



*Markus Krattiger
Dipl. Bauingenieur HTL
Krattiger Engineering
Happerswil, Schweiz*

Tragwerke (Hallen und Brücken)

Tragwerke (Hallen und Brücken)

Einleitung

Tragwerke im Ingenieurholzbau bestehen in der Regel aus schlanken Stäben oder scheibenartigen Bauteilen. Die Querschnittsform ergibt sich üblicherweise aus der Bemessung für die vertikale Lastabtragung. Das Resultat sind Bauteile mit einer grossen Steifigkeit in der Ebene. Aus der Ebene weisen diese nur eine geringe Biegesteifigkeit auf.

Aussteifungselemente wie Verbände oder Scheiben stützen einzelne Bauteile und die gesamte Struktur gegen seitliches Ausweichen. In der statischen Berechnung wird ein Tragwerk zur Vereinfachung in der Regel in einzelne Ebenen aufgeteilt und getrennt voneinander untersucht. Dabei werden für jedes Element Annahmen und Vereinfachungen getroffen. Eine solche Vereinfachung ist nur zulässig wenn die gegenseitige Beeinflussung am räumlichen Gesamtsystem vernachlässigbar klein ist.

Zur Gewährleistung der Gesamtstabilität und Standsicherheit eines Tragwerks ist es daher zwingend notwendig, dass sich der Tragwerksplaner auch mit der räumlichen Wirkungsweise der Trag- und Aussteifungskonstruktion befasst. Er muss erkennen in welchen Fällen eine vereinfachte Betrachtung zulässig ist und wann eine Tragstruktur auch räumlich am dreidimensionalen Modell untersucht werden muss.

Aus dem Beitrag von Dr. René Steiger „Stabilität – Ein Problem im Holzbau?“ geht hervor, dass eine mangelhafte bzw. ein Versagen der Aussteifung Ursache für einen hohen Anteil von Schäden oder gar Einstürzen von Holzbauten ist. Diese Feststellung deckt sich auch mit den persönlichen Erfahrungen des Schreibenden aus verschiedenen Zustandsuntersuchungen in den vergangenen Jahren.

Grundlagen für die Bemessung

Detaillierte Betrachtungen mit den wichtigen Herleitungen und Hinweisen für die Bemessung von Aussteifungselementen sind in [1] und [2] zu finden. In nachfolgenden Ausführungen wird nur auf die wichtigsten Punkte eingegangen.

Einwirkungen

Für die Bemessung von Aussteifungselementen müssen sämtliche Einwirkungen mit horizontalen Komponenten berücksichtigt werden. Dabei werden zwei Arten unterschieden:

- Einwirkungen durch äussere Lasten wie Wind, Erdbeben, Bremskräfte usw. Diese Kräfte müssen über Verbände bis in den Baugrund abgeleitet werden.
- Einwirkungen durch innere Lasten, die sich aus planmässigen Auslenkungen, Schiefstellungen usw. von Biegeträgern oder Druckstäben ergeben. Die Grösse dieser Lasten (Stabilisierungskräfte) ist direkt von der Steifigkeit der Aussteifungs-konstruktion abhängig. Eine Erklärung dazu ist in [1] zu finden. In der Regel werden diese inneren Kräfte innerhalb des Tragwerks ausgeglichen und müssen nicht in den Baugrund abgeleitet werden.

Eine vollständige Auflistung der Einwirkungen ist dem Beitrag von A. Gianoli „Einwirkungen“ zu entnehmen.

Bemessung von Aussteifungskonstruktionen

In der Norm SIA 265 Ziffer 5.8.1 sind für die Bemessung von Verbänden folgende generelle Regeln und Hinweise zu finden:

- Die räumliche Stabilität der Tragwerke ist zu gewährleisten. Tragwerke mit ungenügender Eigensteifigkeit sind so auszusteifen, dass ein Versagen oder übermässige Verformungen verhindert sind.
- Die Auswirkungen aus geometrischen und strukturellen Imperfektionen sowie aus Verformungen nach Theorie 2. Ordnung (einschliesslich der Anteile aus Verschiebungen in Verbindungen) müssen berücksichtigt werden.

Weiter finden sich für den Fall paralleler Biege- oder Fachwerkträger in SIA 265 Ziffer 5.8.4.4 Angaben für die vereinfachte Berechnung.

Vereinfachte Berechnung von Verbänden

Die vereinfachte Berechnung von Aussteifungskonstruktionen basiert auf einem Rechenansatz nach Theorie 1. Ordnung. Für die Bemessung wird neben den äusseren Horizontalkräften eine Gleichstreckenlast q_d nach Formel 265.82 berücksichtigt. Diese Ersatzlast (Stabilisierungskraft) ergibt sich aus dem Bemessungswert der mittleren Gurtkraft $N_{i,d,mean}$. Bei Biegeträgern mit Rechteckquerschnitt wird aus dem maximalen Biegemoment die Ersatzdruckkraft gemäss 265.77 bestimmt.

Die vereinfachte Berechnung ist unter folgenden Bedingungen anwendbar:

- Die rechnerische und effektive horizontale Auslenkung quer zur Hauptachse (z.B. Montageabweichung) $\leq l / 600$
- Maximale Ausbiegung $\leq l / 500$ infolge q_d allein
- Maximale Ausbiegung $\leq l / 350$ infolge q_d zuzüglich äusserer Einwirkung
- Die Baustoffkennwerte sind mit den mittleren Steifigkeiten einzusetzen

Der Bemessungswert der Stabilisierungskraft q_d wird aus den möglichen Lastfallkombinationen mit jeweils einer Leiteinwirkung ermittelt und mit der zugehörigen äusseren Einwirkung überlagert.

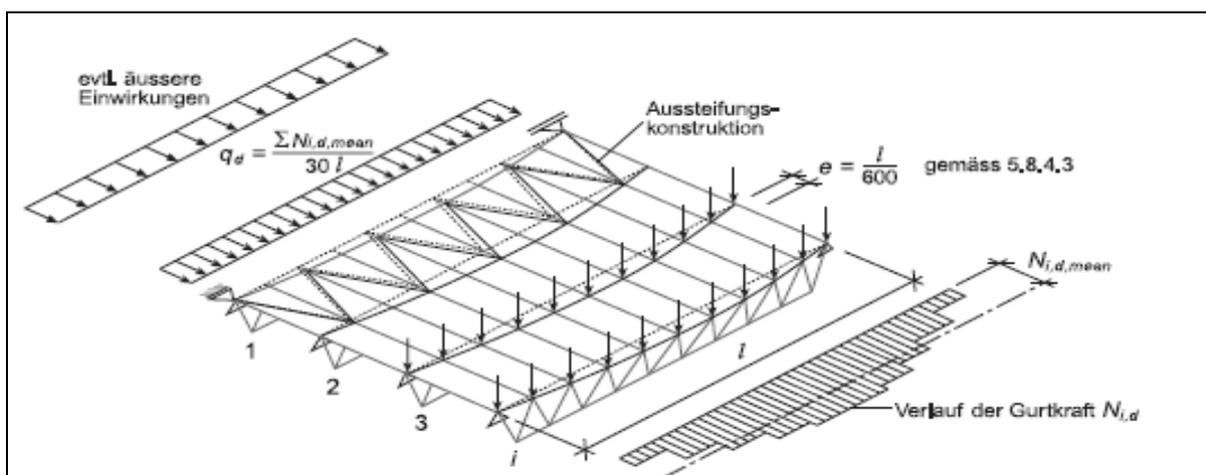


Bild 1: Durch eine Aussteifungskonstruktion seitlich stabilisierte Trägerreihe. Die Gurtkräfte $N_{i,d}$ resultieren aus den äusseren, in der Ebene wirksamen Lasten

Berechnung nach Theorie 2. Ordnung

Lässt sich ein Tragwerk nicht gemäss vorgehend beschriebener Art vereinfachen muss für die Bemessung der Stabilisierungselemente eine Berechnung nach Theorie 2. Ordnung am räumlichen Modell durchgeführt werden.

In einem räumlichen Modell erhalten Stabilisierungsverbände nur eine Beanspruchung aus vertikalen Lasten wenn eine Vorverformung aus der Ebene berücksichtigt wird. Diese Anfangsverformung e der zu stabilisierenden Bauteile (Biegeträger, Bogen, Fachwerkträger) muss gemäss SIA 265 Ziffer 5.8.4.3 mit mindestens $e \geq \ell / 600$ angenommen werden.

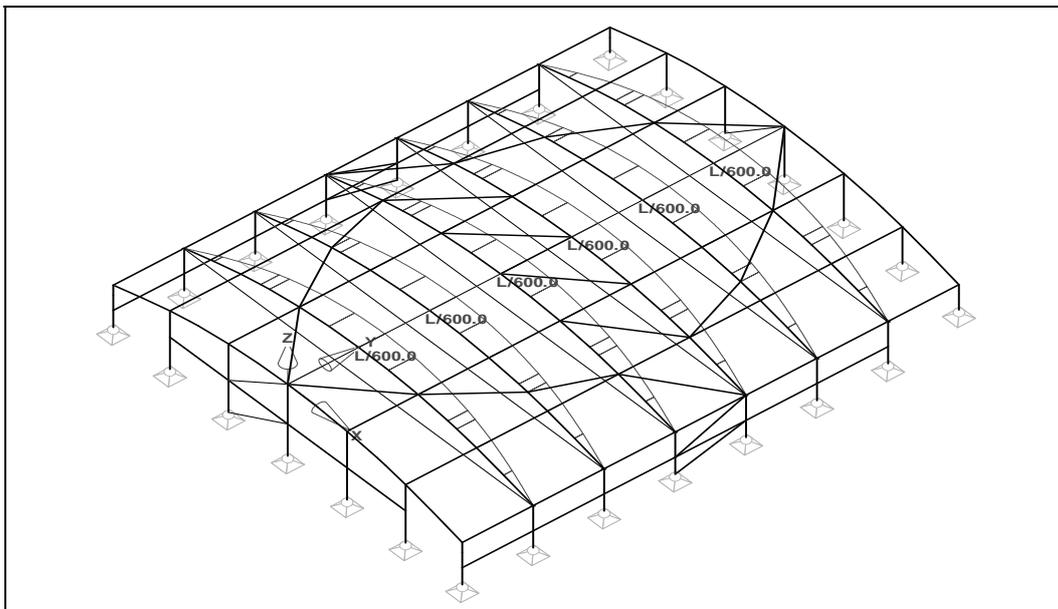


Bild 2: Anfangsverformung ($e = \ell / 600$) parabolförmig über ganze Trägerlänge angesetzt

Weiter hat die Berechnung mit einer realitätsnahen Modellierung der Gelenke und Lagerungsbedingungen zu erfolgen. Die Verformungen und die daraus resultierenden Spannungen sind mit reduzierten Steifigkeiten (Elastizitäts- und Verschiebungsmodul) zu bestimmen (SIA 265 5.8.4.2).

Lasteinleitung in Verbände

In der Regel werden an eine Aussteifungskonstruktion mehrere Bauteile (Biegeträger, Bogen, Fachwerkträger) „angehängt“. Diese Verbindung wird bei Dachkonstruktionen häufig mit den Dachpfetten gewährleistet. Die Pfetten sind somit zusätzlich zur Biegebeanspruchung aus den Dachlasten durch Zug- oder Druckkräften beansprucht. Für die Bemessung muss ein Stabilitätsnachweis (Druck mit Biegung) geführt werden. Die Knicklänge entspricht dabei dem Trägerabstand.

Die Pfettenstösse sind zug- und druckfest auszubilden. Die Nachgiebigkeit der Stösse ist bei einer statischen Berechnung am räumlichen Model zu berücksichtigen. Jede Verbindung zwischen Pfette und Träger ist für die pro Träger anfallende Abstützungskraft zu dimensionieren.

Die Normalkraft einer Zwischenpfette zur Weiterleitung von Stabilisierungskräften berechnet sich wie folgt:

$$F_{d,i} = q_d \cdot a \cdot n$$

a = Abstand der Abstützungen

n = Anzahl der angeschlossenen Träger

Die Normalkraft einer Randpfette zur Weiterleitung von Stabilisierungskräften berechnet sich wie folgt:

$$F_{d,i} = q_d \cdot L/2 \cdot n$$

a = Abstand der Abstützungen

n = Anzahl der angeschlossenen Träger

Jede Pfette muss jedoch mindestens für eine Normalkraft gemäss SIA 265.75 bzw. 76 bemessen werden.

Normalkräfte in Pfetten mit Abstützungsfunktion

- Zwischenpfetten: $F_{d,1} = q_d \cdot a$ $F_{d,2} = 2 \cdot q_d \cdot a$ $F_{d,3} = 3 \cdot q_d \cdot a$
- Randpfetten: $N_{d,1} = q_d \cdot L/2$ $N_{d,2} = 2 \cdot q_d \cdot L/2$ $F_{d,3} = 6 \cdot q_d \cdot L/2$

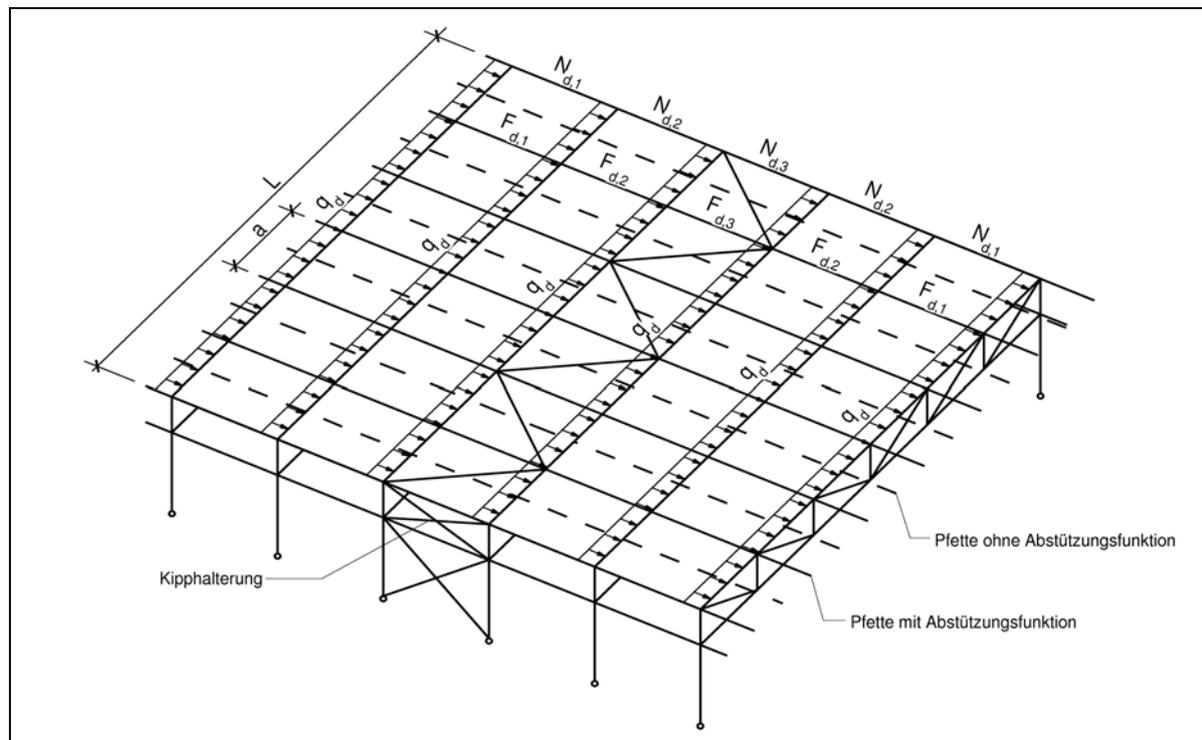


Bild 3: Normalkräfte in den Pfetten mit Abstützungsfunktion

Ausgleich der inneren Kräfte

Stabilisierungskräfte können innerhalb eines Systems bestehend aus Trägern, Pfetten und Verband ausgeglichen werden. Stützen und Fundamente werden daher nicht zusätzlich beansprucht. Der Kräfteausgleich ist gewährleistet wenn folgende Punkte eingehalten werden:

- Innere Pfetten mit Stützfunktion und zugehörige Anschlüsse sind für die Stabilisierungskraft bemessen.
- Bemessung der Randpfetten für eine Normalkraft die der Auflagerreaktion des mit der Stabilisierungskraft q_d berechneten Verbandes entspricht.
- Träger sind beim Auflager gegen Kippen gehalten.

Entwurf von Aussteifungskonstruktionen

Grundlagen

Am Beispiel einer freitragenden Halle werden mögliche Ausbildungsarten von Dachverbänden gegenüber gestellt. Für die Beurteilung und Diskussion wurden Vergleichsberechnungen mit wirklichkeitsgetreuen Lastannahmen durchgeführt.

Die Aussteifungsverbände sind bei Fachwerkträgern am Druckgurt, bei Biegeträgern am gedrückten Rand anzuordnen.

Abmessungen

- Spannweite 40.00 m
- Länge 47.00 m
- Wandhöhe 8.50 m
- Binderabstand 6.70 m
- Dachform Flachdach (DN 5°) oder Bogendachdach
- Dachhaut Trapezblech oder Membrane

Statisches System

- Primärträger auf Pendelstützen
- Stabilisierung über Dach- und Wandverbände

Primärträger

- Variante 1: trapezförmiger Fachwerkträger (Flachdach)
- Variante 2: 2-Gelenk-Bogen mit Zugband (SWISS-Gewi-Stangen)

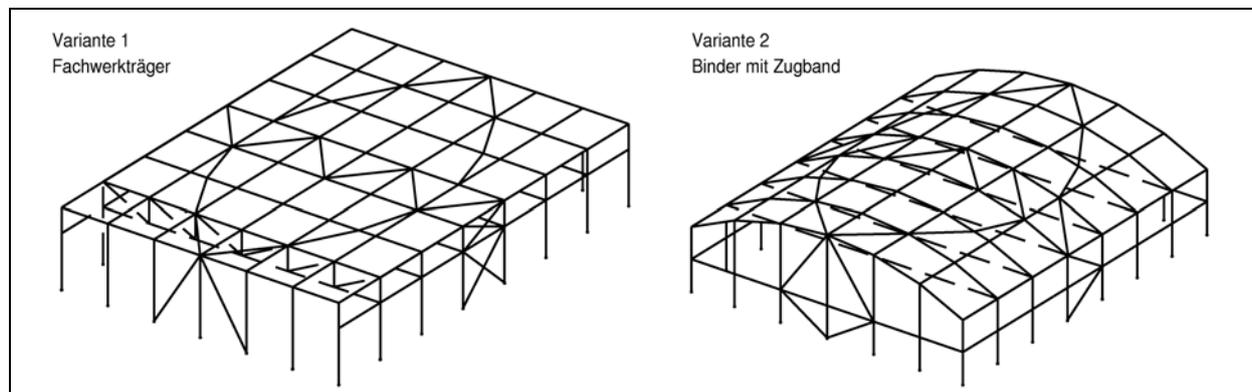


Bild 4: Statische Systeme der Vergleichshallen (mit Parabel-Verband)

Diagonalverband

Verbände mit Diagonalen werden üblicherweise mit gekreuzten Zugstangen oder mit auf Zug- und Druck beanspruchten Stäben ausgeführt.

Eigenschaften

- Stabanschlüsse → Nachgiebigkeit der Verbindungen wirkt sich stark auf die horizontale Verformung aus (Schiefstellung der Stützen in Gebäudemitte).
- Der Verband in Längsrichtung der Halle benötigt in der Regel zusätzliche Stäbe als „Ober- und Untergurte“ da die Pfetten bzw. die Verbindungen zwischen Pfette und Binder die Kräfte nicht aufzunehmen vermögen.

Vergleich Flachdach - Bogendach

- Flachdach: Keine unerwünschte Zwängungen in den Verbandsstäben bei einer Beanspruchung des Tragwerks mit vertikalen Lasten (Eigengewicht und Schnee).
- Bogendach: Grosse Normalkräfte in den Längsverbänden durch die Formänderung im Primärträger (Zugbanddehnung). Die Anordnung des Längsverbandes in Hallenmitte reduziert die Zwängungen markant.

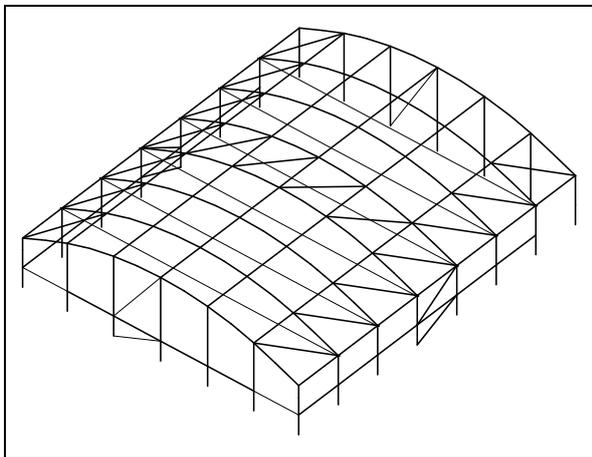
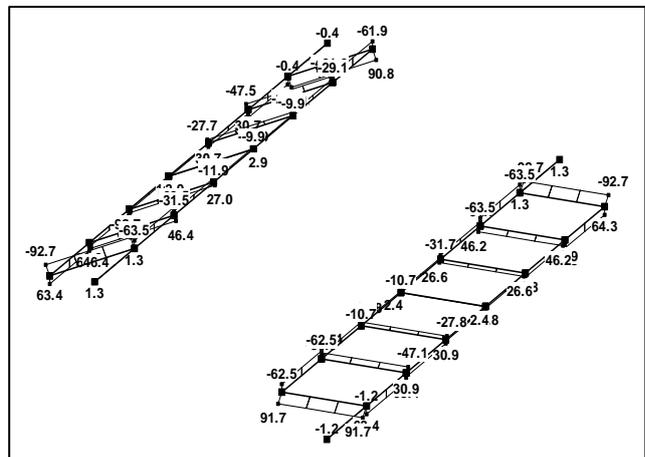


Bild 5: Bogendach mit Diagonalverband

Bild 6: Normalkräfte (N_d) in Diagonalst. unter Schneelast

Bei Windlasten auf die Stirnwand wirken die Primärträger als Fachwerkgurten des Verbandes. Durch die Bogenform des Binders ergibt sich eine Umlenkung der Normalkräfte. Diese führt zu grösseren Verformungen.

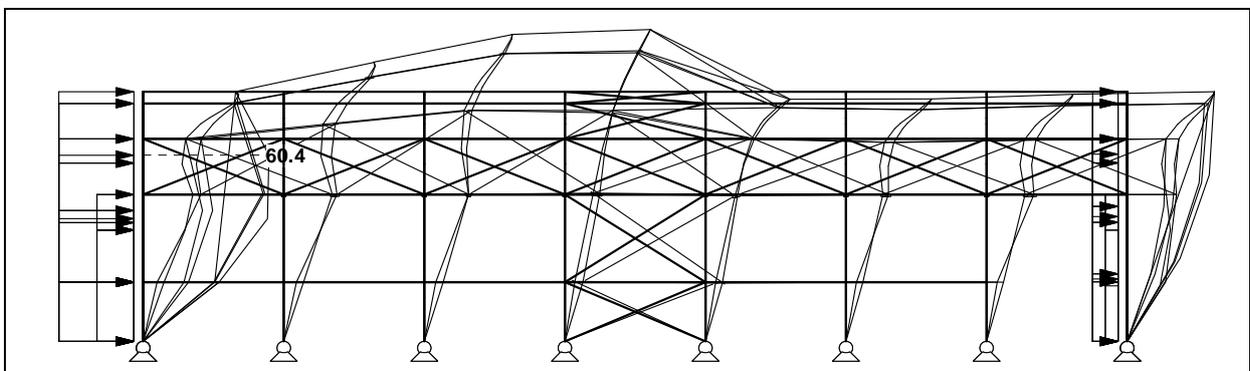


Bild 7: Längsschnitt gesamte Halle mit den Verschiebungen bei Wind auf Stirnwand

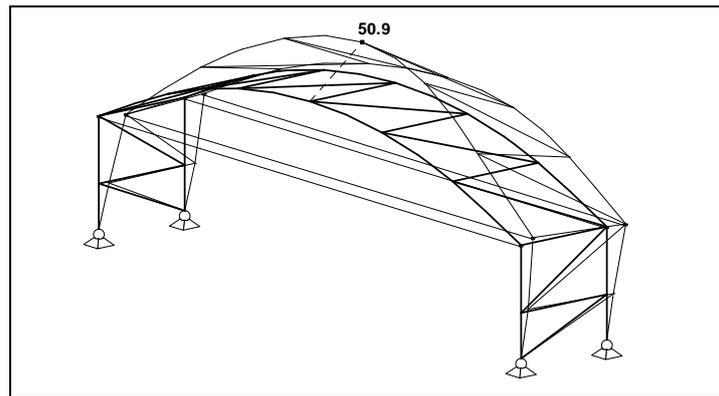


Bild 8: Verformung des Querverbandes unter Wind auf Stirnwand

Parabelförmiger Verband

Parabelförmige Verbände werden als reine Zugstangen- oder Zugseilsysteme oder aber auch mit auf Zug und Druck beanspruchten Stäben ausgeführt. Je nach Anordnung der Parabel ist an den Traufen oder am First ein Verbindungsstab - zug- und druckfest angeschlossen - notwendig.

Zur Aussteifung in Längsrichtung kommt ein Verband mit Diagonalen zur Anwendung.

Eigenschaften

- Seil-Parabeln ergeben bei Windbeanspruchungen relativ grosse horizontale Verformungen, da die Dehnsteifigkeit im Vergleich zur Traglast vergleichsweise klein ist ($E_{\text{mod}} \approx 100'000 \div 140'000 \text{ N/mm}^2$).
- Bei ungleichmässiger Belastung (z.B. Einzellast aus Bremskraft Kran) können unter Umständen grössere horizontale Verformungen resultieren. Dies kann mittels Anordnung eines weiteren ausgleichenden Stabilisierungselements verhindert werden.

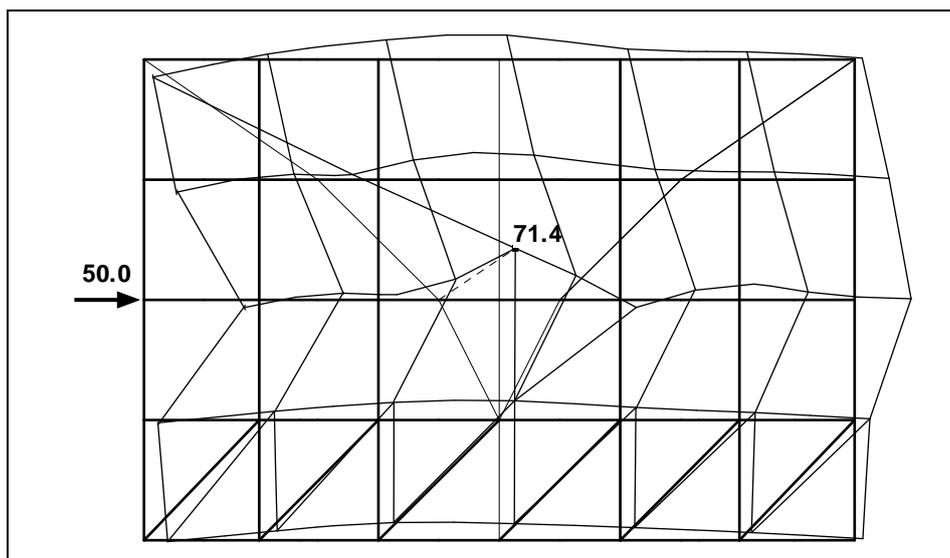


Bild 10: Teilansicht (Grundriss) des Systems mit den Verformungen unter einer Einzellast

Vergleich Flachdach - Bogendach

- Flachdach: Keine nennenswerten Zwangungen im System bei einer Beanspruchung durch vertikale Lasten.
- Bogendach:
 - Fall 1a (Parabel mit Zugstangen); bei einer vertikalen Belastung des Systems werden die Zugelemente des Verbandes (Stangen oder Seil) durch die Dehnung des Binder-Zugbandes vollständig schlaff. Die Stabilität der Halle ist nicht mehr gewährleistet. Die Struktur kann sich horizontal soweit verschieben bis sie wieder in den Seilen „hängt“. Eine solche Struktur lässt sich nicht an einem räumlichen Modell berechnen, da diese als instabil erkannt wird.
 - Fall 1b (Parabel zug- und druckfest): Bei der Ausführung mit zug- und druckfesten Stäben ergeben sich grosse Druckkräfte da die Binder durch die Parabel gestützt werden.

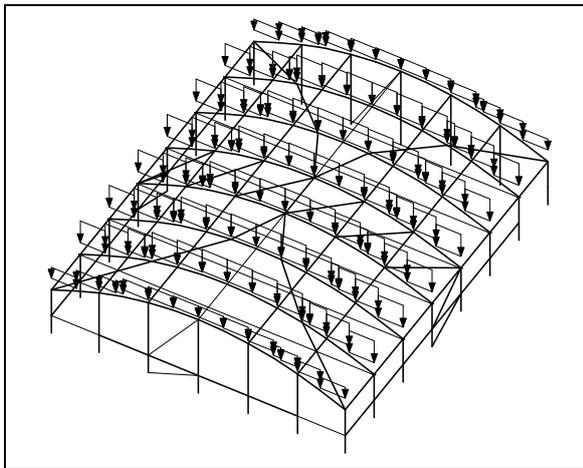


Bild 9: Bogendach Fall 1b; System unter Schneelast

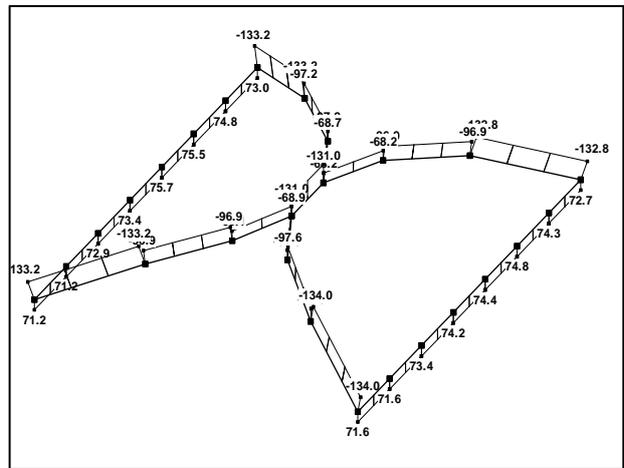
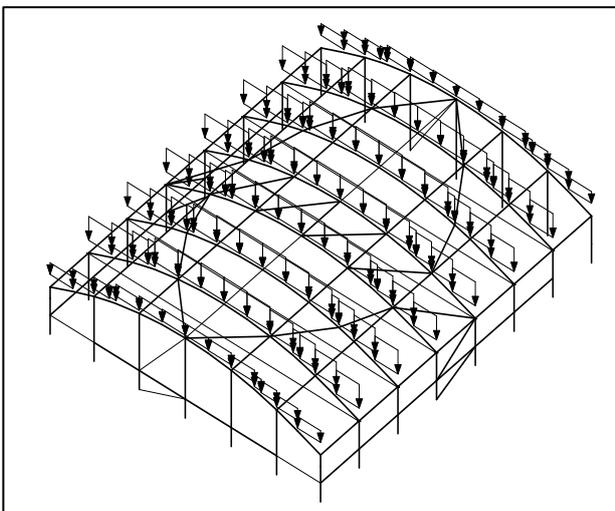
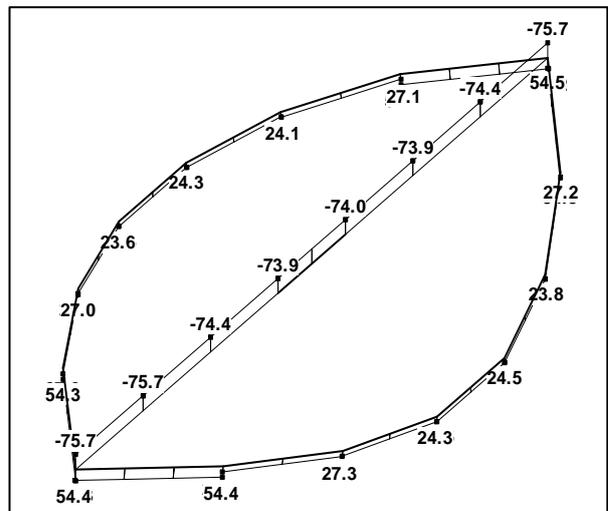


Bild 10: Fall 1b; Normalkräfte in Parabel inf. Schneelast

Fall 2: Unter vertikalen Lasten ergeben sich grössere Zugkräfte in der Parabel, die Stabilität ist aber gesichert. Die Grösse der Normalkräfte ist abhängig davon wie gross die statische Höhe der Parabel gewählt wird (Abstand First bis Scheitelpunkt der Parabel).



Bogendach Fall 2: System unter Schneelast



Fall 2: Normalkräfte in Parabel infolge Schneelast (N_d)

Dachscheibe aus HWS-Platten

Dachelemente mit einer Beplankung aus HWS-Platten werden häufig auch zur Aussteifung des gesamten Gebäudes beigezogen. Die Wirkungsweise einer solchen Dachscheibe gleicht derjenigen eines Stegträgers. Die Beplankung bildet den Steg. Die einzelnen Platten werden dazu an ihren Rändern schubsteif miteinander verbunden. Umlaufende Träger mit zug- und druckfesten Verbindungen bilden die Gurten.

Eigenschaften

- Sehr geringe Verformungen auch bei grossen Scheibenspanweiten.
- Die Scheibe wirkt als kontinuierliche Kipp- und Knickhalterung (aus der Ebene).
- Das Schwinden und vor allem Quellen der einzelnen HWS-Platten muss möglich sein. → Fugen zwischen den einzelnen Platten vorsehen.

Vergleich Flachdach - Bogendach

- Flachdach: Scheiben aus HWS-Platten eignen sich sehr gut für Aussteifungen.
- Satteldach: Grosse Zwängungen im ersten Binderfeld da die Tragkonstruktion der Stirnwand in der Regel eine geringere horizontale Verformungen als der Binder aufweist.
Die Verwendbarkeit einer Dachscheibe aus HWS-Platten ist von der Grösse der horizontalen Verformung des Traufpunkts (am Binder) abhängig.

Schlussbemerkung

Das Entwerfen und Bemessen von Aussteifungs- und Stabilisierungsverbänden erfordert eine umfassende Kenntnis der Wirkungsweise des gesamten Tragsystems. Mit vorliegendem Bericht wird gezeigt, dass durch eine vereinfachte Betrachtung und Bemessung mittels einzelner Ebenen in gewissen Fällen massgebende Bemessungszustände nicht erkannt werden können.

Literatur

- [1] SIA Dokumentation D 0195: Holzbau; Bemessungsbeispiel zur Norm
- [2] SIA Dokumentation D 0185: Holzbau; Einführung in die Norm

