden. Somit mußten bei weitem nicht so viele Ergebnisdaten wie bei der Pratte (vgl. Abschn. 4.4.) ausgewertet werden.

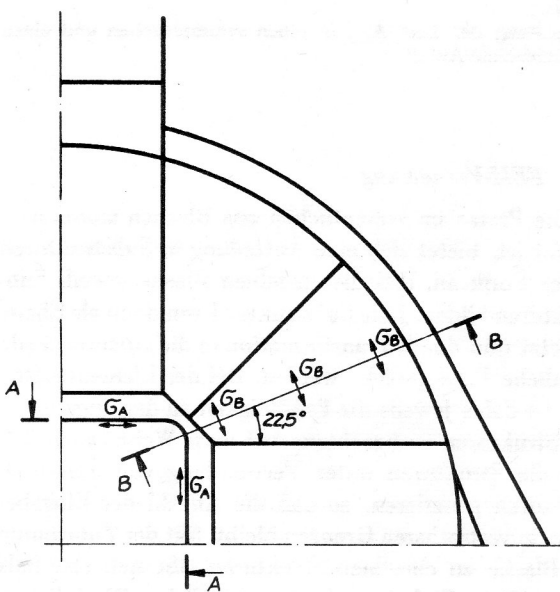


Bild 6
Stellen der Ergebnisauswertung im Ringträger

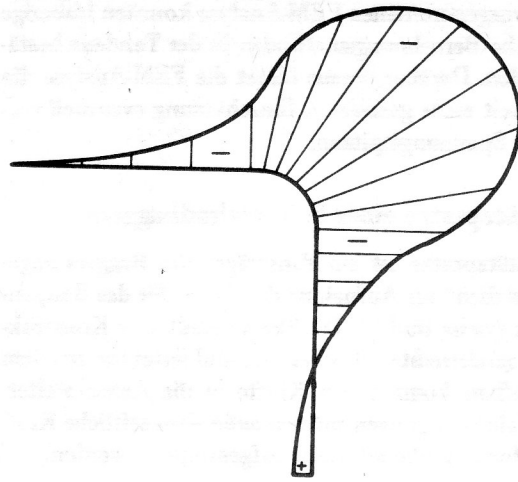


Bild 7
Normalspannung in Umfangsrichtung am Innenrand des Bodenblechs für Lastfall 3

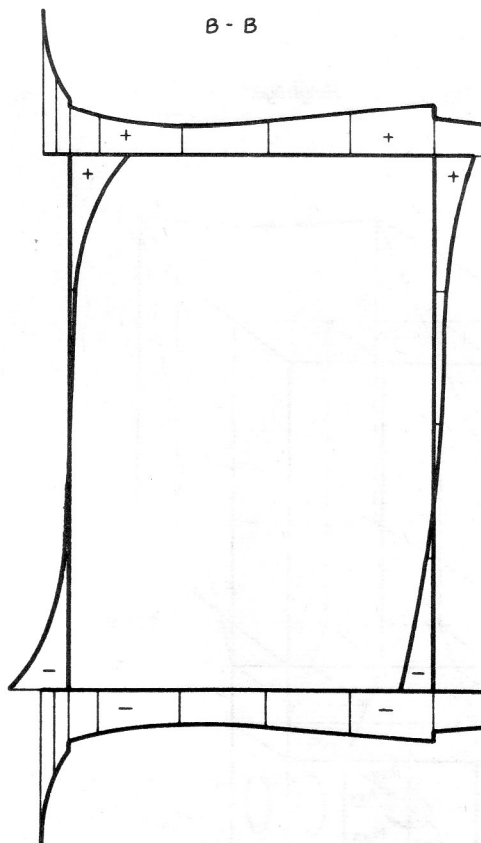


Bild 8
Verteilung der Normalspannung in Umfangsrichtung über den Querschnitt des Ringträgers im Schnitt B - B

Bild 6 verdeutlicht die Lage der Stellen, für die im weiteren charakteristische Spannungsverläufe vorgestellt werden. In Bild 7 ist der qualitative Verlauf der Normalspannung in Umfangsrichtung am Innenrand des Bodenblechs dargestellt, Bild 8 zeigt den qualitativen Verlauf der Normalspannung in Umfangsrichtung über den Querschnitt des Ringträgers.

Mit der vorgenommenen FEM-Analyse konnten bisherige analytische Berechnungsmethoden in der Tendenz bestätigt werden. Darüber hinaus bietet die FEM-Analyse die Möglichkeit einer genaueren Einschätzung eventuell vorliegender Spannungsspitzen.

4. Abstützpratte eines Schaufelradbaggers

Die Abstützpratte ist am Ringträger des Baggers angesetzt und dient zur Aufnahme der Achse für das Raupenfahrwerk (siehe Bild 9). Die Pratte stellt eine Konstruktion aus geschweißten Blechen dar und leitet die aus dem Baggeraufbau kommenden Kräfte in die Achse weiter. Durch Fahrbewegungen müssen außerdem seitliche Kräfte und Momentenbelastungen aufgenommen werden.

Da sich auf Grund der Kompliziertheit der Konstruktion mit analytischen Berechnungsverfahren nur prinzipielle Aussagen über den Kraftfluß sowie überschlägliche Dimensionierungen vornehmen lassen, waren genauere Festigkeitsuntersuchungen erforderlich, die detaillierte Aussagen zu kritischen Bereichen ermöglichen.

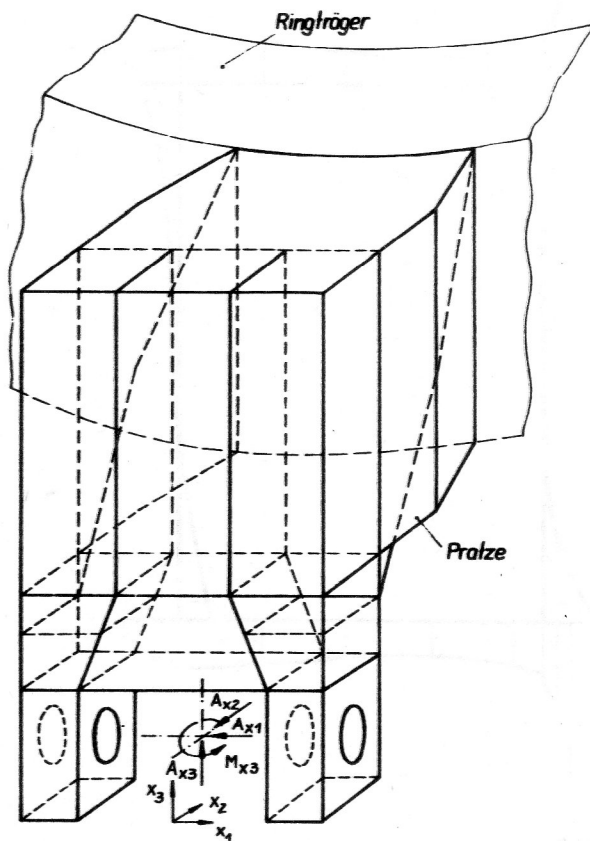


Bild 9
Prinzipdarstellung der Pratte

4.1. Modellfindung

Da die Pratte eine Konstruktion aus geschweißten Blechen darstellt, spiegelt ein Scheiben-/Plattenmodell die Realität am besten wider.

Um den Berechnungsaufwand in vertretbaren Grenzen zu halten, sind Überlegungen zu einer sinnvollen Modell-

wahl erforderlich. Die Pratte stellt geometrisch gesehen ein symmetrisches Teil dar. Die Belastungen hingegen sind nicht symmetrisch, lassen sich aber in symmetrische und antisymmetrische Lastanteile aufspalten. Aus diesem Grund kann für die FEM-Rechnung eine Hälfte der Pratte verwendet werden (vgl. Bild 11). Es sind dann zwei Rechnungen durchzuführen, für den symmetrischen Lastanteil mit symmetrischen Lagerungsbedingungen in der Symmetrieschnittfläche und für den antisymmetrischen Lastanteil mit antisymmetrischen Lagerungsbedingungen im Symmetrieschnitt. Die Teilergebnisse können dann entsprechend den Regeln von Symmetrie- und Antimetriebetrachtungen überlagert werden.

Aus den in Bild 9 eingetragenen Belastungen ergeben sich im einzelnen folgende Lastanteile:

- a) Symmetriefall
 - Lastfall 1: $A_{X2}/2$
 - Lastfall 2: $A_{X3}/2$
 - Lastfall 3a: $A_{X1}/2$
- b) Antimetriefall
 - Lastfall 3b: $A_{X1}/2$
 - Lastfall 4: M_{X3}

Bild 10 verdeutlicht die Aufspaltung der Last A_{X1} in einen symmetrischen und einen antisymmetrischen Lastanteil. Aus der Überlagerung der Lastfälle 3a und 3b ergeben sich die resultierenden Ergebnisse für die Beanspruchung infolge A_{X1} .

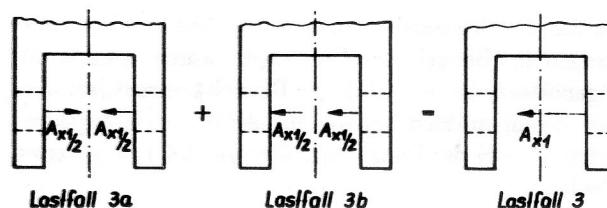


Bild 10
Aufspaltung der Last A_{X1} in einen symmetrischen und einen antisymmetrischen Anteil

4.2. FEM-Vernetzung

Da die Pratte im wesentlichen aus Blechen zusammengesetzt ist, bietet sich eine Aufteilung in Substrukturen in der Form an, daß die einzelnen Bleche jeweils Substrukturen bilden. Jede Substruktur kann dann als Ebene vernetzt und durch Transformation in die entsprechende räumliche Lage gerückt werden. Bei der Elementaufteilung ist dabei jeweils die Passfähigkeit zu den angrenzenden Strukturen zu beachten. Auf diese Weise lassen sich fast alle Strukturen unter Verwendung von Standardstrukturen generieren, so daß die Anzahl der Eingabedaten in vertretbaren Grenzen bleibt. Mit der Zuordnung der Bleche zu einzelnen Strukturen läßt sich ebenfalls eine einfache Eingabe der unterschiedlichen Blechdicken realisieren, da jeweils einer Substruktur eine einheitliche Blechdicke zugewiesen werden kann. Bild 11 zeigt die Einteilung der Prattenhälfte in 22 Substrukturen.

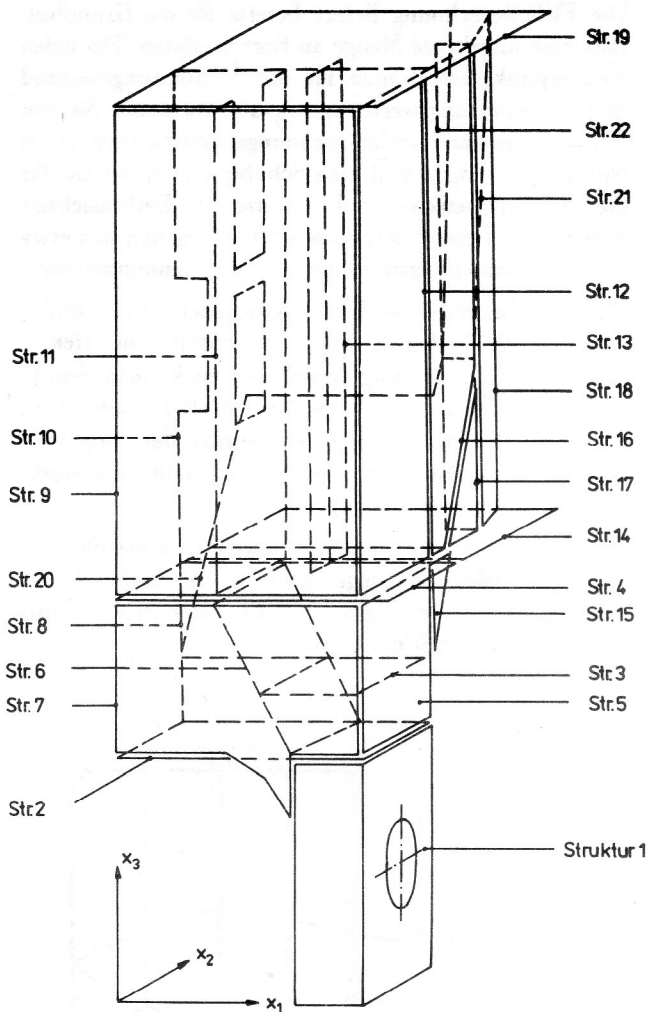


Bild 11
Unterteilung der Prätze in Substrukturen

Neben den Semiloof-Schalenelementen wurden auch Semiloof-Balkenelemente eingesetzt. Diese sind auf einige Blechränder aufgesetzt (z. B. Substruktur 22), um dort vorhandene Saumbleche nachzubilden. Dadurch werden keine zusätzlichen Schalenelemente benötigt, der Versteifungseffekt wird aber gut wiedergegeben.

Bild 12 vermittelt einen Eindruck von der Elementaufteilung. Insgesamt besteht die Vernetzung aus 421 Elementen und 1135 Knotenpunkten.

4.3. Belastungs- und Randbedingungseintragung

Die Lasten entsprechend Bild 9 werden als Linienlasten an der Achslagerbohrung des Prätzenfußes angetragen. Dabei werden die Lasten A_{X2} , A_{X3} und M_{X3} in sinusförmige Linienlasten umgerechnet und auf das innere und das äußere Blech des Prätzenfußes aufgebracht. Bild 13 zeigt die Form der Lasteintragung für A_{X2} . A_{X1} wird als Ringlast auf den Bohrungsrand aufgebracht.

Bezüglich der Lagerung wird die Prätze als am Ringträger fest eingespannt betrachtet. Die Vernetzung ist im übrigen so angelegt, daß Teile des Ringträgers über zusätzliche Substrukturen in die Vernetzung eingehen können und somit für weitere Untersuchungen auch Elastizität des Ringträgers mitmodellierbar ist. Zur Modellierung

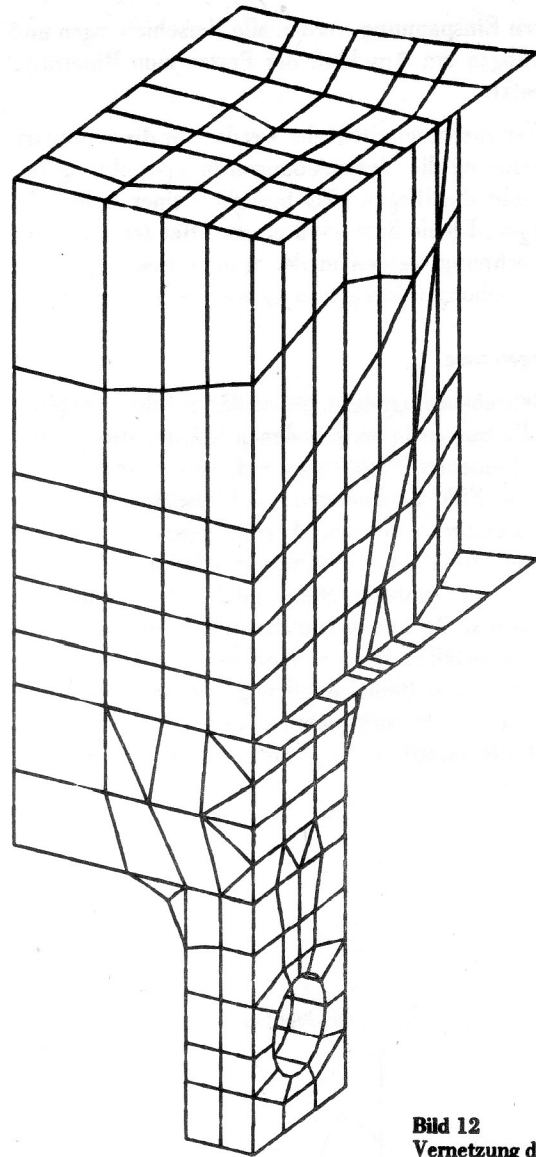


Bild 12
Vernetzung der Prätze

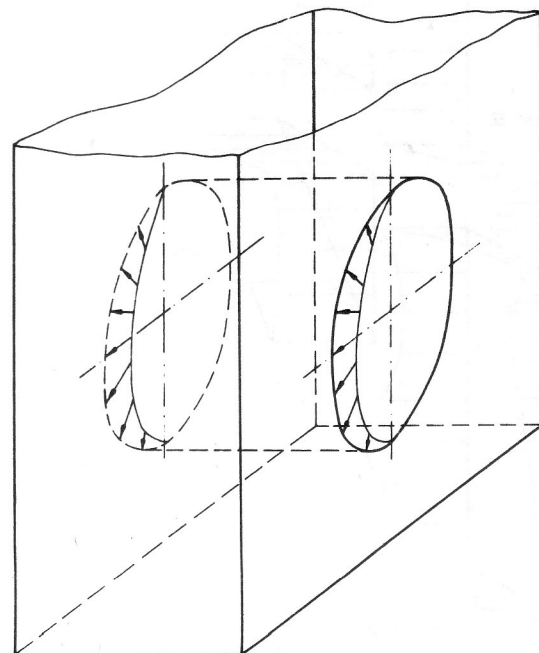


Bild 13
Form der Lasteintragung für A_{X2}

der festen Einspannung werden alle Verschiebungen und Verdrehungen am Anschluß der Pratte zum Ringträger Null gesetzt.

In der Symmetrieschnittfläche werden für die symmetrische Rechnung die Verschiebungen in x_1 -Richtung verhindert und die Biegewinkel bezüglich einer Achse, die in der x_2 - x_3 -Ebene liegt, Null gesetzt. Bei der antimetrischen Rechnung werden in der Symmetrieschnittfläche die Verschiebungen in x_2 - und x_3 -Richtung verhindert.

4.4. Ergebnisse

Unter Betriebsbedingungen treten die in Bild 9 eingetragenen Belastungen in verschiedenen Kombinationen und mit verschiedenen Wichtungen auf. Aus diesem Grund wurden die FEM-Rechnungen mit Einheitslasten durchgeführt. Entsprechend den Ausführungen im Abschn. 4.1. erfolgt zunächst eine Zusammenfassung von Lastfall 3a aus der symmetrischen und Lastfall 3b aus der antimetrischen Rechnung zum Grundlastfall 3. Aus den vier Grundlastfällen werden dann durch entsprechende Überlagerung und Berücksichtigung vorgegebener Wichtungsfaktoren die Beanspruchungen für die einzelnen Betriebslastfälle ermittelt. Insgesamt treten fünf Betriebslastfälle auf.

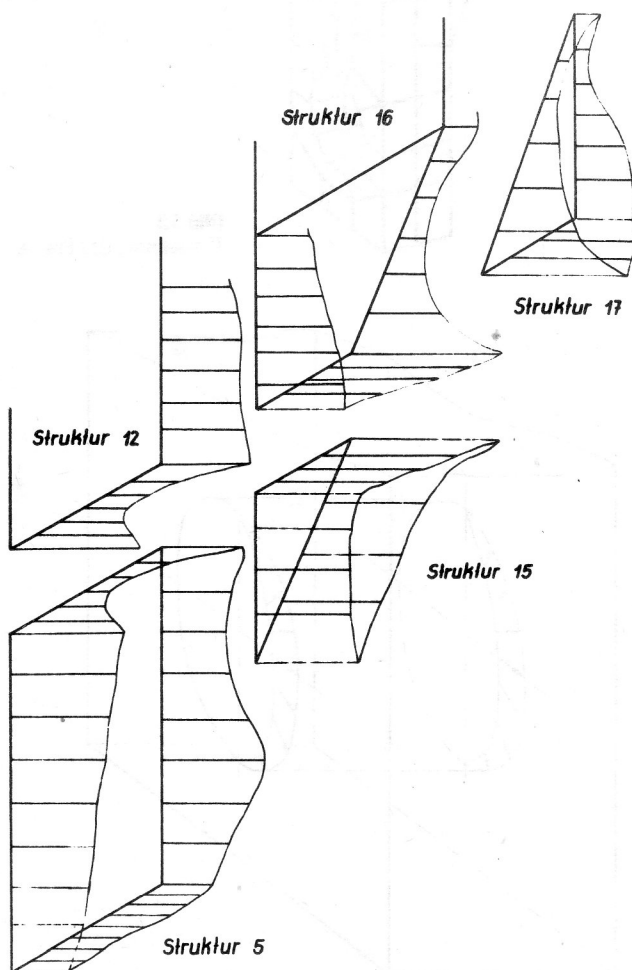


Bild 14
Verteilung der Vergleichsspannung für einen ausgewählten Bereich

Die FEM-Berechnung liefert bereits für die Grundlastfälle eine ungeheure Menge an Ergebnisdaten. Für jeden Knotenpunkt erhält man für den Verformungszustand drei Verschiebungswerte u_1 , u_2 und u_3 sowie für den Spannungszustand sechs Spannungskomponenten (zwei Normalspannungen und eine Schubspannung jeweils für die Schalenoberseite und -unterseite). Berücksichtigt man alle fünf gerechneten Lastfälle, so ergeben sich etwa 17000 Verschiebungswerte und 34000 Spannungswerte.

Diese Ergebnisdaten sind nach vorgegebenen Lastkombinationen zu überlagern und zu bewerten. Um effektiv eine Ergebnisauswertung vornehmen zu können, wurde ein Dialogprogramm für den AKT A6454 geschrieben, das unter Berücksichtigung der Spezifik der Aufgabenstellung die gewünschten Überlagerungen und eine selektive Ergebnisauswahl ermöglicht.

Das Programm gestattet die Ergebnisauswertung im Bildschirmdialog nach folgenden Gesichtspunkten:

- Überlagerung beliebiger Lastfälle unter Berücksichtigung beliebiger Wichtungsfaktoren

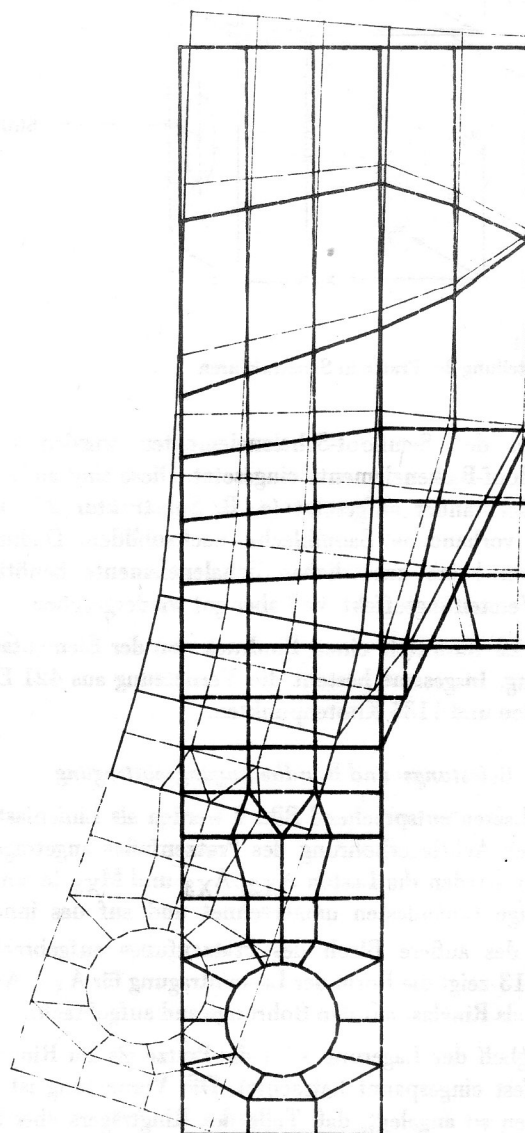


Bild 15
Verformung der Pratte für Grundlastfall A_{x2}

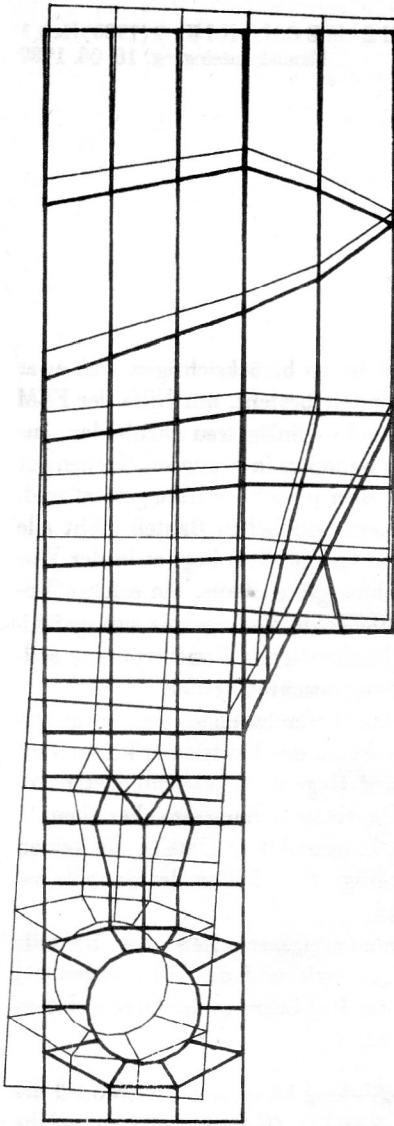


Bild 16
Verformung der Pratze für Grundlastfall A_{X3}

- Ausgabe von Spannungswerten, die über einem vorgegebenen Limit liegen, mit Angabe der Knotennummer
- Berechnung der Vergleichsspannung aus den zwei Normalspannungen und der Schubspannung
- Ausgabe der Ergebniswerte für ausgewählte Strukturen und Knotenpunkte
- Ausgabe von Drucklisten für ausgewählte Ergebniswerte.

Mit Hilfe dieses Programms konnten kritische Beanspruchungsbereiche in der Pratze auf einfache Weise lokalisiert, die kritischen Lastfälle selektiert und die relevanten Ergebnisse zusammengestellt werden.

Den kritischen Beanspruchungsbereich bildet der Übergang vom vertikalen zum horizontalen Pratzenteil (Substruktur 15 und dort angrenzende Strukturen, vgl. Bild 11). Bild 14 vermittelt einen Eindruck von der in diesem Bereich auftretenden Spannungsverteilung unter Berücksichtigung der Lastfälle A_{X2} und A_{X3} . Die mit dem COSAR-Grafikprozessor automatisch erzeugten Bilder 15 und 16 geben einen Überblick über die Verformung der Pratzenseitenwand infolge der Grundlastfälle A_{X2} und A_{X3} .

5. Zusammenfassung

Die vorgestellten Berechnungen zeigen die Anwendbarkeit des Programmsystems COSAR zur Berechnung komplexer Blechkonstruktionen. Entscheidende Voraussetzungen dafür sind u. a. die implementierten Semiloof-Schalelemente und die Substrukturtechnik. Unter den genannten Bedingungen lassen sich Berechnungsmodelle realisieren, die den bisherigen durch Berücksichtigung einer Reihe von lokalen Effekten überlegen sind und somit detailliertere Aussagen über vorliegende Beanspruchungen ermöglichen. Jedoch muß in diesem Zusammenhang auch betont werden, daß unter den gegenwärtigen Bedingungen Untersuchungen der vorliegenden Größenordnung (bezüglich der Element- bzw. Knotenzahl) nicht die Regel, sondern nur die Ausnahme darstellen können. Dies betrifft sowohl die zur Verfügung stehende Rechentchnik als auch den Entwicklungsstand des Pre-processings innerhalb des Programmsystems COSAR. Zur Durchführung einer kompletten Berechnung sind für die zwei vorgestellten Modelle jeweils etwa 5 – 6 Stunden CPU-Zeit auf einer Rechanlage EC 1040 erforderlich. Zur Senkung der Bearbeitungszeiten sind Möglichkeiten interaktiver Netzerstellung erforderlich.

LITERATUR

- [1] Autorenkollektiv: Nutzerhandbuch COSAR/84. 1. Auflage, TH Magdeburg, Sektion Maschinenbau, WB Festkörpermechanik, 1985.
- [2] Irons, B. M.: The semiloof shell element. In: Finite elements for thin shells and curved members. (herausgegeben von D. G. Ashwell und R. H. Gallagher), John Wiley & Sons London 1976, S. 197 – 222.
- [3] Irons, B. M.; Ahmad, S.: Techniques of finite elements. 1. Auflage, John Wiley & Sons Chichester 1980.
- [4] McNeal, R. H.; Harder, R. L.: A proposed standard set of problems to test finite element accuracy. In: Finite elements in analysis and design. Elsevier Science Publishers B. V. (North Holland) Amsterdam 1 (1985) 1.
- [5] Robinson, J.: An evaluation of skew sensitivity of thirty-three plate bending elements in nineteen FEM-Systems. In: Finite element news, 1985.
- [6] Fels, D.: Konzeptioneller Aufbau, Implementierung und Testung von Elementkatalogen für universelle Finite-Elemente-Programmsysteme. Dissertation A, TH Magdeburg 1985.
- [7] Brebbia, C. A.: Finite element systems – a handbook. 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1985.