

DIPLOMARBEIT
Master's Thesis

Profiblech-Schubfelder für leichte Hallendächer

Ausgeführt am Institut für

Hochbau und Technologie
der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Andreas Kolbitsch

durch

Akos Lagler
01527396

Anschrift

Datum

Unterschrift (Student)

Kurzfassung

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit dem Thema Profilblech-Schubfelder für leichte Hallendächer bei Industriebauten. Die Verwendung von Trapezblechen bei Hallenkonstruktionen hat eine lange Tradition, da diese Elemente neben der allgemeinen raumabschließenden Funktion auch über andere Vorteile verfügen. Seit mehreren Jahren ist die aussteifende Wirkung der Bleche als Schubfeld bekannt. Die Effektivität eines Schubfeldes ist ungefähr so groß wie die eines traditionellen Wind- oder Dachverbandes. Die Normen, EN 1993-1-3 [2] und ECCS [3] geben ein allgemeines, auf Versuchen basierendes Rechnungsverfahren zur Ermittlung der Steifigkeit des Bleches. Mehrere großmaßstäbliche Untersuchungen [5], [6] zeigen, dass das in der Norm [3] stehende Verfahren mehrere Fehler hat, so dass eine Präzisierung der Methode nötig ist. Ungenauigkeit und falsche Ergebnisse können auch zur Unterdimensionierung der Konstruktion bei Erdbeben führen. Diese Diplomarbeit nimmt sich dieser Probleme an.

Im ersten Teil der Arbeit wird eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt; hier werden die wichtigsten Einflussparameter und Regeln zusammengefasst. Für die Anwendung des Schubfeldes müssen mehrere Vorschriften und Regeln eingehalten werden. Drei verschiedene Berechnungsverfahren [22], [23] und [3] werden vorgestellt und verglichen. Am Ende der Literaturrecherche wird eine Musterberechnung für eine allgemeine Dachkonstruktion nach EN 1993-1-3 [2] ausgeführt.

Der Fokus liegt dabei auf der Nachprüfung der Berechnungsverfahren des Schubfeldes nach der Norm mit einem FE-Modell. Auf der Grundlage der durchgeführten Studie wird eine allgemeine Dachkonstruktion, bestehend aus zwei Trägern mit Pfetten und Trapezblech, als FE-Modell gebaut. Das Analysemodell wird mithilfe von großmaßstäblichen Versuchen [5], [7], [32] und früheren Modellen [6] verifiziert. Mit dem FE-Modell wird die Steifigkeit bei verschiedenen Konstruktionsvarianten ermittelt und mit dem Rechnungsverfahren nach [2] und [3] verglichen. Die folgenden Parameter wurden variiert: Rahmenabstand, Blechstärke, Profilgröße, Verbindungsmittel und Befestigungsart. Wie frühere Versuche [32], [39] zeigen, ergibt sich eine relativ große Abweichung. Am Ende werden Vorschläge für die Verbesserung der Berechnungsmethode gemacht. Es wird ein neuer Steifigkeitsfaktor nach [39] eingegeben und modifiziert, welcher die Wirkung der Pfetten berücksichtigt. Mithilfe des neuen Faktors folgen die Ergebnisse dem tatsächlichen Verhalten der Konstruktion viel besser.

Abstract

This master's thesis seeks to investigate the topic of stressed skin design for light hall roofs in industrial halls. The usage of profiled steel sheeting for industrial buildings has a long-standing tradition as these elements have not just a general space-enclosing function but also some other relevant advantages. For years, the stiffening effect of trapezoid sheets as diaphragm, shear panel has been well known. The efficiency of diaphragms is approximately as big as a traditional roof bracing and vertical bracing in the walls. The norms EN 1993 1-3 [2] and ECCS [3] enable a general, on experiment based calculation system for the determination of the shear stiffness of sheeting. A variety of wide scale investigations [5], [6], [32], [39] show that the method based on the norms [2], [3] has some mistakes, thus it is necessary to refine and specify the method. Inaccuracy and wrong results can also lead to the undersizing of the construction in case earthquakes. The following thesis is dedicated to this issue.

In the first part of the thesis a comprehensive literature research was conducted; there the most important rules and influence parameters were summarized. For the usage of the shear stiffness of a panel, wide range of rules and regulations need to be adhered. Three different calculation methods [22], [23], [3] were introduced and compared. At the end of the literature research, a calculation model was executed for general roof constructions in respect to EN 1993-1-3 [2].

The main focus in these cases is on the review of the calculation process of the shear panel in respect to the norm with an FE-Modell. The basis of the conducted study is the general roof construction, consisting partly of a steel portal frame, which consist of a rafter with purlin and steel trapezoidal sheets, built as an FE-Model. The method of analysis was verified with the help of large-scale tests [5], [7], [32], [39] and with already existing models [6]. With the adjusted model the stiffness of a sheeting at different constructions can be determined and with a calculation method by the norm [3] compared. The following parameters were varied: bay spacing, thickness of a panel, size of a panel, bonding element and way of mounting. As earlier experiments show [32], [39], [6], this has a relatively high deviation.

At the end of the thesis, recommendations are shown on how to improve the calculation method by the norm [3]. A new stiffness factor [39] can be added, which takes into consideration the effect of the purlins. With the help of the new factor, the results follow the actual behaviour of the construction much better.

Inhaltsverzeichnis

1	Das Tragsystem einer industriellen Stahlhalle	7
1.1	Das Primärtragwerk	9
1.2	Das Sekundärtragwerk	9
1.2.1	Der Wandriegel und die Dachpfetten	10
1.2.2	Dach- und Wandbekleidung	11
1.2.3	Verbindungsmitel.....	12
2	Literaturrecherche	14
2.1	Allgemeine Informationen über Schubfelder.....	14
2.1.1	Begriff des Schubfeldes	14
2.1.2	Modellierung des Schubfeldes.....	16
2.2	Stabilisierung biegedrillknickgefährdeter Träger	17
2.2.1	Stabilisierung durch das Schubfeld	18
2.3	Sandwichpaneele als aussteifendes Schubfeld	21
2.4	Anwendungsbereiche des „stressed skin design“	25
2.5	Verschiedene statische Systeme.....	26
2.5.1	Rahmenkonstruktion	26
2.5.2	Verbindung zwischen Dachbekleidung und Rahmen.....	27
2.6	Verschiedene Ausführungen, konstruktive Einzelheiten, Detailausbildungen.....	29
2.6.1	Befestigung des Trapezbleches.....	29
2.6.2	Ausgestaltung der Endverstärkung des Trapezbleches und ihre Wirkung.....	30
2.6.3	Öffnungen.....	32
2.7	Verbindungsmitel	34
2.8	Mögliche Versagensfälle.....	36
2.9	Berechnung der Steifigkeit	40
2.9.1	Berechnung nach <i>Steinhardt/Einsfeld</i>	40
2.9.2	Berechnungsmethode nach <i>Schardt/Strehl</i>	44
2.9.3	Berechnungsmethode nach Bryan/Davies.....	49
2.9.4	Berechnungsmethode nach Bogaard.....	53
2.9.5	Vergleich der verschiedenen Methoden.....	58
2.10	Spezielle Wirkung des Schubfeldes unter seismischen Lasten	59
2.11	Zusammenfassung der Literaturrecherche	61
3	Musterberechnung und Auswertung der Ergebnisse, Einflussfaktoren.....	63
3.1	Verschiedene konstruktive Ausgestaltungen	67
4	Modellierung des Schubfeldes mit dem FE-Modell.....	68
4.1	Beschreibung des Modells	68
4.2	Verifikation des FE-Modells.....	73
4.2.1	Verifikation des Schubfeldmodells mit großmaßstäblicher Untersuchung	73
5	Vergleichsuntersuchungen nach der ECCS-Berechnungsmethode	76
5.1	Rahmenabstand.....	76

5.2	Blechdicke der Pfetten	77
5.3	Trapezblechhöhe	78
5.4	Trapezblech als innere Schale.....	79
5.5	Verifikation des Trapezbleches	80
5.5.1	Verifikation nach <i>Seidel</i>	80
5.6	Modifizierung der Pfettensteifigkeit.....	81
5.6.1	Musterberechnung für die Ermittlung des neuen c_4 Faktors.....	84
5.7	Wirkung der sekundären Aussteifungselemente und die Möglichkeiten der Ausgestaltung 87	
5.7.1	Wirkung der Dachneigung	87
5.7.2	Vorspannung.....	88
6	Zusammenfassung.....	89
	Bezeichnungen.....	91
	Literaturverzeichnis.....	95
	Verwendete Programme	97
	Anhänge	97

1 Das Tragsystem einer industriellen Stahlhalle

Leichte Hallenkonstruktionen weisen viele Vorteile auf, weshalb die Bauindustrie diesen Typ sehr oft verwendet. Der Anwendungsbereich ist weit gefasst, da die Gebäude die verschiedenen Anforderungen sowohl bei großen Industriehallen als auch bei Sporthallen erfüllen. Die Rahmenkonstruktionen sind ideal für kleine und mittelgroße Industriehallen, Lagerhallen. **Abb.1.** zeigt eine allgemeine Rahmenkonstruktion aus Stahl. [39]



Abb.1: Rahmenkonstruktion [8]

In **Abb.1.** ist auch zu erkennen, dass die Bauweise eine sehr große freie Fläche und hohe Flexibilität bietet. Durch die Verwendung von Stahl reduziert sich das Eigengewicht und somit auch der Preis. Der Leichtbau hat folgende Vorteile:

- flexible Gebäudegestaltung
- individuelle Abmessungen
- schnelle Montage mit Schraubenverbindungen
- hoher Vorfertigungsgrad
- wetterunabhängige Ausführung
- spätere Erweiterungsmöglichkeiten
- wenig Arbeitsaufwand

Neben den vielen Vorteilen verfügt die Bauweise über einige Nachteile. Die möglichen Formen sind wegen des hohen Vorfertigungsgrads gegenüber der monolithischen Bauweise

eingeschränkt. In Europa wurde deswegen im Hochbau z. B. bei Büroimmobilien, meistens Stahlbeton verwendet. Die Stahlverwendung beschränkt sich in Europa meistens auf ergänzende Konstruktionen und Industriebauten, weil es bei Wohn- und Bürogebäuden eine sehr strenge Brandschutzregelung gibt und das Material teurer ist. Die vielfältige Gestaltung kennzeichnet diese Elemente. Das Dach und die Wandverkleidung schützen die Halle vor dem Wetter. Das Dach und die Wand können in gedämmter oder in ungedämmter Ausführung geliefert werden, abhängig von den Anforderungen. [5], [39]

Da der Baustoff Stahl zu 100% wiederverwertbar ist, sind diese Konstruktionen umweltfreundlich und recyclingfähig. Zudem kann man auch die Vorteile des Tageslichtes ausnutzen, weil der Rahmenaufbau dem Einbau von Lichtkuppeln oder Fensterbändern ermöglicht.

Abb.2. zeigt die Hauptteile einer Halle. Man kann eine allgemeine Industriehalle auf zwei verschiedene Teile aufteilen: das Primärtragwerk und das Sekundärtragwerk. Das Primärtragwerk besteht aus den Hauptrahmen und aus der Aussteifung. Zum Sekundärtragwerk zählen die Dachpfetten, die Wandriegel und das Trapezblech. Mit diesen beschäftigen sich die folgenden Kapitel. [39]

Die Berechnung nach EN 1993-1-1 ist einfach, da man die Elemente getrennt voneinander bemessen kann. Die Lastverteilung ist auch ähnlich, denn die Flächen teilen sich die Wind- und Schneelasten, das Trapezblech verteilt die Lasten zwischen den Z-Profilen und es leitet die Lasten an den Rahmen weiter. Diese Konstruktionen sind meistens erdbebensicher. Die zu berücksichtigenden Lasten sind: Wind, Schnee, Eigengewicht, Exzentrizität, Nutzlast sowie Temperaturveränderungen. [39]

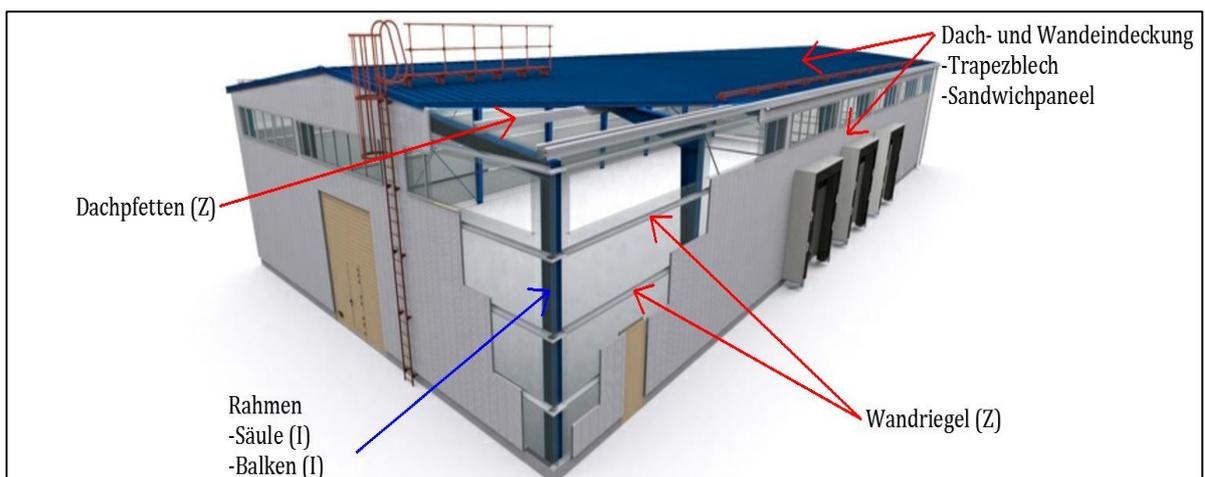


Abb.2: Gliederung des Tragwerks [9]

1.1 Das Primärtragwerk

Die Primärkonstruktion nimmt die Lasten auf und leitet in die Fundamente ein. Die Grundform, ein Rechteck, ist meistens gegeben, aber innerhalb dieser Bindung kann man zahlreiche Layouts auswählen. Die Hersteller bieten standardisierte Konstruktionsformen, abhängig von der Spannweite. Bei einer kleineren Spannweite sind die Stützen meist biegesteif durch Ankerbolzen mit dem Fundament verbunden. Die Rahmenecke ist in diesem Fall gelenkig. Bei zunehmender Spannweite ist die Rahmenecke mit einer Voute konstruiert und ab einer Höhe über 20m wird die Stütze mit einem veränderlichen Querschnitt konstruiert. Die Rahmenecke ist ein kritischer Punkt für die Statik, da die Kraftumlenkung bei biegesteifer Ausgestaltung hohe Spannungen hervorruft. Die statische Kontrolle beinhaltet die Festigkeitsprüfung der Querschnitte und einen Stabilitätsnachweis auf lokaler und globaler Ebene. [39], [43], [44]

Das verwendete Material ist meist beruhigter Stahl, z.B. S235 JR+AR (Streckgrenze von 235N/mm^2 , Gütegruppe JR und nicht normalisiert (+AR)). Die Träger sind warmgewalzte Profile (HEA, IPE). Um die einzelnen Teile zu verbinden, werden verzinkte, hochfeste Schrauben verwendet. Diese Stahlprofile bekommen bei der Vorfertigung eine Schutzschicht, es gibt auch die Möglichkeit der Feuerverzinkung. [35]

1.2 Das Sekundärtragwerk

Unter Sekundärkonstruktion versteht man die Elemente, die für die Verankerung der Dach- und Wandpaneele erforderlich sind. Um das Verhalten der verschiedenen Elemente genauer zu verstehen, ist es wichtig, über die Anordnung der Konstruktion, über die Produktion und über die typischen Größen ausreichende Informationen zu gewinnen. Deshalb befasse ich mich in diesem Kapitel mit dem Wandriegel, der Dachpfette und dem darauf gelegten Trapezblech. [39], [43]

Bei einer Rahmenkonstruktion sind Aussteifungsmaßnahmen meistens nötig. In Querrichtung muss mindestens ein Feld mit K- oder Kreuzverbänden (L, O) ausgesteift werden. Diese Anordnung ist besser geeignet für Fenster, Tor, als vollwandige Scheiben. Die Aussteifung kann sowohl im außenliegenden Feld als auch im Mittelfeld eingesetzt werden. Diese Entscheidung beeinflusst die späteren Erweiterungsmöglichkeiten. Oft wird eine Zugdiagonale eingesetzt, die die Zugkraft aufnehmen kann. [39], [43], [44]

Die gemeinsame Eigenschaft der Elemente der Gebäudebekleidung ist die, dass heutzutage bei Industriehallen ausnahmslos dünnwandige Profile eingesetzt werden. Die Anwendungsbereiche dieser Teile sind die Sekundär- und Tertiärelemente, also die Dachpfette, der Wandriegel und das Trapezblech, sowohl bei Stahlhallen als auch bei vorgefertigten Stahlbetonhallen. [39]

In Ländern, in denen wo die Vorfertigung schon große Tradition hat, z.B. in den USA oder Neuseeland, werden diese Elemente als Primärtragwerk verwendet.

1.2.1 Der Wandriegel und die Dachpfetten

Die Entwicklung dünnwandiger Profile war bedeutend bei Rahmenkonstruktionen in Industriehallen. Vor der Verbreitung der Elemente wurden am häufigsten warmgewalzte kleine IPE- oder HEA-Profile als Dachpfetten eingesetzt. Als Sekundärtragwerk waren sie nicht gut geeignet und das Eigengewicht war hoch. Zuerst wurden nur zweimal gewalzte Querschnitte **Abb.3. a)** hergestellt. Der lange, dünne Flansch wurde sehr schnell durch Beulen zerstört. Die Hersteller haben dieses Problem schnell erkannt, so dass die zweite Generation **Abb.3. b)** schon über eine obere und untere Lippe verfügte. Dies erhöht die lokale Stabilität. Die neueste Version ist die dritte Generation, die sogenannte Sigma-Pfette, zu sehen in **Abb.3. c)**. Hier wurde der Obergurt mit Sicke verstärkt. Die Verstärkung mit Sicke und Stegversatz ist dort angewöhnt, wo Plattenbeulen möglich ist. [39], [43], [44]

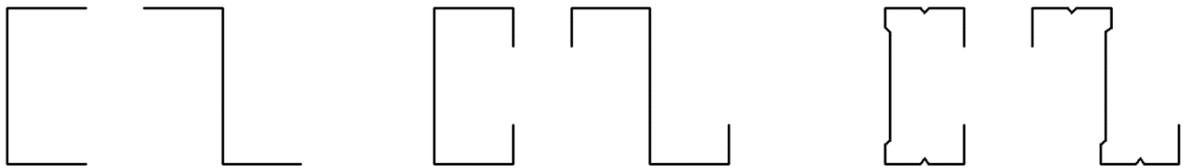


Abb.3: a) 1. Generation (kleine Beulsteifigkeit) b) 2. Generation (mit Lippe) c) 3. Generation (gewalzter Flansch und Steg)

Das verwendete Material ist verzinkter Stahl (Streckgrenze von 250 bis 350 N/mm²) oder hochfester Stahl (Streckgrenze von 350 bis 550 N/mm²). Mindestnennblechdicke für lineare dünnwandige Profile aus Stahl ist 0,88mm nach EN 1090-4 [10] und die Querschnitte werden durch Kaltumformung hergestellt. Der Vorteil der Kaltumformung ist, dass die Festigkeit höher ist, dabei sinkt die Duktilität. Mit dickeren Platten wurde Korrosionsschutz-Schicht nach Vorverformung aufgetragen. Häufig verwendete Profilhöhen sind 100-300mm, aber das Angebot ist sehr breit. Zwischen den verschiedenen Generationen gibt es einen Preisunterschied, weswegen bei kleineren Hallen die erste oder zweite Generation verwendet werden. Bei größeren Lasten und Spannweiten wird oft ein Mehrfeldträger konstruiert; in diesem Fall werden die Sigma-Pfetten eingesetzt. [35], [39]

Die Profile werden mittels Pfettenhaltern an der Unterkonstruktion befestigt. Bei einem gewalzten Steg wird ein passendes Kupplungsstück eingebaut. Trapezblech kann direkt mit der Unterkonstruktion bei konstruktiver Überlappung verbunden werden. [39], [43], [44]

Typische Gefahren sind die folgenden: Plattenbeulen, Beulen mit Torsion (asymmetrisches Profil), Wölbkrafttorsion und Biegedrillknicken. Die Platten sind immer sehr dünn, weswegen auf Perfektion geachtet werden muss.

Die Balken können als Einfeldträger (Maximum 6m Binderabstand), Zweifeldträger oder als Mehrfeldträger eingesetzt werden. Die maximale Länge ist wegen des Transports ca. 12m. Die Z-Pfetten werden durch Überlappung oder mit Kupplungsstücken gekoppelt. Wichtig ist die geeignete Überlappungslänge für einen biegesteifen Anschluss. [5], [39]

1.2.2 Dach- und Wandbekleidung

Das Material des Trapezbleches ist ähnlich wie bei den Z-Profilen: bandverzinktes, dünnwandiges Vormaterial nach Kaltverformung. Unlegierte Stähle sind in EN 1993-1-3 [2], nichtrostende Stähle in EN 508-3 geregelt. EN 10346 regelt zur Kaltumformung geeignete Werkstoffe. Die Formgebung der Trapezprofile erfolgt durch Rollformen aus Blechtafeln in Längsrichtung. Die Baubreiten der Profiltafeln sind zwischen 750mm und 1100mm. Hier war auch eine Weiterentwicklung wegen der Stabilitätsprobleme nötig. **Abb.4.** a) zeigt einen allgemeinen Querschnitt. Dieser ist ideal für kleinere Spannweiten. Mit dieser Anordnung ist die maximale Sickenhöhe 20-70mm, aber mit einer Verstärkung (Rippen), **Abb.4.** b), kann auch das Trapezblech-Hochprofil mit 110mm oder 200mm Sickenhöhe hergestellt werden. Diese können auch bei einem Kalt- oder Warmdach verwendet werden. [35], [39]



Abb.4: a) normales Trapezblech b) Hochprofil

Bei der Bemessung der Sekundärelemente kann man sowohl Bemessungstabellen der Hersteller als auch Bemessungsprogramme, z.B.: Lindab Structural Designer verwenden. **Abb.5.** zeigt die Geometrie, die Auflagerung und die Lasten eines Trapezbleches. Die Größe der Überlappung und Schraubenanzahl kann auch mit Hilfe des Programms eingestellt werden. Es gibt die Möglichkeit, die Profile vom Hersteller auszuwählen. Das Programm kann neben der Tragfähigkeit durch die Gebrauchstauglichkeit überprüfen. [39]

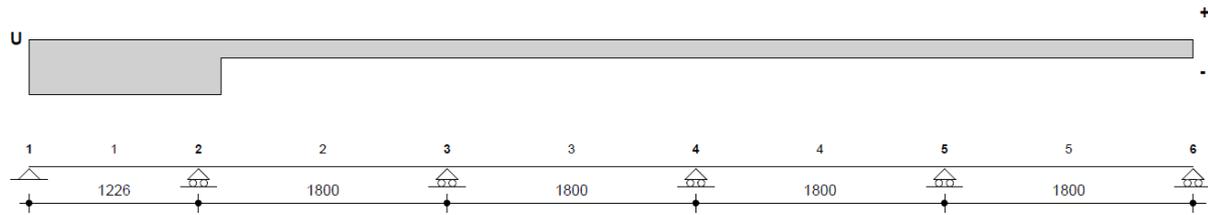


Abb.5: Lindab Structural Designer [9]

Bei gedämmten Konstruktionen werden oft Sandwichpaneele eingebaut, wie in **Abb.6.** dargestellt. Diese bestehen aus zwei profilierten Deckschichten aus Stahl, der Kern besteht aus Polyurethanschaum. Die Paneele spielen neben der Dämmung eine wichtige Rolle bei der Kraftübertragung zwischen den Rahmen, so dass man hier auch das Schubfeld und dessen Wirkung berechnen kann. [39]

Eine andere Möglichkeit für die Wand- und Dacheinkleidung ist die Stahlkassette, wie in **Abb.7.** zu sehen. Hier sind bei Tür- und Fensterauschnitten zusätzliche Wandriegel erforderlich. Die Kassetten werden horizontal von Stütze zu Stütze gespannt und werden mit Dämmmaterial ausgefüllt. Die Außenseite der Fassade bekommt zusätzlich ein Trapezblech. Die Montage kann sowohl von unten nach oben oder auch umgekehrt erfolgen. Ein großer Vorteil ist, dass die Innenfläche ohne sichtbare Befestigung ausgeführt wird. [39]

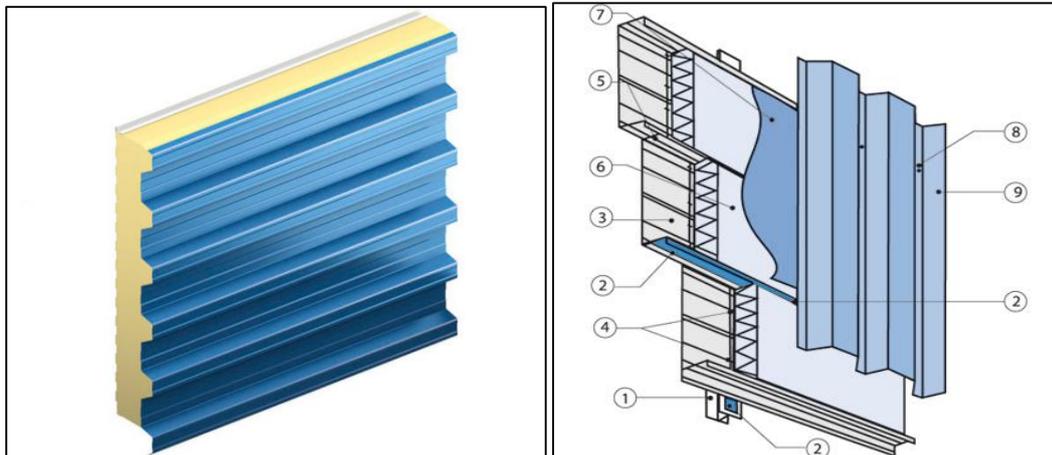


Abb.6: Sandwichpaneele [11]

Abb.7: Kassettenprofil [9]

1.2.3 Verbindungsmittel

Leichtbau bietet eine schnelle Ausführung mit weniger Montage. Der Hauptrahmen wird schon in der Fabrik zusammengestellt. Meistens geschieht dies mit Schweißverbindungen – hier muss man die maximale Transportlänge berücksichtigen. Kopfplatte, Voute und Steife werden auch mit Schweißverbindungen vorgefertigt. [39]

Allgemein wird ein Rahmen in vier Teilen geliefert, vor Ort mit Schrauben zusammengefügt und im Ganzen eingehoben. Im Folgenden wird hier detailliert die Verankerung des Trapezbleches beschrieben. [39]

Die Verankerung der Sekundärelemente kann unterschiedlich sein, aber der vorher hergestellte Korrosionsschutz darf nicht beschädigt werden. Diese Beschränkung schließt die bei Stahlkonstruktionen sehr oft verwendete Verfahren aus: die traditionelle Schraubverbindungen und das Lichtbogenschweißen. [39]

Bei dünnwandigen Profilen kann man die folgenden Verfahren verwenden: das Punktschweißen oder mechanische Verbindungsmitteln. Die mechanischen Verbindungsmitteln sind die folgenden: gewindefurchende Schrauben, Blindnieten und Setzbolzen. Zu den gewindefurchenden Schrauben zählen die selbstschneidenden Schrauben, sehen Sie **Abb.8. a)**, und die selbstschneidenden Schrauben mit Bohrspitze, sehen Sie **Abb.8. b)**. Mit diesen Schrauben ist der Korrosionsschutz kein Problem, weil die Schraube eine Schutzschicht in das selbst gebohrte Loch „einbringt“. So ist eine extra Schicht nach dem Einbau nicht nötig. [39], [6]

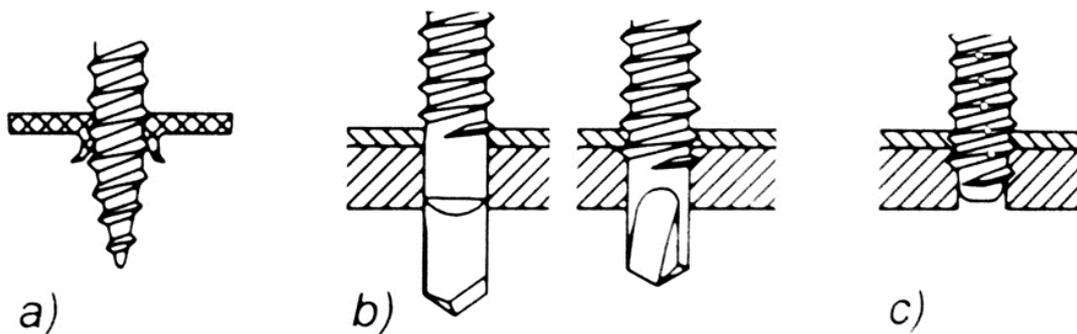


Abb.8: a) selbstschneidende Schraube b) selbstbohrende Schraube c) Gewindefurcherschraube [4]

Das älteste Verbindungsmittel ist die selbstschneidende Schraube a). Der Durchmesser ist sehr klein, so dass man sie auch bei 1mm Blechdicke verwenden kann. Das Loch muss in jedem Fall vorgebohrt werden. Die verbesserte Variante ist die selbstbohrende Schraube b): diese Schraube verfügt über einen Bohrkopf. Die Bohrung, Bildung der Innengewinde und die Anziehung der Schraube erfolgen zeitgleich, was eine kürzere Montagezeit bedeutet. In dem Wetter ausgesetzten Bereichen (Trapezblech am Dach) muss eine extra UV-beständige Dichtung (Unterlegscheibe) eingebaut werden. Bei Temperaturänderungen gibt es große Dilationen. Diese Gummidichtungen können aber der Bewegung folgen. Bei der Schraubenauswahl muss man auch das d/t (Durchmesser/Blechdicke) Verhältnis berücksichtigen, weil die maximale Dicke der Sekundärelemente 3-4mm ist. Auf der Baustelle muss man auch auf das richtige Anziehmoment aufpassen, weil diese Schrauben leicht zu fest angezogen werden können. Deshalb werden oft spezielle Geräte, z.B. Drehmomentschlüssel, verwendet. [39], [6], [2]

2 Literaturrecherche

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Literatur, die der Beantwortung der folgenden Fragen dienen soll: Bei welchen Konstruktionen kann das Sekundärtragwerk als Aussteifung berücksichtigt werden? Wie kann man die aussteifende Wirkung des Trapezbleches nach den Normen berechnen? Welche Parameter beeinflussen die Effektivität des Schubfeldes? Welche Nachteile hat das Verfahren?

2.1 Allgemeine Informationen über Schubfelder

2.1.1 Begriff des Schubfeldes

Der Begriff „Schubfeld“ spielt im Hochbau eine große Rolle. Wir können z.B. Geschossdecken in einem globalen Modell als aussteifendes Element modellieren. Durch die günstiger Wirkung des Schubfeldes wird die horizontale Verformung des Gebäudes verringert. Flächenhafte Bauteile (Trapezblech, Sandwichpaneel, Betondecken oder Fertigteildecken mit kraftschlüssigen Verbindung) können Kräfte in ihrer Ebene aufnehmen. Früher wurden diese Bauteile nur für die Aufnahme der Lasten (Wind, Schnee, Eigengewicht, Nutzlast) senkrecht zu ihrer Ausdehnung genutzt. Diese Bauteile werden als „Platten“ bezeichnet. Aber Flächenelemente können auch Kräfte in ihrer Ebene übertragen. Diese sind die Scheiben, wie in **Abb.9. a)** zu sehen. Hier treten die Kräfte nur in einer Richtung und in der Wirkungsebene auf. Wenn die Kräfte nicht in einer Wirkungsebene sind, nennt die Literatur die Belastung Schub oder Scheren; in **Abb.9. b)** zu sehen. [6], [45]

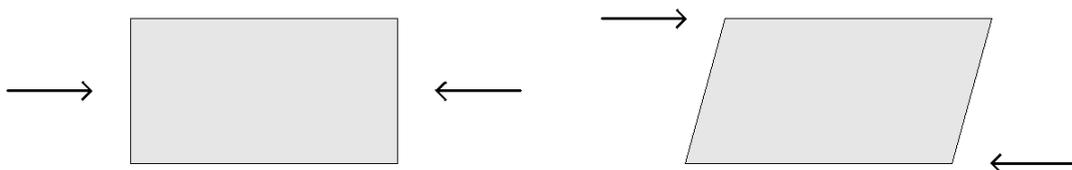


Abb.9: a) Scheibe b) Schubfeld [45]

Das Schubfeld funktioniert sehr gut schon seit mehreren Jahren bei der Planung von Massivbetondecken. Die Decke kann die horizontalen Kräfte zwischen den Säulen übertragen und die Kräfte auf den Untergrund ableiten. [39], [45]

Die Dacheindeckung funktioniert bei einem Gebäude mit Flachdach und mit horizontalen Lasten als ein „Balken“ mit einem hohen Steg. [3], [12]

In der äußeren Region eines Balkens (z.B. I Querschnitt) tritt Normalkraft (Zug und Druck) auf. Die Gurte sind auf Druck und Zug beansprucht. Das Trapezblech funktioniert wie ein Steg bei einem Balken, es trägt die Scherkraft. [3], [5]

Abb.10. zeigt sowohl die Normalkräfte in den äußeren Elementen a) (Flansch) als auch das Schubfeld b) (Steg).

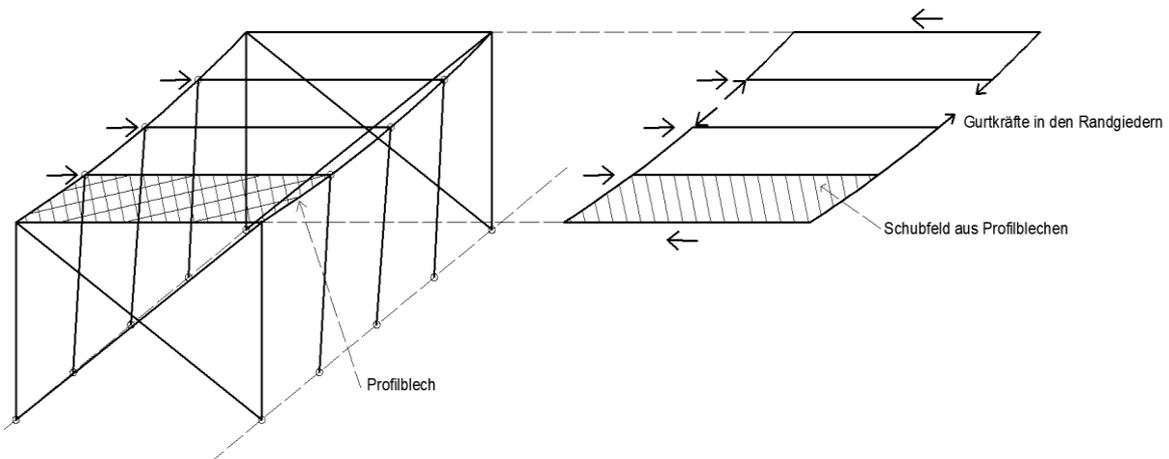


Abb.10: Scheibenwirkung bei einem Flachdach [2]

Mehrere Experimente und wissenschaftliche Arbeiten beweisen, dass das Schubfeld (Dach, Wand, Decke) große Auswirkung auf das Verhalten des Gebäudes hat. Der Aussteifungseffekt des Schubfeldes ist durch im Einsatz stehende Konstruktionen bewährt. Wenn die Befestigung der Außenhaut entsprechend ausgeführt ist, werden die Sekundärelemente auch in die globale Lasttragung miteinbezogen. Das Schubfeld ist nicht nur beim Flachdach, sondern auch beim geneigten Dach wichtig. Dies ist in **Abb.11.** zu sehen. Der sogenannte „Effect of stressed skin action“ kann für den Nachweis der Aufnahme der horizontalen und vertikalen Lasten beim Steildach verwendet werden. [2], [3]

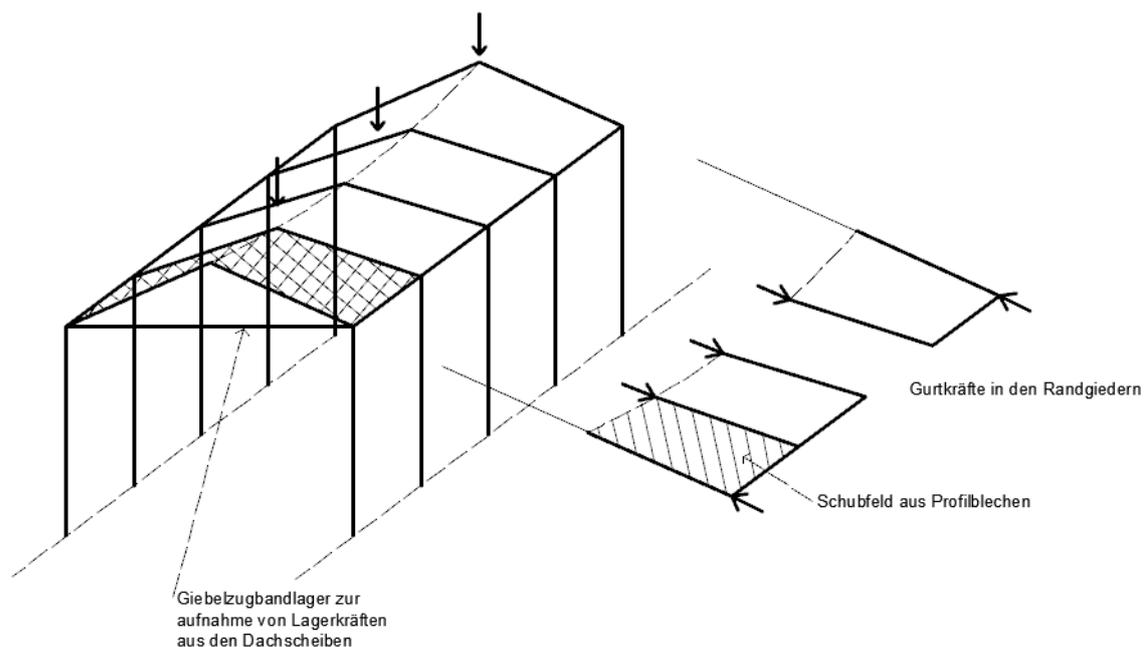


Abb.11: Scheibenwirkung bei einem Satteldach [2]

Die Dachneigung beeinflusst die Verformungen des Schubfeldes. Wenn die Dachneigung groß ist, sind die Deformationen auch größer als bei einem flacheren Dach. [12]

2.1.2 Modellierung des Schubfeldes

Das Modell eines Schubfeldes kann mit verschiedenen Modellierungstiefen hergestellt werden. Die Dach- oder Wandbekleidung reduziert die horizontale Verformung zwischen den Haupttrahmen, wie in **Abb.12.** a) zu sehen ist. Es bedeutet, dass die Rahmen mit dem Trapezblech und mit dem Sandwichpaneel zusammenwirken. Das einfachste System c) ist ein Ersatzmodell mit schubbelasteten Zwischenelementen. Es ist wichtig, dass die Kraftübertragung zwischen der Platte und Pfette nicht punktförmig erfolgt. Deshalb beschäftige ich mich in den folgenden Kapiteln mit den verschiedenen Anordnungen von Schrauben. Bei den Rahmenkonstruktionen kann sowohl das Dach als auch die Wand als Schubfeld funktionieren. Meistens wird Stahl verwendet werden, aber in Rücksicht auf die zulässigen Normen [2], [3] und die ergänzenden Empfehlungen [12] kann auch Aluminium verwendet werden, aber vor der Bemessung müssen noch Experimente gemacht werden, um die genaue Verhaltensweise zu verstehen. [3], [12]

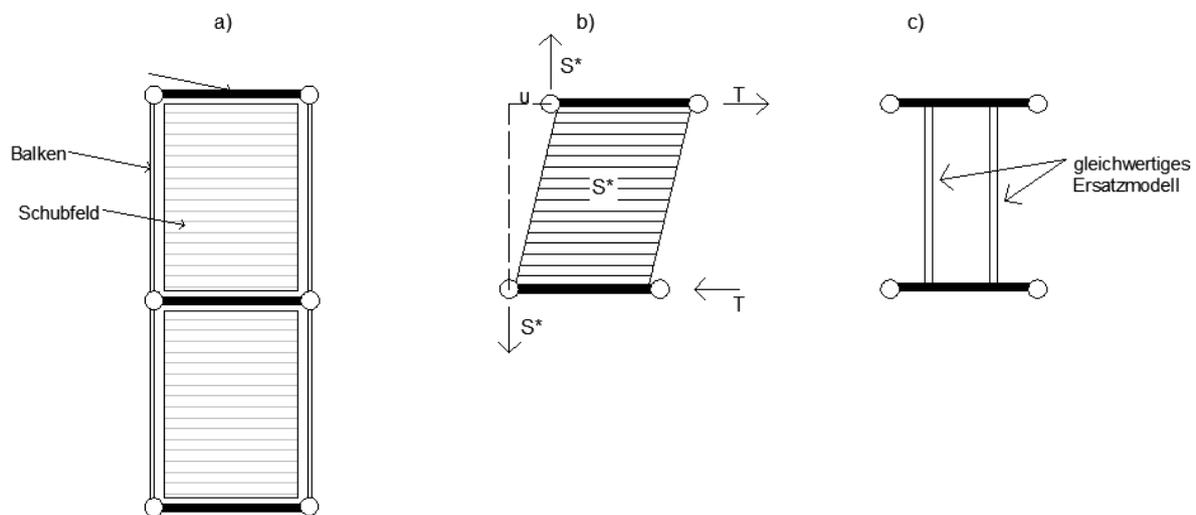


Abb.12: Modell des Schubfeldes bei verschiedenen Modellierungstiefen a) Schubfeld mit Abstandhalter b) Steifigkeit der schubbelasteten Platte c) gleichwertiges Ersatzmodell [41]

2.2 Stabilisierung biegedrillknickgefährdeter Träger

Die Dachbekleidung hat neben des Aussteifungseffekts eine große Auswirkung auf die Dachpfetten. Bei schlanken, kaltformten Querschnitten ist Biegedrillknicken der Hauptversagensfall. Dies bedeutet, dass die Querschnittsverformung aus zwei Teilen besteht.

Abb. 13. zeigt einerseits die Verschiebung, andererseits die Verdrehung. [16], [26]

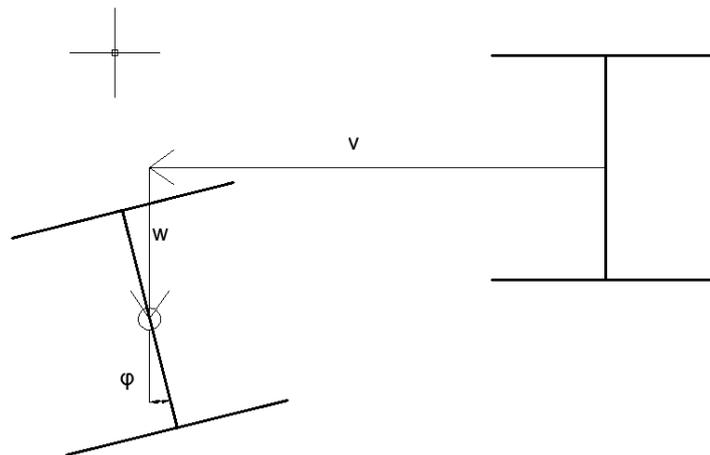


Abb.13: Biegedrillknicken

Bei diesen Elementen ist ein Stabilitätsnachweis erforderlich. In diese Kategorie fallen die Dachpfetten, Z-Profile und einfachsymmetrische Querschnitte. Bei schlanken biegeknick- oder biegedrillknickgefährdeten Bauteilen muss die kritische Last reduziert werden. Zur Stabilisierung dieser Bauteile werden häufig Schubfelder angeordnet. Die Ermittlung von Stabilisierungslasten erfolgt mit Näherungsverfahren. [16], [26]

Trapezbleche oder Sandwichpaneele werden an den Pfetten mit gewindefurchenden Schrauben, Blindnieten und Setzbolzen befestigt. Die Dachbekleidung funktioniert als eine Scheibe; der Versuch von *Kindmann und Krahwinkel* [13] hat die Theorie des Schubfeldes bereits bestätigt. Das Trapezblech behindert durch den Schubfluss die seitliche Verschiebung. Genaue Schubsteifigkeitswerte sind für eine sichere Bemessung erforderlich. Um Trapezbleche und Sandwichpaneele als Schubfeld bemessen zu können, muss die Schubsteifigkeit der Dachbekleidung bekannt sein. Im Spezialfall sollte man den Beitrag der Verbindungsmittel zwischen Pfette und Trapezblech berücksichtigen. Die Berechnungsformen und Beiwerte sind in Tabellen angegeben. [13], [16], [26]

Auch Sandwichpaneele können als Aussteifungselement in Betracht gezogen werden. Die Berechnung der Schubsteifigkeit, die die Pfetten stabilisiert, basiert auf großmaßstäblichen Versuchen, z.B. durch Versuchen mit Sandwichpaneelen von *Naujoks und Hörnel-Metzger* [14], [15]. Mit dem Thema „Sandwichpaneele als aussteifendes Schubfeld“ beschäftigt sich das Kapitel 3.3.

2.2.1 Stabilisierung durch das Schubfeld

Die Schubsteifigkeit des Trapezbleches S (1) ist gleich der Schubkraft F , die 1 Grad Schubwinkel (Verdrehung) γ ergibt, wie in **Abb.14.** zu erkennen ist. Diese Schubsteifigkeit charakterisiert das Trapezblech. [26]

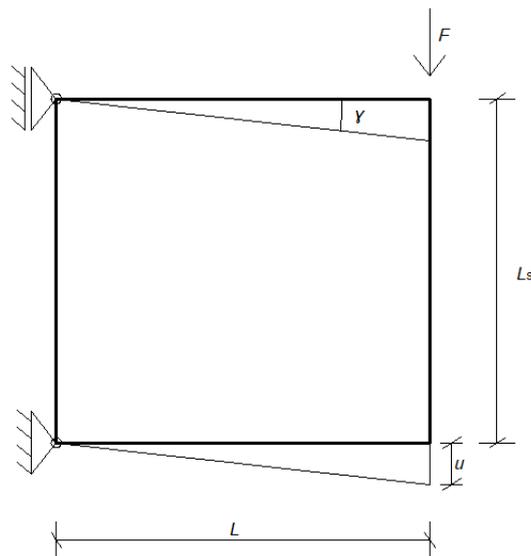


Abb.14: Definition der Schubsteifigkeit [26]

$$S = \frac{F}{u} \quad (1)$$

Dabei ist:

- S - Schubsteifigkeit [kN/mm]
- F - Schubkraft [kN]
- L - Länge der Querträger [mm]
- L_s - Stützweite der Trapezprofile [mm]
- u - Verschiebung [mm]
- γ - Schubwinkel [rad]

Dieser Wert, S ergibt die Steifigkeit des gesamten Trapezbleches. Meistens ist eine Profiltafel an mehreren Dachpfetten befestigt. So ist die Stabilisationssteifigkeit in einer Pfette S_i nach (2) berechenbar. [26]

$$S_i = \frac{S}{n} \quad (2)$$

Dabei ist:

- S - Schubsteifigkeit [kN/mm]
- S_i - Stabilisationssteifigkeit in einer Pfette [kN/mm]
- n - Anzahl der Pfetten [-]

Die Schubsteifigkeit S kann nach ECCS [3] oder mithilfe von Versuchsergebnissen berechnet werden. Mehrere wissenschaftliche Arbeiten, sowohl die Dissertation von *Seidel*: „Scheibentragverhalten von Trapezprofilen ohne Schubfeldausbildung“ [6] als auch die Dissertation von *Dürr*: „Die Stabilisierung biegedrillknickgefährdeter Träger durch Sandwichelemente und Trapezbleche“ [16] haben sich bereits mit der Analyse periodischer Falwerke beschäftigt. Mit den verschiedenen Berechnungsmethoden beschäftigt sich das Kapitel 3.9.

Nach EN 1993-1-1, Annex BB gibt es zwei Möglichkeiten den Aussteifungseffekt des Trapezbleches zu berücksichtigen. Wenn die Dachauskleidung mit der Unterkonstruktion entsprechend verbunden ist, kann man die Stabilisierung der Dachauskleidung gegen Biegedrillknicken verwenden. Wenn die Formel (3) nach EN 1993-1-1 [1] erfüllt ist, darf der Träger(Pfette) gegen horizontale Verschiebungen in der Ebene des Bleches als starr gelagert berücksichtigt werden. [2]

$$S > \left(E \cdot I_w \cdot \frac{\pi^2}{L^2} + G \cdot I_z \cdot \frac{\pi^2}{L^2} \cdot 0,25 \cdot h^2 \right) \cdot \frac{70}{h^2} \quad (3)$$

Dabei ist:

- S - Schubsteifigkeit der Pfette [kN/mm]
- I_w - Wölbflächenmoment der Pfette [cm⁶]
- I_z - Torsionsträgheitsmoment der Pfette [cm⁴]
- I_z - Flächenträgheitsmoment des Trägerquerschnitts um die schwache Achse [cm⁴]
- L - Länge der Pfette [cm]
- h - Höhe des Pfettenquerschnitts [cm]

Nach EN 1993-1-1, Annex BB kann auch die Drehverformung (4) in Betracht gezogen werden. Wenn das folgende Kriterium erfüllt wird, kann sich der Obergurt der Pfette nicht verdrehen. Mit diesem neuen statischen Modell ergibt sich eine viel größere kritische Last.

$$C_{\theta,k} > \frac{M_{pl,k}^2}{E \cdot I_z} \cdot K_{\theta} \cdot K_v \quad (4)$$

Dabei ist:

- $C_{\theta,k}$ - Verdrehsteifigkeit [kNm/m]
- K_v - =0,35 für elastische Berechnung [-]
- K_v - =1 für plastische Berechnung [-]
- K_{θ} - Faktor zur Berücksichtigung des Momentenverlaufs und der Art der Verdrehbarkeit des drehbehindert gestützten Trägers, **Anhang.A1**.
- $M_{pl,k}$ - plastische Momenten Tragfähigkeit des Trägers [kNm]

Abb.15. zeigt das statische Modell der Pfette mit Drehfederbettung nach EN 1993-1-3 und mit horizontaler Lagerung des Obergurtes durch das Blech.

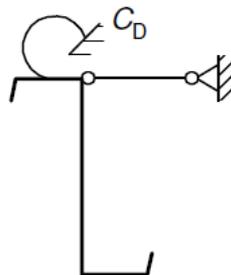


Abb.15: Pfettenmodell mit seitlicher Halterung und Drehfederbettung [2]

Ein auf dem Obergurt befestigtes Profilblech behindert die Verdrehung der Pfette. Der Aussteifungseffekt wird durch eine Drehfeder nach EN 1993 1-3 [2] ersetzt. Die Steifigkeit der Drehfederbettung (5) kann nach EN 1993 1-3 [2] berechnet werden. [2]

$$C_D = \frac{1}{(1/C_{D,A} + 1/C_{D,C})} \quad (5)$$

Dabei ist:

- C_D - Drehfedersteifigkeit [kNm/m]
- $C_{D,A}$ - Steifigkeit der Drehbettung der Verbindung zwischen Profilblech und Pfette [kNm/mm]

$C_{D,c}$ - Steifigkeit der Drehbettung entsprechend der Biegesteifigkeit des Profilbleches
 [kNm/mm]

Wenn die in (3) oder (4) genannten Voraussetzungen nicht erfüllt sind, kann die Stabilisierung der Pfetten nur teilweise berücksichtigt werden. Das kritische Knickmoment ist so auch größer und der Versagensfall erfolgt nur bei einer größeren Belastung. Der statische Nachweis erfolgt in diesem Fall nach EN 1993-1-3. **Abb.16.** zeigt das vereinfachte Pfettenmodell, wenn die Schubsteifigkeit des Bleches maßgebend ist. Die Drehfederbettung C_D kann mit einer äquivalenten Wegfeder der Steifigkeit K am Untergurt ersetzt werden, sehen Sie **Abb.16.** [2]

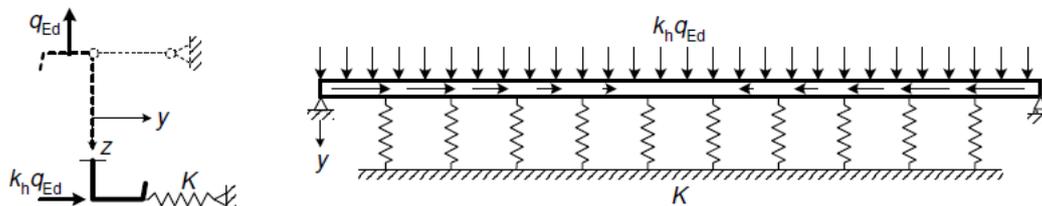


Abb.16: Pfettenmodell mit seitlicher Halterung und Drehfederbettung [2]

Mehrere Untersuchungen [17] und [18] zeigen, dass schon kleinere Steifigkeiten die Stabilisierung des Trägers aktivieren können. Dies bedeutet, dass viel kleinere Steifigkeiten die Tragfähigkeit sehr stark beeinflussen können. Es gibt eine Beschränkung der Schlankheit: nach [19] muss λ_M zwischen 0,4 und 1 liegen. Wenn die Steifigkeit des Profilbleches größer ist als ein bestimmter Grenzwert, kann der Träger ohne zusätzliche Drehbettung stabilisiert werden.

2.3 Sandwichpaneele als aussteifendes Schubfeld

Neben Profilblechen werden sehr oft Sandwichpaneele als selbsttragende Bauteile verwendet. Diese Elemente werden auf der Unterkonstruktion befestigt, meistens funktionieren sie hier auch als Mehrfeldträger. Ähnlich wie ein Trapezblech verfügt ein Sandwichpaneel auch über eine relativ hohe Schubsteifigkeit und kann als aussteifende Dach- oder Wandscheibe eingesetzt werden nach [26].

Die Berechnung der tatsächlichen Steifigkeit und der Tragfähigkeit erfolgt mit Näherungsverfahren und basiert auf Versuchen, z.B. die Publikation der *European Recommendations on the Stabilization of Steel Structures by Sandwich Panels* [26]. Diese Elemente (Sandwichpaneele) sind durch Verschraubung mit der Unterkonstruktion verbunden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens „SandSet – Sandwichelemente als selbsttragende Bauteile Paneele“

wurden von *Naujoks und Hörnel* [14] verschiedene Ausführungen untersucht. In einem Versuch wurde ein einzelnes 3m hohes Paneel belastet. Am Fuß wurde das Element befestigt, die Belastung über eine U-Schiene aus Stahl wurde am Kopf in horizontaler Richtung eingeleitet. Die Anordnung der Schrauben wurde variiert: die Ergebnisse zeigen, dass die Konzentration der Schrauben in den Ecken die Tragfähigkeit erhöht. Maßgebende Versagensfälle waren Knitterfalten im Bereich der Druckzone am Fußpunkt und die Bildung von Langlöchern in der Zugzone. [15]

Im rechten Eckpunkt der Paneele gibt es einen Drehpunkt P , um den sich das Sandwichpaneel verdrehen will, **Abb.17**. Das Schubfeld kann auch durch diesen Winkel unter einer gegebenen horizontalen Last definiert werden. Der P' Punkt (Momentnullpunkt) liegt auf der Schraubenachse. Die Deckbleche nehmen auch an der Lastabtragung (über Druck) teil, wenn die Paneele am Fuß befestigt sind. Die Schrauben nehmen durch Abscherung an der Lastabtragung teil. Abscherkräfte in den Schrauben V_i können aus den Verschiebungen und der Federsteifigkeit c_q der Schrauben ermittelt werden. *Naujoks und Hörnel* [15] haben eine einfache Berechnung vorgestellt, die mit einem Versuch verifiziert wurde. Die Berechnung erfolgt wie folgt [15]:

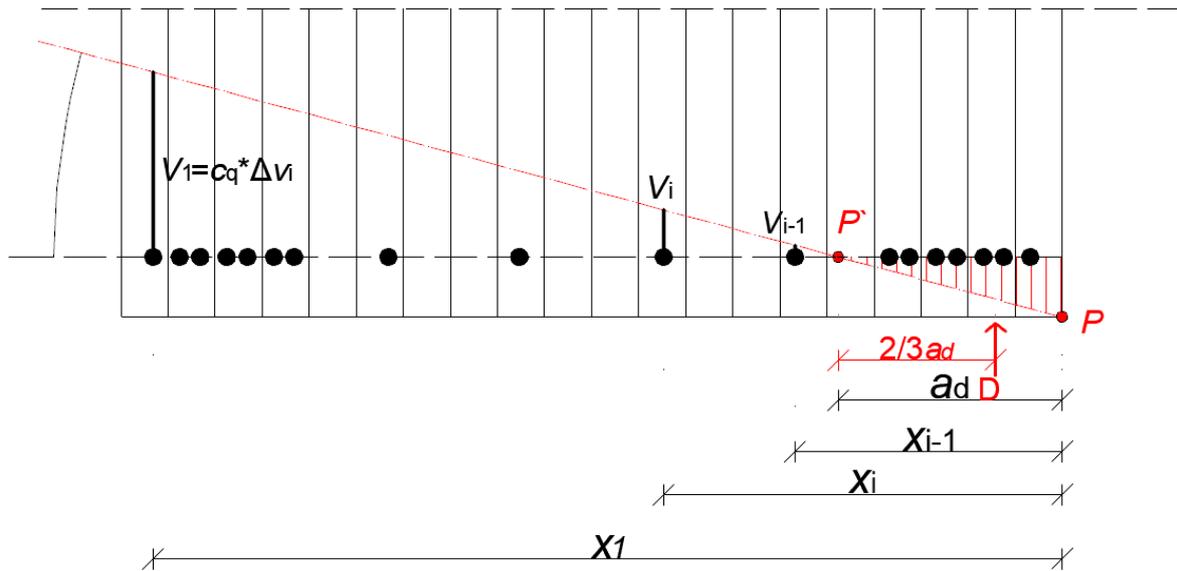
In jeder Reihe von Schrauben treten andere Kräfte auf. Diese Kräfte können mit Hilfe der Federsteifigkeit der Schrauben und mit der Verschiebung der untersuchten Schrauben nach (6) und (7) ermittelt werden, sehen Sie **Abb.17**. [15]

$$V_i = c_q \cdot \Delta v_i \quad (6)$$

$$\frac{V_1}{V_i} = \frac{x_1 - a_d}{x_i - a_d} \Rightarrow V_i = \frac{x_i - a_d}{x_1 - a_d} \cdot V_1 \quad (7)$$

Dabei ist:

- c_q - Federsteifigkeit der Schraubenverbindung [kN/mm]
- Δv_i - Verformung der Schraubenverbindung [mm]
- a_d - Druckzonenhöhe [mm] **Abb.17**.
- V_i - Abscherkräfte in den Schrauben [kN]
- V_1 - Abscherkraft in der 1. Schrauben [kN]
- x_i - Abstand der i Schraube von P Punkt [mm]


Abb.17: Kräfte in den Deckblechen [15]

In der rechten Zone, zwischen P' und P tritt die Druckkraft in den Deckblechen auf: hier sind die Deckschichten belastet und ihre Tragfähigkeit ist maßgebend. In einem Versuch von *Naujoks, Hörnel-Metzger* [14] wurde festgestellt, dass unabhängig von der Dicke der Schichten, die Knitterspannung bei jedem Blech erreicht wurde. Mit dieser Vereinfachung bekommt man nach (8) die Druckkraft in den Deckblechen. [15]

$$D = \frac{1}{2} \sigma_w \cdot (t_1 + t_2) \cdot a_d \quad (8)$$

Dabei ist:

- σ_w - minimale Knitterspannung [N/mm²]
- t_1, t_2 - Dicke der Deckbleche [mm]
- D - Druckkraft in den Deckblechen [N]
- a_d - Abstand der Drehmittelpunkt von Momentnullpunkt [mm]

Mit der einfachen Summierung der einzelnen Kräfte der Schrauben mit gegebenem Kraftarm und der Druckkraft ergibt sich die Summe des auftretenden Moments (9).

$$M^i = 2 \cdot \frac{V_1}{x_1 - a_d} \sum (x_i - a_d)^2 + \frac{1}{3} \sigma_w \cdot (t_1 + t_2) \cdot a_d^2 \quad (9)$$

Dieses innere Moment ist gleich mit dem äußeren Moment, so dass die folgende Gleichung gilt (10).

$$M^i = M^a = H \cdot h \quad (10)$$

Dabei ist:

- h - Abstand der Schrauben vom oberen Paneelrand [mm]
- H - Wandscheibentragfähigkeit [N]
- M^i, M^a - inneres und äußeres Moment [Nmm]

$$H = 2 \cdot \frac{V_i}{h \cdot (x_i - a_d)} \cdot \sum (x_i - a_d)^2 + \frac{1}{3} \cdot \frac{\sigma_w (t_1 + t_2) \cdot a_d^2}{h} \quad (11)$$

Dabei ist:

- V_i - Tragfähigkeit der Schraube auf Abscheren [N]
- a_d - Abstand der Drehmittelpunkt von Momentnullpunkt [mm]
- x_i - Abstand der i Schraube von P Punkt [mm]
- h - Abstand der Schrauben vom oberen Paneelrand [mm]
- t_1, t_2 - Dicke der Deckbleche [mm]
- H - Wandscheibentragfähigkeit [N]

Die gesuchte a_d (13) für den Verdrehungswinkel kann schon aus $\sum V = 0$, durch die Summierung der Schraubenkräfte (12) ermittelt werden. [15]

$$2 \cdot \sum V_i = D = \sigma_w \cdot (t_1 + t_2) \cdot \frac{a_d}{2} \quad (12)$$

$$a = \frac{4 \cdot \sum V_i}{\sigma_w \cdot (t_1 + t_2)} = \frac{4 \cdot V_1}{\sigma_w \cdot (t_1 + t_2) \cdot (x_1 - a_d)} \cdot \sum (x_i - a_d) \quad (13)$$

Dabei ist:

- V_i - Tragfähigkeit der i Schraube auf Abscheren [N]
- V_1 - Tragfähigkeit der 1 Schraube auf Abscheren [N]
- a_d - Abstand der Drehmittelpunkt von Momentnullpunkt [mm]
- x_i - Abstand der i Schraube von P Punkt [mm]
- h - Abstand der Schrauben vom oberen Paneelrand [mm]
- t_1, t_2 - Dicke der Deckbleche [mm]
- D - Druckkraft in den Deckblechen [N]

2.4 Anwendungsbereiche des „stressed skin design“

Es ist sinnvoll, den Effekt des Schubfeldes in folgenden Fällen in Betracht zu ziehen: [12]

- Für die Aufnahme und Weiterleitung der horizontalen Lasten z.B. Windlasten oder Bremskraft bei Kranbahnen. Schubfeld im Dach.
- Für die Weiterleitung der horizontalen Lasten vom Dach ins Fundament. Schubfeld in der Wand.
- Für die Aufnahme von vertikalen Lasten z.B. Schneelast bei einer Konstruktion mit Satteldach.
- Bei leichten Industriehallen mit Wandriegel, Dachpfetten und Gebäudeverkleidung.
- Stabilisierung schlanker biegeknick- oder biegedrillknickgefährdeter Bauteile.

Es ist nicht sinnvoll, den Effekt des Schubfeldes in Betracht zu ziehen, wenn das Folgende gilt: [12]

- Bei größeren Löchern, weil in diesen Fall die Scherkraftübertragung nicht gesichert ist. Am Rand des Loches entstehen Spannungsspitzen und die Kraftübertragung ist nicht gleichmäßig.
- Wenn eine spätere Erweiterung nicht ausgeschlossen werden kann. Ein Umbau kann das Tragsystem und die Kräfte sehr stark beeinflussen. In diesem Fall ist es vorteilhaft, biegesteife Rahmen zu planen.
- Bei größeren Temperaturbelastungen.

Für die Außenhaut muss das Folgende gelten:[3], [12]

- Die Anschlüsse müssen die Kräfte auf das Haupttragwerk weiterleiten.
- Das verwendete Material ist Stahl. Die Hauptaufgabe der Außenhaut ist die Begrenzung der horizontalen Verformungen und die Lasttragung in ihrer Ebene.
- Die Außenhaut muss primär auf Biegebeanspruchung nach EN 1993-1-1 bemessen werden. Die maximale Schubspannung ist 25% des Bemessungswertes der Fließgrenze.
- Die Verbindungen müssen steif und fest sein, um die Kräfte sicherlich weiterleiten zu können.
- Die Verschraubung erfolgt in jedem oder in jedem zweiten Wellental.
- Die Befestigung der nebeneinander liegenden Paneele muss nach den Vorschriften ausgeführt werden, d.h. mindestens alle 500mm muss befestigt werden.

- Bei der Nutzung von Trapezblech, Kassetten oder in manchen Fällen Sandwichpaneelen darf die maximale Blechstärke 1mm nicht übersteigen.
- Die Schubfeldkräfte müssen durch Windverbände auf den Untergrund abgeleitet werden.
- Schubfelder müssen wegen der Inanspruchnahmen mit Endpaneelen am Rand verstärkt werden. So kann die Querschnittstorsion beschränkt werden.

2.5 Verschiedene statische Systeme

2.5.1 Rahmenkonstruktion

Die einfachste Weise der Stabilisierung einer Halle ist es, Rahmen in Querrichtung zu verwenden. Der Rahmen kann unterschiedlich, abhängig von der Spannweite und der nationalen Planungspraxis, konstruiert werden. In Österreich wird meistens ein Rahmen mit gelenkigem Stützenfuß und mit biegesteifer Rahmenecke ausgeführt, sehen Sie **Abb.18**. Ein gelenkiger Anschluss ist kostengünstiger und er benötigt keine speziellen Maßnahmen während der Ausführung. Der Rahmen kann auch mit einem biegesteifen Stützenfuß ausgeführt werden. Dieser Typ wird bei einer großen Spannweite und bei kleiner Traufhöhe verwendet, sehen Sie **Abb.18**. a) und b). [3], [12]

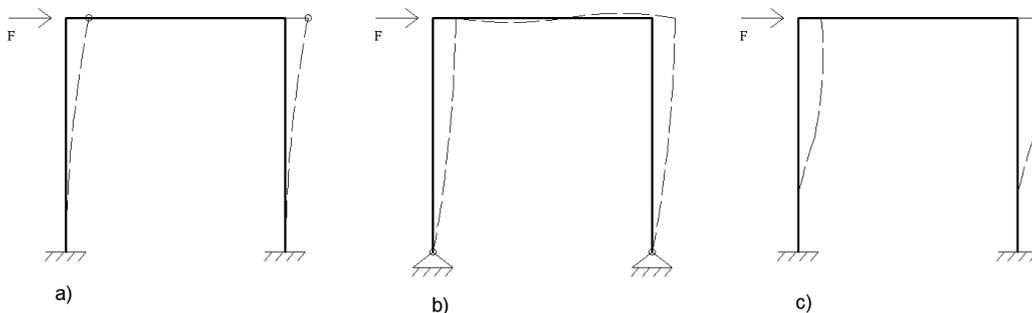


Abb.18: Aussteifung in der Rahmenebene [3]

Abb.19. zeigt die Interaktion zwischen Rahmen und Trapezblech. Trapezblech und Rahmen sind miteinander verbunden, weshalb die Verformungen gleich sind.

Die Verschiebung der Platte ist c unter der Schubkraft F . Hier ist die Steifigkeit S_c . Die Steifigkeit kann in diesem Fall nach (14) ermittelt werden. Die Rahmensteifigkeit kann man bei Rahmen ähnlich nach (14) bestimmen. Die horizontale Verformung unter 1kN Last ist k . Wenn die Steifigkeiten bekannt sind, können auch die Kräfte berechnet werden. [3], [12]

$$S_c = \frac{F}{c} \quad \text{und} \quad S_k = \frac{F}{k} \quad (14)$$

Dabei ist:

- F - Schubkraft [kN]
- S_c - Schubsteifigkeit des Bleches [kN/mm]
- S_k - Rahmensteifigkeit [kN/mm]
- c, k - Verschiebung [mm]

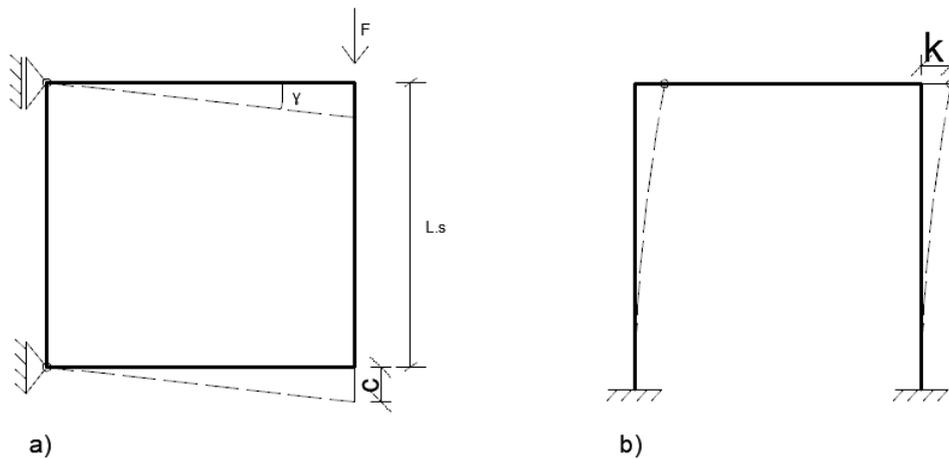


Abb.19: Interaktion zwischen den Steifigkeiten a) Trapezblech b) Rahmen [3]

2.5.2 Verbindung zwischen Dachbekleidung und Rahmen

Wegen der Schubsteifigkeit der Dachbekleidung sind die horizontalen Verformungen der Rahmen nicht so groß. In den Rahmenecken kann ein nachgiebiges Auflager mit geeignetem Widerstand parallel mit dem Rahmen eingesetzt werden. Wenn der Rahmen mit einer biegesteifen Rahmenecke und mit gelenkigem Stützenfuß ausgestattet ist, muss die aussteifende Wirkung der Rahmen in Querrichtung ebenfalls berücksichtigt werden. Der biegesteife Rahmen nimmt auch an der horizontalen Lastabtragung teil. Dies ist bei plastischen Berechnungen vorteilhaft. Die Interaktion zwischen Rahmen und Schubfeld zeigt **Abb.19**. [3]

Das Verfahren kann auch bei Konstruktionen mit Flachdach oder mit Satteldach verwendet werden. Diese einfache Berechnung kann genutzt werden, wenn die Rahmen gleich sind. [3]

Das Verhältnis zwischen Rahmen und Dach kann am besten mit der relativen Steifigkeit r nach (15) bezeichnet werden. Wenn die relative Steifigkeit r klein ist, hat die Dachbekleidung kleine aussteifende Wirkung. Wenn die relative Steifigkeit r groß ist, hat die Dachbekleidung große aussteifende Wirkung. [3]

$$r = \frac{S_c}{S_k} \quad (15)$$

Dabei ist:

- r - relative Steifigkeit [-]
- S_c - Steifigkeit des Daches [mm/kN]
- S_k - Steifigkeit des Rahmens [mm/kN]

Die Steifigkeit der Anschlüsse beeinflusst die Verformung der Konstruktion stark. Die Schubsteifigkeit des Daches kann sehr leicht in einem FE-Modell berechnet werden. Die gesamte Konstruktion hat aussteifende Wirkung, deshalb beinhaltet die Endverformung sowohl die Steifigkeit des Rahmens als auch die Steifigkeit des Daches. Man muss die verschiedenen Steifigkeiten (Rahmen, Windverbände) aus der gesamten Steifigkeit abziehen und das Ergebnis ist die Steifigkeit der Dachbekleidung. [5], [3]

Um diese positive Wirkung zu berücksichtigen, wird ein Reduktionsfaktor η nach ECCS verwendet, **Anhang.A2**. (ECCS Annex C.3: Tabelle.7.1). Der Reduktionsfaktor hängt von der Anzahl der Rahmen und von der relativen Nachgiebigkeit ab. ECCS [3] gibt es eine Tabelle für verschiedene Rahmenkonstruktionen. Die Größe der Reduktion ist nicht gleich bei äußeren oder inneren Rahmen nicht gleich. Bei einer inneren Profiltafel ist der Reduktionsfaktor größer. So kann die Schubkraft im Trapezblech und die horizontale Verformung des Rahmens nach Formel (16) reduziert werden. Der Biegemoment des Rahmens kann auch reduziert werden. Hier muss man das Tragwerksmodell auf zwei Teile aufteilen: unverschiebliche und verschiebliche Rahmen. Das Biegemoment des Trägers mit Dachbekleidung kann folgendermaßen berechnet werden: Das Biegemoment des unverschieblichen Rahmens und das Biegemoment des verschieblichen Rahmens multipliziert mit dem Reduktionsfaktor η . Versuche von Höglund [12] zeigen, dass die Rahmennachgiebigkeit größer ist als die Nachgiebigkeit der Bleche. [3]

$$\Delta_{\text{red}} = F \cdot S_k \cdot \eta \quad (16)$$

Dabei ist:

- Δ_{red} - reduzierte horizontale Verformung des Rahmens [mm]
- F - horizontale Belastung des Rahmens [kN]
- S_k - Nachgiebigkeit des Rahmens in Querrichtung [mm/kN]
- η - Reduktionsfaktor, **Anhang.A2**.

2.6 Verschiedene Ausführungen, konstruktive Einzelheiten, Detailausbildungen

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit verschiedenen konstruktiven Einzelheiten und Detailausbildungen. Um die Wirkung des Schubfeldes zu berücksichtigen, muss das Tragwerk verschiedene Vorschriften erfüllen. Sehr strenge Voraussetzungen [3] regulieren die Befestigungsstellen, die Anzahl der Schrauben, Randausbildungen und Überlappungen.

2.6.1 Befestigung des Trapezbleches

Es gibt zwei Methoden für die Befestigung des Trapezbleches:

- Direkte Befestigung auf den Tragbalken, siehe **Abb.20**.
- Befestigung auf den, in Längsrichtung ausgerichteten, Z-Pfetten, siehe **Abb.21**.

Die Befestigung des Trapezbleches kann in unterschiedlicher Weise ausgeführt werden. Die Ausgestaltung hat Auswirkung auf die Effektivität und auf den Grad der Zusammenarbeit. In Längsrichtung kann die Konstruktion mit oder ohne Dachpfetten gestaltet werden. [3]

Der maximale Abstand zwischen den Auflagern beeinflusst die Tragrichtung des Trapezbleches. Wenn das Trapezblech direkt auf den Rahmen befestigt ist, ist die Tragrichtung senkrecht auf den Rahmen, **Abb.20**. Schubfelder funktionieren als ein I-Stabquerschnitt mit sehr hohem Flansch. Die Rahmenecken sind in Längsrichtung mit Balken verbunden. Der Schubfluss ist gleichmäßig in Querrichtung und die Normalkraft tritt nur in den Randbalken auf. In Europa werden manchmal keine Randbalken verwendet, hier wird das Moment durch die Dachpfetten oder durch den Schubfluss der Dachbekleidung aufgenommen. [3], [12]

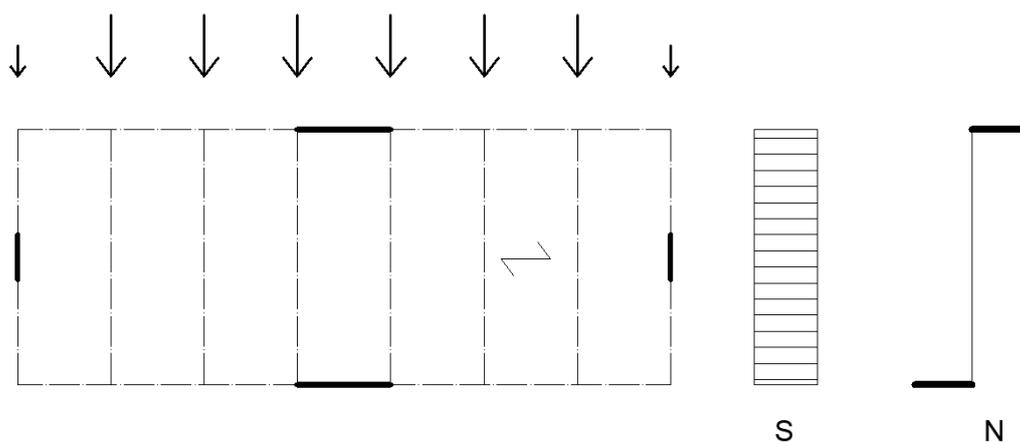


Abb.20: Trapezblech direkt auf den Balken, Schubfluss und Normalkraft in Längsrichtung [12]

Die andere Befestigungsmöglichkeit besteht in der Nutzung von Dachpfetten in Längsrichtung. **Abb.21.** zeigt den Grundriss und die Windverbände. Das Gebäude fungiert in Querrichtung als ein langer gelenkiger Balken. Die Knicklänge des Balkens ist gleich der Hallenlänge. Der Rahmen am Rand hat keine Verformung in Querrichtung aufgrund der Wandverbände. Der Momenten- und Querkraftverlauf ist ähnlich einem Zweifeldträger. So sind die Kräfte kleiner und nicht nur die Randbalken arbeiten, sondern auch die Z-Pfetten. [12]

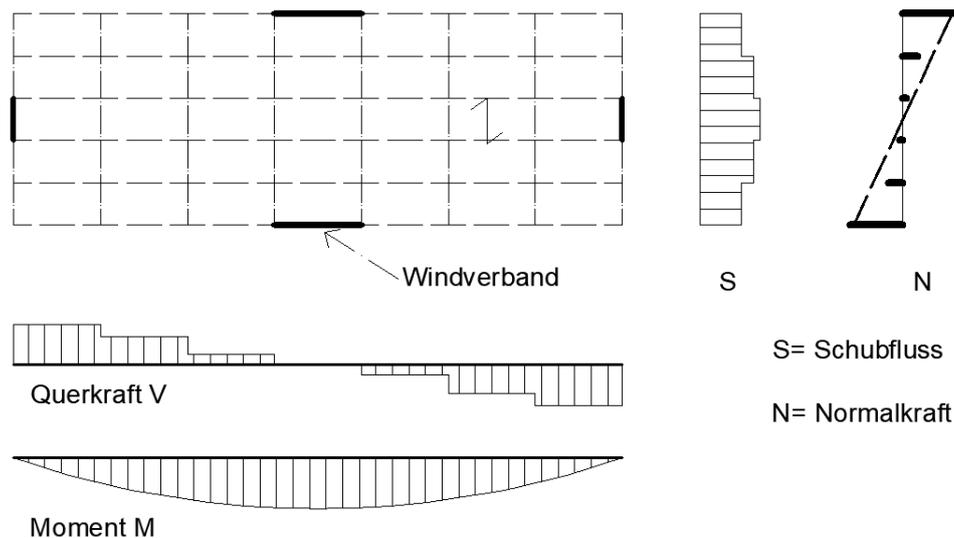


Abb.21: Trapezblech auf Dachpfetten, Tragrichtung parallel zu den Rahmen [12]

Das Biegemoment wird durch die Pfetten getragen. Die äußeren zwei Reihen der Pfetten tragen den größten Anteil der Lasten (Normalkraft). Der Schubfluss ist nicht gleichmäßig: im Mittelfeld ist er größer.

2.6.2 Ausgestaltung der Endverstärkung des Trapezbleches und ihre Wirkung

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf Profilblechen. Es gibt zwei Möglichkeiten, die Endverstärkung und Befestigung des Trapezbleches auszuführen. Wenn die Schubkräfte groß sind, wird die Endbefestigung des Trapezbleches nach ECCS [3] und nach Höglund [12] vorgeschlagen, **Abb.22.** Dadurch wird sich der Schubfluss verändern, die äußeren Zonen nehmen auch Teil an der Lasttragung.

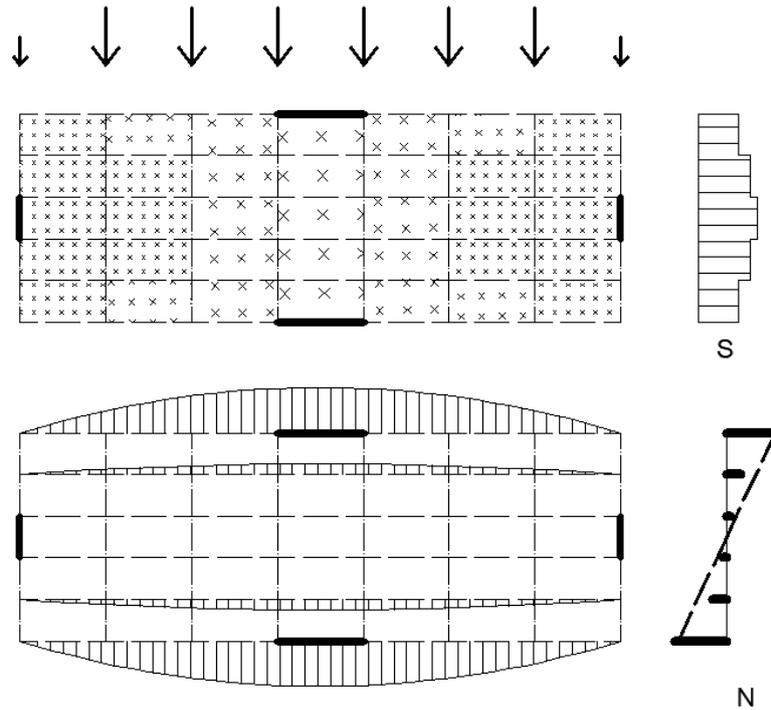


Abb.22: Schubfluss und Normalkraft in Pfetten mit Trapezblech Endbefestigung [12]

Der Schubfluss kommt aus dem obersten Teil des Profilbleches und wird durch die Schraubverbindung auf die Endverstärkung weitergeleitet. Der Rahmenbalken kann die Lasten durch den Stützen weiterleiten. Die Blechdicke muss wegen des Beulens mindestens 0,5mm nach Höglund [12] betragen. In diesem Fall ist der Schubfluss gleichmäßiger und der größte Teil der Normalkraft und das Biegemoment werden durch die Randpfetten aufgenommen. [12]

Die Randbefestigung des Bleches ist auch im Firstbereich sehr wichtig. Normalweise werden nur die Untergurte der Bleche verbunden.

Wenn eine echte Randbefestigung nötig ist, wird ein Blech auf den Profilblechen befestigt, **Abb.23.** [12]

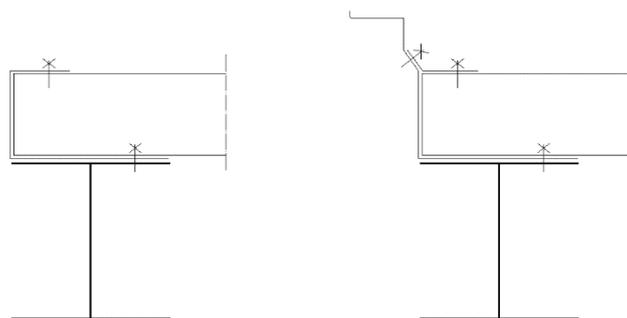


Abb.23: Endbefestigungsmöglichkeiten [12]

Ohne Befestigung des Randes des Trapezbleches gibt es in den äußeren Zonen einen viel kleineren Schubfluss, wie in **Abb.24.** zu erkennen ist. Dies gilt wegen der Torsion des Trapezbleches. [3], [12]

Am Rand funktioniert das Trapezblech als ein dünnes Blech ohne Aussteifung. **Abb.25.** zeigt den verformten Querschnitt. Ohne Endbefestigung nehmen schon die zwei äußeren Pfetten Teil an der Lasttragung.

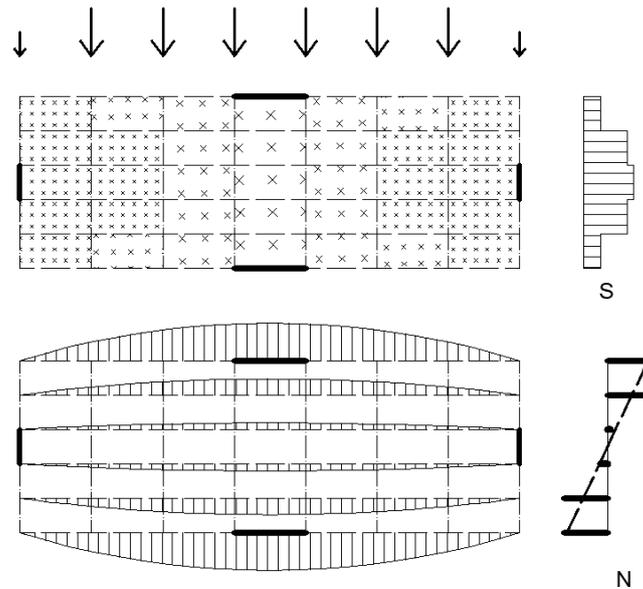


Abb.24: Schubfluss und Normkraft in Pfetten ohne Trapezblech-Endbefestigung [12]



Abb.25: Verformung des Querschnitts [12]

2.6.3 Öffnungen

Die Öffnungen beeinflussen den Schubfluss stark. Bei der Verwendung des „stressed skin design“ werden nur kleinere Öffnungen nach ECCS [3] und nach Höglund [12] vorgeschlagen. Wenn der Öffnungsanteil nur 3% beträgt, kann die Methode nach ECCS [3] ohne Einschränkungen verwendet werden.

Bei diskreten Öffnungen kann die vorteilhafte Wirkung des Schubfeldes ausgenutzt werden, aber man muss bei der Planung die Steifigkeiten modifizieren. Die Öffnungen können sowohl mit einer ergänzenden Tragkonstruktion als auch mit einer freien Ausgestaltung ausgeführt werden.

Freie Öffnungen beeinflussen die Spannungen am Rand des Trapezbleches sehr stark. Die Verformungen sind in diesem Fall sehr groß. Mögliche Beschädigungen sind wie folgt: Beulen und Querschnitttorsion. Nach ECCS [3] kann man bei freien Öffnungen das Schubfeld nicht berücksichtigen.

Bei Industriebauten wird eine ergänzende Konstruktion zwischen den Rahmenbalken am häufigsten eingebaut. Diese Elemente verändern auch die Verteilung der Steifigkeiten. Dies muss bei der Bemessung auch berücksichtigt werden. Dieses Verfahren wird bei Dachoberlichtern, Fensterbändern am Dach oder an der Wand verwendet. Alle vier Seiten des freien Profilbleches werden an einem Hohlprofil befestigt. Am Rand des Trapezbleches entstehen Spannungsspitzen und wie bei Randbalken ist eine Endverstärkung des obersten Teils des Querschnitts sinnvoll. So kann die Torsion der Profile vermieden werden. Auf beiden Seiten der Öffnung wird das Trapezblech zweilagig gelegt. [3], [12]

Weitere Vorschriften nach ECCS [3] und nach Höglund [12] müssen beachtet werden, wenn das Trapezblech mit Öffnungen auch als Schubfeld verwendet werden soll. Der Lochanteil darf maximal 12% des Panels betragen. Die Länge der Öffnung darf maximal 25% der gesamten Länge des Panels betragen. In jedem Wellental muss das Trapezblech befestigt werden. Die maximale Reduktion der Steifigkeit ist 50%.

Mit einem Modifikationsbeiwert nach ECCS [3] kann die Wirkung der Öffnungen betrachtet werden. Mit diesem Faktor c_{mod} (17) ergibt sich eine größere Nachgiebigkeit. Diese bedeutet größere Verformungen, so dass die Konstruktion nicht so steif ist. [3], [12]

$$c_{\text{mod}} = \frac{1}{1 - 2,5 \cdot \left(\frac{h}{50}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{A_d}{b \cdot l}\right)} \quad (17)$$

Dabei ist:

- h - Höhe des Trapezbleches [mm]
- A_d - Größe der Öffnung [cm²]
- b, l - Breite und Länge des Trapezbleches [mm]

Bei sehr kleinen Öffnungen, z.B. bei einem Regenablauf, ist die Verstärkung nicht nötig. In diesem Fall wird ein dünnes Blech auf das Trapezblech gelegt. Eine Welle des Trapezbleches muss am Rand allerdings überlappt werden. [3], [12]

2.7 Verbindungsmittel

In jeder oder in jeder zweiten Welle muss das Trapezblech nach ECCS [3] befestigt werden. Die Verschraubung erfolgt im Wellental oder mit längeren Kalotten auf der Hochsicke. Bei der Befestigung auf der Hochsicke muss eine entsprechende Wasserabdichtung angebracht werden. Im statischen Nachweis muss man die Kriterien nach EN 1993 1-3 [2] überprüfen, um die Schraubenzahl und Schraubenart zu ermitteln. Die Schrauben werden auf Schub, Zug und Druck beansprucht. Es wird vorgeschlagen das Trapezblech in jedem Wellental zu befestigen [3], [12]. Wenn nur in jedem zweiten Wellental die Verschraubung ausgeführt wird, kann sich eine Welle frei verformen. Bei der Planung muss auch der minimale Abstand und der Randabstand nach ECCS eingehalten werden. ECCS [3] schlägt einen minimalen Abstand von 10mm oder 1,5·Durchmesser, z.B. bei Pfetten-Blech Verbindungsmitteln vor. Der Randabstand ist 30mm oder 3·Durchmesser.

Hier können auch die in Kapitel 2.2.3 genannten Verbindungsmittel verwendet werden. Am häufigsten werden gewindefurchende Schrauben, Setzbolzen oder Blindnieten verwendet. Die Auswahl der Schrauben erfolgt mithilfe der Berücksichtigung der Blechdicke und der Unterkonstruktionsdicke. Bei Industriehallen ist die Temperaturbelastung in manchen Fällen beträchtlich, hier muss der Anschluss entsprechende Verformungen aufnehmen können. Die Bemessung erfolgt über die tabellarische Angabe der Beanspruchbarkeit der Verbindungsmittel nach EN 1993 1-3 [2], (**Anhang.A3.** gewindefurchende Schrauben) und **Anhang.A4.** Bei dünnwandigen Profilen wurden diese Daten durch Versuche ermittelt. [3], [6]

Die Komponenten werden gemeinsam bemessen. **Abb.26.** zeigt mögliche Versagensfälle: bei den Überlappungen bildet sich ein Langloch im Trapezblech. Für alle Verbindungsmittel wird eine Mindestduktilität vorgeschrieben. Dies bedeutet, dass zuerst Verformungen auftreten, bevor das Verbindungsmittel zerstört wird. Die Verformung hat aber auch eine obere Grenze bevor die Versagenslast erreicht wurde. [3], [6], [12]

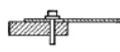
Belastungsart	Versagendes Teil		
	Bauteil I	Verbindungselement	Bauteil II
Querbelastung	 Langloch im Bauteil I	 Bruch des Verbindungselementes	 Langloch im Bauteil II Starke Schrägstellung des Verbindungselementes Lockern oder Lösen der Verankerung des Verbindungselementes
Zugbelastung	 Ausreißen, Ausstarzen des Bauteils I Überziehen des Bauteils I	 Bruch des Verbindungselementes	 Auszug des Verbindungselementes

Abb.26: mögliche Versagensfälle [20]

Diese Formel kann auch bei der Randbefestigung der Bleche verwendet werden, aber mit zweimal so viel Schrauben. Die Schubkraft tritt im Flansch auf.

$$c_n = \frac{F_{S,Rd}}{V_{Sd}} \quad (18)$$

Dabei ist:

- V_{Sd} - Schubkraft [kN]
- $F_{S,Rd}$ - Grenzlochleibungskraft der Schraube [kN]
- c_n - nötige Schraubenanzahl [-]

EN 1993-1-3 [2] enthält die Formel für die Berechnung der Grenzlochleibungskraft der Schraube. Der Widerstand ist abhängig von dem Verhältnis zwischen Blechdicke und Schraubendurchmesser. ECCS schlägt ein anderes Berechnungsmodell vor. Der Sicherheitsfaktor nach ECCS [3] ist, wegen der großen Anzahl der Verbindungsmittel, kleiner. Bei einer Überlappung sind die verbundenen Bleche genau so dick, aber bei einem Anschluss von Pfetten und Trapezblech ist die Pfette schon 2,5-mal so dick.

Bei einer Pfetten-Trapezblech Verbindung treten die folgenden Beanspruchungen auf: Scherkraft in Richtung der Pfette und senkrecht sowie Zugkraft in den Schrauben. Bei den axialen Lasten im Verbindungsmittel sind Ausreißen und Durchknöpfen die möglichen Versagensfälle. Im Falle einer kombinierten Beanspruchung müssen die Interaktionsgleichungen erfüllt werden. Die Grenzzugkraft für Durchknöpfen hängt stark von der Geometrie ab, wie in **Abb.28.** zu erkennen ist. [2]

Wenn die Verschraubung nicht im Mittelpunkt des Wellentals ist, darf nur 90% des Widerstands betrachtet werden. Bei größeren Profilen mit zwei Schrauben im Wellental kann man pro Verbindungsmittel nur 70% des Widerstandes berücksichtigen.

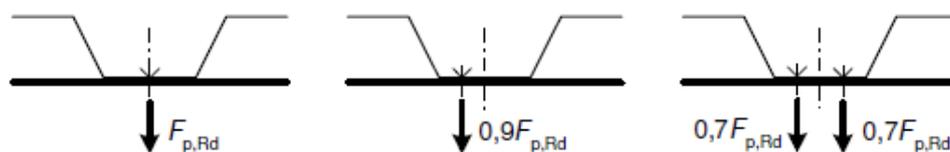


Abb.28: Reduktion der Grenzzugkraft für Durchknöpfen bei verschiedenen Verschraubungsmöglichkeiten [2]

2.8 Mögliche Versagensfälle

Die möglichen Versagensfälle sind die folgenden: (**Abb.30.**) [3]

- a Abscheren der Platte entlang der überlappenden Schrauben
- b Abscheren der Platte entlang der Schrauben zwischen Trapezblech/Abscherungselementen
- c, d Abscheren der Platte entlang der Schrauben zwischen Trapezblech und Pfetten
- e Torsion des Querschnitts am Rand des Trapezbleches
- f Beulen des Trapezbleches wegen Schubkraft
- g Versagen der Randelemente auf Druck und Zug
- h Profiltorsion (Verschraubung in jedem Wellental)
- i Profiltorsion (Verschraubung in jedem zweiten Wellental)
- j Scherkraft in der Platte in Längsrichtung
- k Pfetten/Balken Anschluss

Die häufigsten Versagensfälle sind a) und b), **Abb.30**.

Die gesamte Nachgiebigkeit einer Profiltafel ist die Summe der einzelnen Nachgiebigkeitskomponenten. Globales und lokales Beulen des Trapezbleches ist am häufigsten maßgebend. Lokales Beulen tritt im Flansch oder im Unter- oder Obergurt auf. Globales Beulen bedeutet ein Versagensfall im globalen Bereich, d.h. dass das gesamte Blech versagt. [3]

Die Interaktion der globalen und lokalen Beulen kann vermieden werden, wenn die Vorschrift (19) nach [3] erfüllt ist. Die Formel zeigt auch, dass Beulen von der Blechdicke, den Materialeigenschaften und von der Länge der Profiltafel nach [3] abhängt.

$$\frac{l}{t} \leq 2,9 \cdot \left(\frac{E}{f_y} \right)^{0,5} \quad (19)$$

Dabei ist:

- l - Länge des Profiltafels [mm]
- t - Blechdicke [mm]
- E - Elastizitätsmodul [N/mm²]
- f_y - Streckgrenze [N/mm²]

Wenn die Vorschrift (19) nicht erfüllt ist, muss der Grenzwert der Beulsteifigkeit nach [3] reduziert werden. Die Reduzierung erfolgt mit den lokalen und globalen Beulwiderständen. Die reduzierte Beulsteifigkeit V_{red} (20) muss größer sein als die Schubtragfähigkeit des Blechs. Der Bemessungswert der lokalen Beulen tritt im Untergurt auf, mit Sicken kann ein erhöhter Widerstand erreicht werden. [3], [12]

$$V_{\text{red}} = \frac{V_g \cdot V_1}{V_g + V_1} > V^\circ \quad (20)$$

Dabei ist:

- V_{red} - reduzierte Beulsteifigkeit [kN]
- V_g - Bemessungswert der globalen Beulen [kN]
- V_1 - Bemessungswert der lokalen Beulen [kN]
- V° - Bemessungswert der Schubfeldtragfähigkeit [kN]

Der Schubfluss im Blech erzeugt Normalkräfte im Steg. Diese Kraft muss der Steg aufnehmen und an die Unterkonstruktion weiterleiten. So treten im Steg neben den Auflagerkräften auch weitere Beanspruchungen auf. Der Schubfluss erzeugt auch eine Auflagerkraft. **Abb.29.** zeigt eine Periode des Trapezbleches mit dem Schubfluss und die Auflagerkräfte aus der Stegbelastung. [21]

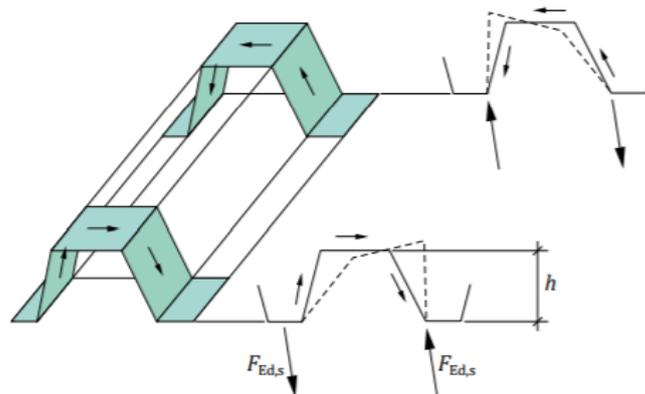


Abb.29: Stegbelastung und Auflagerkraft [21]

Die zusätzlichen Auflagerkräfte müssen mit den Auflagerkräften aus der Biegebeanspruchung addiert werden, nach EN 1993 1-3 [2]. Der Nachweis erfolgt nach (21). Im Steg kann sowohl Zugkraft als auch Druckkraft auftreten. [21], [2]

$$R_{z,d} + F_{Ed,S} < \frac{R_{w,RkA}}{\gamma_{M1}} \quad \text{Dabei: } F_{Ed,S} = K_3 \cdot T_d \quad (21)$$

Dabei ist:

- $R_{z,d}$ - Auflagerkraft aus Biegebeanspruchung [kN]
- $F_{Ed,S}$ - zusätzliche Stegbeanspruchung [kN]
- $R_{w,RkA}$ - zulässige Auflagerkraft [kN]

- γ_{M1} - Teilsicherheitsbeiwert [-]
- T_d - Schubfluss infolge der Einwirkungen in GZT [kN/m]
- K_3 - Schubfeldwert [3] [-]

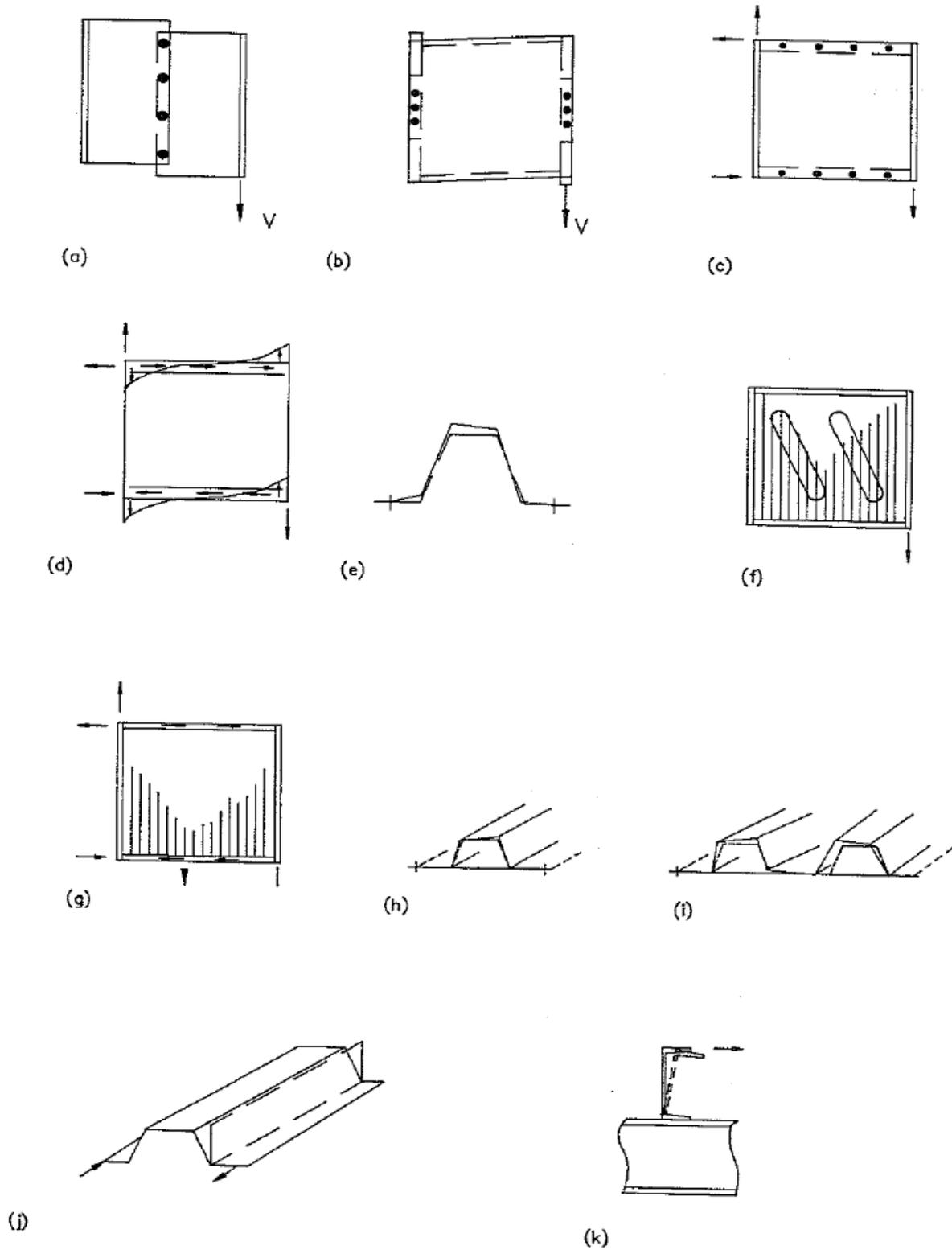


Abb.30: mögliche Versagensfälle [3]

2.9 Berechnung der Steifigkeit

Mehrere Publikationen [3], [22], [23], [24], [25] haben sich mit der Berechnung der Steifigkeit bei leichten Stahlbaukonstruktionen beschäftigt. Die Quellen zeigen verschiedene Berechnungsformen für die Berücksichtigung des Schubfeldes auf.

2.9.1 Berechnung nach Steinhardt/Einsfeld

Der erste Berechnungsvorschlag für das Schubfeld erstellten 1970 *Steinhardt und Einsfeld* [22]. Schon zu jener Zeit wurden verschiedene Trapezbleche, sowie periodische Faltwerke bei Industriebauten eingesetzt. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der von *Steinhardt und Einsfeld* [22] ausgearbeiteten Methode. Sie haben erkannt, dass die Bleche nicht nur als eine Platte funktionieren, sondern auch als eine Scheibe. Die Schubkraft kann vom Trapezblech getragen werden. [22]

Die Autoren haben außerdem verschiedene Voraussetzungen für die Anwendung erstellt. Sie haben mehrere rechnerische und experimentelle Versuche durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt konnten sie nur die erste Generation der dünnwandigen Profile verwenden. Sie haben erkannt, dass man die Ausgestaltung der Anschlüsse und genaue Ausführung betrachten muss. Deshalb haben sie einige Voraussetzungen erstellt. Das Trapezblech muss mit der Unterkonstruktion sehr gut verbunden sein. Das Trapezblech muss in jedem Untergurt an die Pfetten geschraubt werden und bei den Überlappungen müssen die zwei Profiltafeln in einem gegebenen Abstand miteinander verbunden werden. Wenn diese Voraussetzungen erfüllt sind, kann die Dachbekleidung als ein Schubfeld modelliert werden und als aussteifendes Konstruktionselement in Betracht gezogen werden. [6], [22]

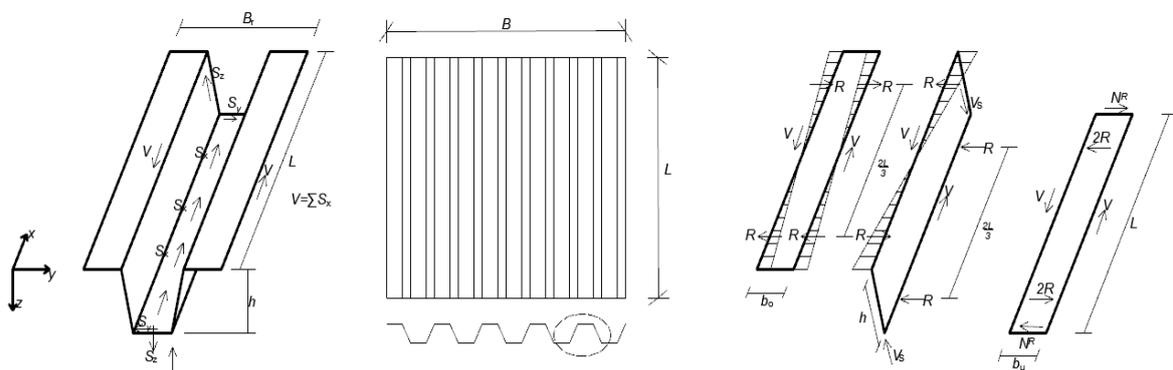


Abb.31: a) Periodenelement des Trapezbleches b) Schnittgrößen bei Einheiten [22]

Abb.31. a) zeigt das untersuchte Periodenelement der Breite B_R unter den antisymmetrischen Belastungen. Unter der Schublast V kann das Trapezblech modelliert werden.

Im Wellental erfolgt die Verschraubung. Hier wird die Schubkraft in Längsrichtung oder in Querrichtung an die Pfetten abgetragen. Die Autoren, *Steinhardt und Einsfeld* [22] haben dieses Periodenelement in drei Teile (Obergurt, Untergurt, Steg) aufgeteilt; diese sind in **Abb.31.** b) zu sehen. Die Einheiten wurden separat voneinander untersucht. Ober- und Untergurt sind nur in ihrer Ebene belastet, aber im Steg treten die Reaktionskräfte von Gurten als Plattenbeanspruchung auf. [6], [22]

Nach *Steinhardt und Einsfeld* [22] kann festgestellt werden, dass die Schubverformung im Vergleich kleiner ist als die Verformungen aus Torsion und Biegung in Querrichtung. Ein Versagen tritt im Steg oder im Obergurt auf, deshalb können die Beanspruchungen im Untergurt vernachlässigt werden. Untergurte haben in ihrer Ebene eine deutliche Aussteifung, die Pfetten. [22]

Die Autoren haben ein Stück einer Rippe mit einer Länge von dx untersucht, **Abb.32.** Die $P(x)$ Belastung (22) erzeugt Biegung in der Rippe, dieser Momentverlauf ist linear. Das Moment für das Periodenelement kann nach (23) ermittelt werden. Mithilfe dieser Kenntnisse kann die Formel der Verschiebung v in Querrichtung (24) aufgeschrieben werden. [6], [22]

$$P(x) = \frac{1}{2} \cdot b_o \cdot \frac{\delta T}{\delta x} \quad (22)$$

Dabei ist:

- b_o - Breite des Obergurtes [mm]
- $\frac{\delta T}{\delta x}$ - Ableitung des Schubflussverlaufes in der Rippe nach der Koordinate z
- h - Höhe des Trapezbleches [mm]
- $P(x)$ - Belastung im Untergurt [N/mm]

$$M_y = \frac{1}{2} \cdot b_o \cdot h \cdot \frac{\delta T}{\delta x} dx \quad (23)$$

$$v = \left(\frac{h^2}{3} + \frac{b_o \cdot h}{6} \right) \cdot \frac{M_y}{E \cdot I} = \frac{2 \cdot b_o \cdot h^3 + b_o^2 \cdot h^2}{12 \cdot E \cdot I} \cdot \frac{\delta T}{\delta x} dx \quad (24)$$

Dabei ist:

- I - Flächenträgheitsmoment des Trapezbleches [cm⁴]
- M_y - Moment um y-Achse [Nmm]
- v - Verschiebung in Querrichtung [mm]

Demnach haben *Steinhardt und Einsfeld* die innere Arbeit (25) der dx Länge Rippe mit Vereinfachungen aufgeschrieben. Die folgenden Vereinfachungen gelten nach [22]: Der Schubfluss ist im Obergurt parabolisch, die Biegung in der Querschnittsebene und der Schubfluss ist konstant im Untergurt und im Steg. Die Biegung des Untergurtes bei den Schrauben kann vernachlässigt werden. [6], [22]

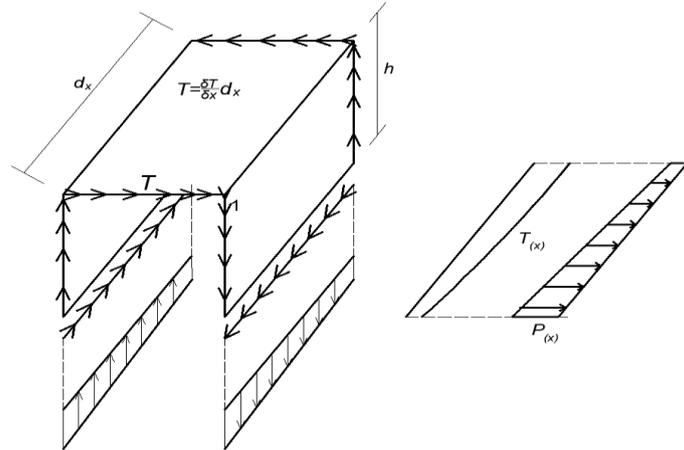


Abb.32: Periodenelement des Trapezbleches und Schnittgrößen bei Einheiten [22]

$$dA_i = \frac{1}{2} \cdot \left(b_o \cdot \frac{\delta T}{\delta x} dx \right) \cdot v \quad (25)$$

Dabei ist:

- A_i - Länge des Periodenelementes [mm]
- v - Verschiebung in Querrichtung [mm]

Maximaler Schubverlauf kann nach (26) aus der mittleren Schubfluss ermittelt werden.

$$\frac{\delta T}{\delta x} = \frac{8 \cdot T_{\max}}{L^2} \cdot \left(\frac{L}{2} - x \right) \quad T_{\max} = \frac{3}{2} \cdot T_{\text{mittel}} \quad (26)$$

Dabei ist:

- L - innere virtuelle Arbeit [Nmm]
- T_{\max} - maximaler Schubverlauf infolge des linearen Moments [kN/m]
- T_{mittel} - mittlerer Schubfluss im Obergurt [kN/m]

Mit der Gleichheit der inneren und äußeren virtuellen Arbeit (27) haben sie die folgende Formel (28) entwickelt. G^* ist der „Scheibenmodul“.

$$A_a = \frac{1}{2} \cdot T_{\text{mittel}} \cdot L \cdot u \quad (27)$$

$$G^* = \frac{1}{\left(\frac{1,2 \cdot b_0 + 2 \cdot h \cdot b_u}{G \cdot t \cdot B_R}\right) + \left(\frac{12 \cdot h^2 \cdot b_0^2 \cdot (2 \cdot h + b_0)}{E \cdot t^3 \cdot L^2 \cdot B_R}\right)} \quad (28)$$

Dabei ist:

- G^* - Scheibenmodul des Schubfeldes [kN/m²]
- A_a - äußere virtuelle Arbeit [Nmm]
- u - Verschiebung [mm]
- t - Blechdicke des Trapezbleches [mm]
- h - Höhe des Trapezbleches [mm]
- b_0 - Breite des Obergurtes [mm]
- b_u - Breite des Untergurtes [mm]
- L - Länge des Trapezbleches [mm]
- G - Schubsteifigkeitsmodul vom Trapezblech [kN/m²]
- B_R - Breite einer Profilperiode [mm]

Diese Berechnungsmethode [22] könnte ganz genaue Ergebnisse für die derzeit hergestellten Profile liefern. Das Verfahren basiert auf den oben genannten Vereinfachungen, aber später wurden neue Profile hergestellt. Die zweite und dritte Generation der Trapezbleche erfüllen die früheren Voraussetzungen nicht. Die Verstärkung des freien Bleches mit Sicken wegen Beulen modifiziert die Beanspruchungsverteilung und die Versagensfälle. Das Verfahren kann aber zur Verifikation oder zum Vergleich verwendet werden. [6], [22]

2.9.2 Berechnungsmethode nach *Schardt/Strehl*

Schardt und Strehl [23] haben die Methode nach *Steinhardt/Einsfeld* [22] weiterentwickelt. Sie haben mehrere Untersuchungen und Probelastungen [23] durchgeführt und eine andere Berechnungsmethode erstellt. *Strehl* hat periodisch aufgebaute Falterwerkschnitte unter Schubbelastung in seiner Dissertation [24] erforscht.

Strehl postulierte die folgenden Voraussetzungen [24]: Die Gurte müssen parallel zueinander liegen. Die maximale Schubfeldlänge ist beschränkt auf eine maximale Länge von $4 \cdot B$. Das Trapezblech muss allseitig an der Unterkonstruktion befestigt werden. Die Anzahl der Perioden ist so groß, dass Störungen des Verbindungsmittels am Längsrand im mittleren Bereich abgeklungen sind. Die Randkraft in Querrichtung R_Q ist in der Mitte des Bleches fast konstant. Deshalb ist die minimale Schubfeldlänge auch beschränkt. **Abb.33.** zeigt das Trapezblech, die Schubbelastung und die Randkräfte; hierbei ist das Blech auf einem Viereckenrahmen befestigt. Die Befestigungspunkte dürfen sich nicht verschieben und die Verdrehung ist auch beschränkt. Wenn die Voraussetzungen erfüllt sind, kann eine Periode getrennt modelliert werden. Die Schubkräfte sind am Rand einer Periode antimetrisch zu der Querrichtung. Ober- und Untergurt funktionieren als Symmetrieachse für die Konstruktion und als Antimetrieachse für die Belastung. [6], [24]

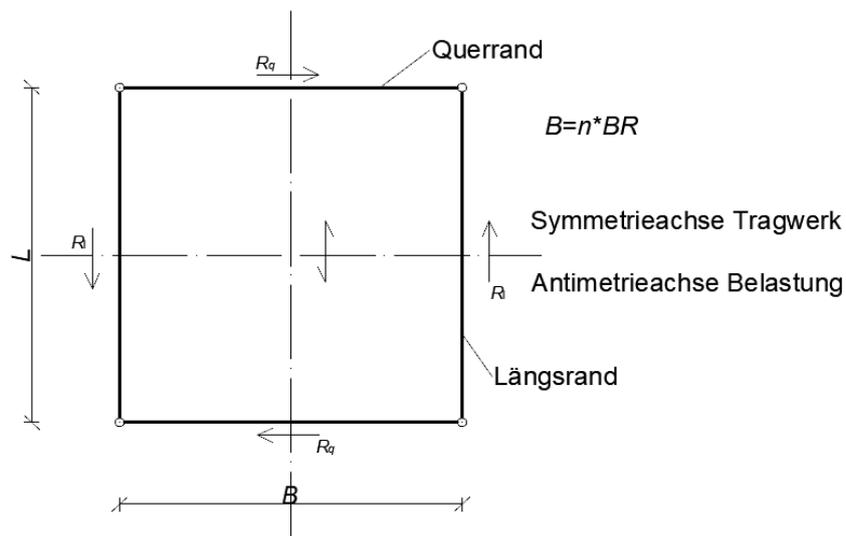


Abb.33: Trapezblech und die Randkräfte [24]

So kann das Trapezblech als eine halbe Periode modelliert werden, (**Abb.34.**) Eine Periode besteht aus mehreren Scheiben (Unter- und Obergurt, Steg), (**Abb.34.**) Mit den folgenden Randbedingungen kann das wirkliche Verhalten des Profilbleches simuliert werden. Der Untergurt kann nicht in Richtung z verschoben werden, hier wurde stattdessen eine Auflagerung

eingesetzt. Die Normalkraft innerhalb der Bleche und das Querbiegemoment sind auch null. [6], [24]

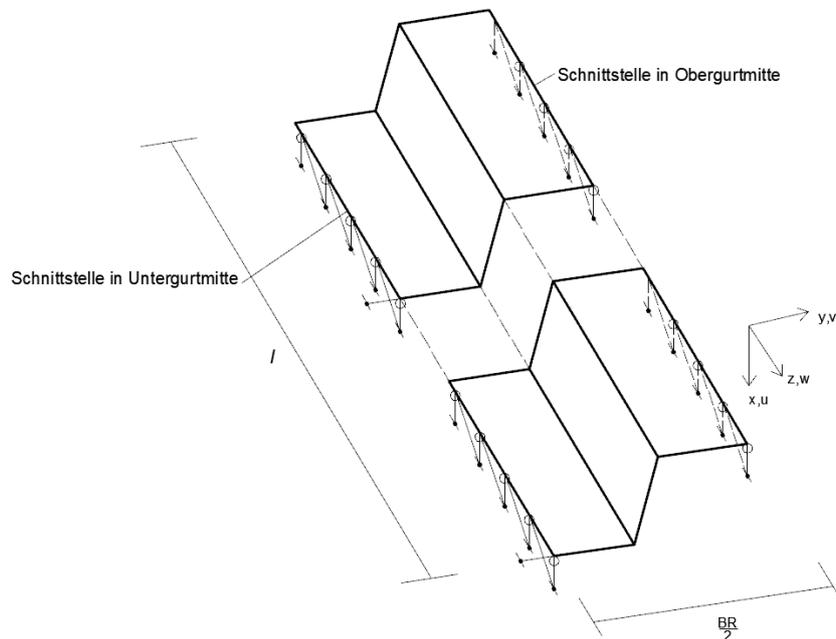


Abb.34: Berechnungsmodell mit Randbedingungen [24]

Die Belastung erfolgt an den zwei Randpunkten des Untergurts, weshalb hier Auflager in Richtung y eingesetzt werden müssen. Die Schubflussverteilung ist nicht bekannt, aber man kann auch ein Kräftepaar definieren. Mit der Annahme eines mittleren Schubflusses T_m nach *Strehl* [24] ist die Berechnung einfacher. Aus dem Momentgleichgewicht (29) um Punkt O kann die Kraft am Rand des Trapezbleches berechnet werden nach (30). Weiterhin wird die halbe Periode mit K_{T_m} Kräftepaar belastet. Diese Vereinfachung gilt nach *Strehl* [24]:

$$K_{T_m} \cdot l - T_m \cdot l \cdot \frac{BR}{2} = 0 \quad (29)$$

Es soll gelten:

$$T_M = \frac{1}{l} \cdot \int_0^l T(z) dz. \quad (29)$$

Dabei ist:

- $T(z)$ - Schubflussverlauf [kN/m]
- l - Länge des Trapezbleches [mm]
- BR - Wellenlänge [mm]

T_m - mittlerer Schubfluss [kN/m]

$$K_{Tm} = T_m \cdot \frac{BR}{2} \quad (30)$$

Dabei ist:

BR - Wellenlänge [mm]

K_{Tm} - Schraubenkraft an der Lasteinleitungsstelle infolge T_m [kN]

Das Drillmoment und das Biegemoment können vernachlässigt werden, weil die Dicke des Bleches viel kleiner als die Länge oder Breite ist. *Strehl* hat in seiner Dissertation [24] verschiedene Untersuchungen zu diesem Thema gemacht und er setzt den Einfluss auf 3%. **Abb.35.** zeigt die Schnittgrößen an der Scheibe. [6], [24]

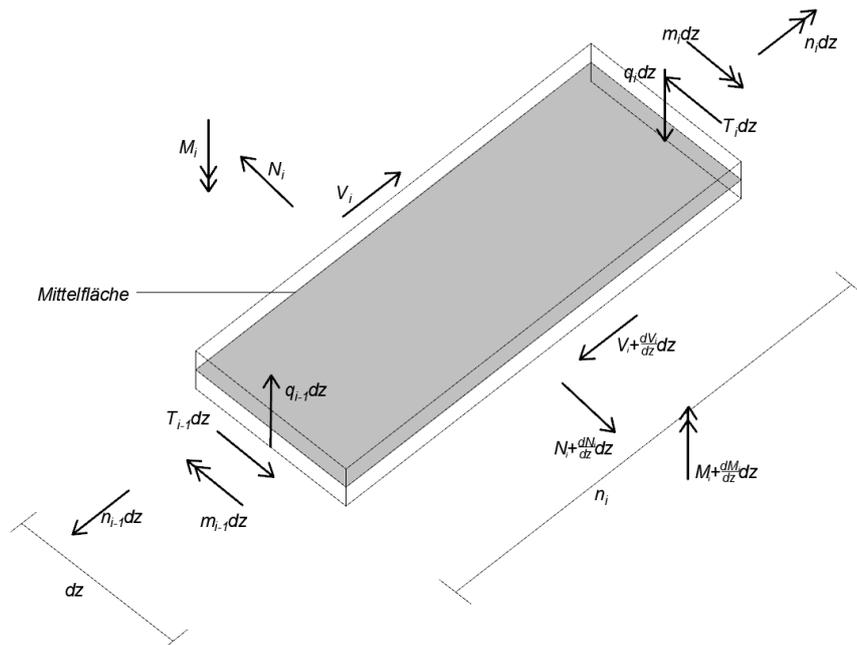


Abb.35: Schnittgrößen an der Scheibe [24]

Mit den Gleichgewichtsbedingungen, erkennbar aus der Beziehung zwischen den Schnitt- und Verformungsgrößen, kann das Differentialgleichungssystem aufgestellt werden. Das Differentialgleichungssystem kann mit der Wölbordinaten gezeichnet werden. Mithilfe des Differentialgleichungssystems und der Randbedingungen kann die Verformung der Scheibe γ bestimmt werden. [6], [24]

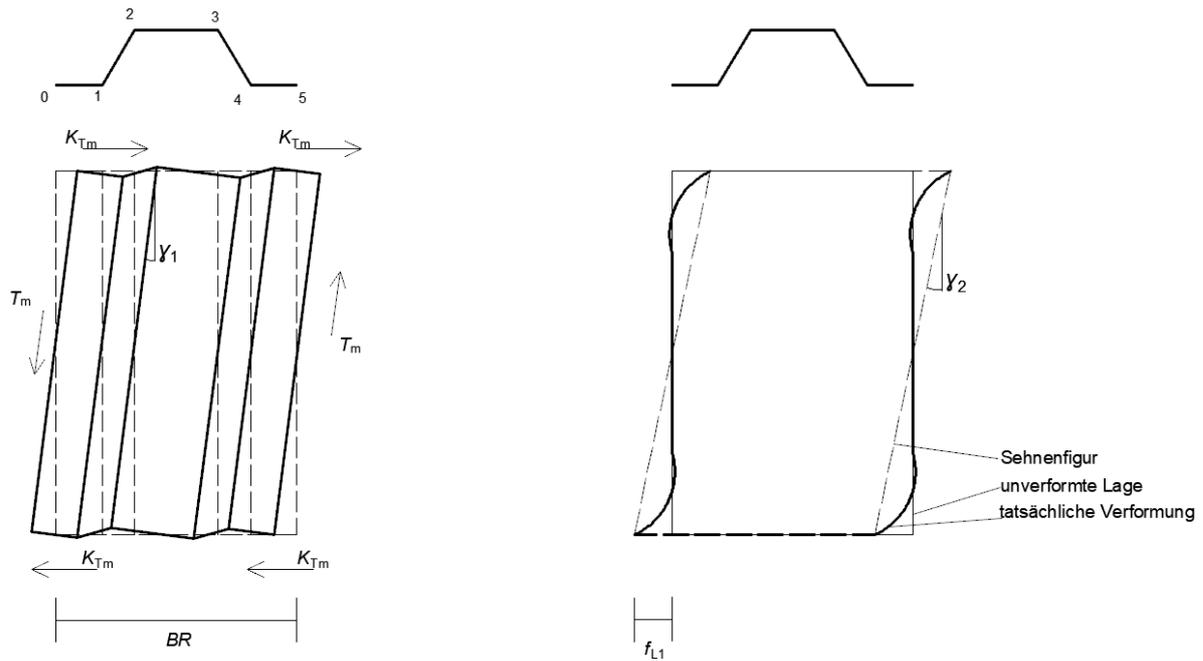


Abb.36: a) Verformungsbild ohne Querschnittsverformung b) Verformung aus Querbiegung [24]

Die gesamte Verformung beinhaltet zwei Verformungsanteile. **Abb.36.** a) zeigt das Verformungsbild und den γ_1 Schubwinkel (31). Die Schubverzerrung wird im ersten Fall vernachlässigt, sie hat nur eine kleine Wirkung auf das Trapezblech. Die Belastung ist ein konstanter Schubfluss T_m . Der Querschnitt deformiert sich entlang seiner Länge nicht, die einzelne Verformung ist eine Verdrehung, γ_1 . [6], [24]

$$\gamma_1 = \frac{T_m}{G \cdot t} \cdot \frac{2 \cdot (h_1 + h_2 + h_3)}{BR} \quad (31)$$

Dabei ist:

- G - Schubsteifigkeitsmodul vom Trapezblech [kN/m²]
- h_1 - Höhe des Trapezbleches [mm]
- T_m - mittlerer Schubfluss [kN/m]
- t - Dicke des Trapezbleches [mm]
- BR - Wellenlänge [mm]
- γ_1 - Verformung ohne Querschnittsverformung [deg]

Mit dieser Formel kann die Verformung einer Periode berechnet werden. Am Dach sind mehrere Profiltafeln aneinander befestigt, dadurch sind die Störungen am Rand noch kleiner. Der γ_1 Wert

zieht den Faktor des Aussteifungseffekts nicht in Betracht. Die horizontale Verformung ist im Mittelfeld des Bleches gleich null. **Abb.36. b)** zeigt das Verhalten.

Der Rand der Profile verformt sich wegen der Querbiegungen. Für das Schubfeld wird diese Verformung mit γ_2 bezeichnet nach (32). Die Schubsteifigkeit ist die Summe der Einzelwinkel nach (33).

$$\gamma_2 = 2 \cdot \frac{f_{L1}}{L} \quad (32)$$

Dabei ist:

- f_{L1} - Scheibenverschiebung infolge T_m [mm]
- L - Länge des Trapezbleches [mm]
- γ_2 - Verformung aus Querbiegung [deg]

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 \quad (33)$$

Dabei ist:

- γ - Schubsteifigkeit

Strehl hat in seiner Dissertation [24] mehrere Versuche durchgeführt und die Ergebnisse zeigen, dass die Methode nicht für jedes Profil passt. Deshalb hat er Randbedingungen (Befestigungsarten) definiert, damit die in der Realität auftretenden Wirkungen berücksichtigt werden können. Das Trapezblech wird oft auf einer Unterlage mit Unterlegscheibe befestigt, die Verschiebung der Randpunkte ist viel kleiner. Im Grenzzustand der Tragfähigkeit muss die folgende Vorschrift (34) erfüllt werden. [24]

$$T_d < \frac{T_{1,Rk}}{\gamma_{M1}} \quad (34)$$

Dabei ist:

- T_d - Schubfluss infolge der Einwirkungen [kN/m]
- $T_{1,Rk}$ - char. Schubflussbeanspruchbarkeit [kN/m]
- γ_{M1} - Teilsicherheitsbeiwert [-]

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit müssen nach *Steinhardt* [22] drei Begrenzungskriterien sowie drei zulässige Schubflüsse (zul. T_1 , zul. T_2 , zul. T_3) eingehalten werden.

Der Schubfluss zul. T_1 beinhaltet ein Spannungskriterium aus dem Querbiegemoment, aber diese Begrenzung wird oft vernachlässigt. [24] Die anderen zwei Kriterien stellte Strehl mit den Schubflussbegrenzungen nach (35) und (36) auf.

$$T_d < \frac{T_{2,Rk,N}}{\gamma_{Mser}} \quad (35)$$

$$T_d < \frac{T_{3,Rk}}{\gamma_{Mser}} \quad (36)$$

Dabei ist:

- $T_{2,Rk,N}$ - Grenzscherfluss zur Einhaltung der Relativverschiebung $h/20$ bei Normalbefestigung [kN/m]
- $T_{3,Rk}$ - Grenzscherfluss zur Einhaltung des Gleitwinkels $1/750$ [kN/m]
- T_d - Schubfluss infolge der Einwirkungen [kN/m]
- γ_{Mser} - Teilsicherheitsbeiwert [-]

Die Berechnungsmethode nach *Schardt und Strehl* [23] war die Grundlage der deutschen Norm (DIN 18807).

2.9.3 Berechnungsmethode nach Bryan/Davies

Die Berechnungsmethode nach *Bryan/Davies* basiert auf großmaßstäblichen Untersuchungen von *Bryan* [27], *Davies* [28] und *Baehre* [29]. Diese Methode zieht auch die Verformungen des Trapezbleches und die verschiedene Nachgiebigkeit der Schrauben mit ein. Im Jahr 1977 hat mit Hilfe der gewonnenen Ergebnisse die Europäische Konvention für Stahlbau die „European Recommendations for the Stressed Skin Design of Steel Structures“ [3], auch „ECCS“ genannt, herausgegeben. Die ECCS [3] beinhaltet auch praktische Tabellen für die Bemessung. EN 1993-1-3 verweist zur Bemessung auf die ECCS-Richtlinie 088. [6]

Es kann festgestellt werden, dass die European Convention for Constructional Steelwork [3] eine Berechnung nur für einfache, industrielle Gebäude mit niedriger Sicherheit vorschlägt. Ich zeige in diesem Kapitel die Berechnung nach ECCS [3] auf, diese Verfahren basiert auf den Untersuchungen von *Bryan* [27], *Davies* [28] und *Baehre* [29]. [6]

Die Steifigkeit der Dachbekleidung ist gleich mit der einzelnen Steifigkeit der folgenden Elemente: Profilblech, Pfette, Verbindungsmittel. Die ECCS [3] gibt als Parameter nicht die Steifigkeit, sondern die Nachgiebigkeit an. Der Kehrwert der Steifigkeit wird Nachgiebigkeit genannt. Die Maßeinheit der Schubsteifigkeit ist [kN/mm] und die der Nachgiebigkeit [mm/kN]. [5]

Die Schubsteifigkeit des Schubfeldes kann durch mehrere Steifigkeits-Komponenten bestimmt werden. Das Trapezblech, die Schrauben, die Pfetten und die konstruktive Ausgestaltung beeinflussen das Ergebnis stark. Ich zeige hier die Berechnungsmethode nur für die Ausgestaltung nach **Abb.27**.

Der wichtigste Parameter ist der $c_{1.1}$ (37) Parameter, die Nachgiebigkeit aus der Verformung des Trapezbleches. Mehrere Berechnungen [5], [6], [39] zeigen, dass dieser Faktor das Ergebnis am meisten beeinflusst. Jedes Element der Außenhaut deformiert sich und man kann diesen Effekt nur mit der Verschraubung in jedem Wellental reduzieren.

Das Trapezblech hat die größte Steifigkeit. $c_{1.1}$ hängt von den folgenden Faktoren ab:

- Geometrie des Trapezbleches
- Blechdicke
- Abstand der Verbindungsmittel
- Anzahl der Pfetten
- Anzahl der Paneele

$$c_{1.1} = \frac{a \cdot d^{2,5} \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_4 \cdot K_1}{E \cdot t^{2,5} \cdot b^2} \quad (37)$$

Dabei ist:

- | | | |
|------------|---|---|
| a | - | Schubfeldbreite [mm] |
| d | - | Wellenlänge [mm] |
| α_1 | - | Koeffizient für Berücksichtigung der Pfettenanzahl [-], Tabelle 5.4 ECCS [3] |
| α_4 | - | Koeffizient für Berücksichtigung der Pfettenanzahl [-], Tabelle 5.4 ECCS [3] |
| t | - | Kernblechdicke des Profils [mm] |
| b | - | Länge der Pfette [mm] |
| K_1 | - | Profilkonstante in Abhängigkeit der Querrandbefestigung [-], Tabelle 5.6 und 5.7 ECCS [3] |
| E | - | Elastizitätsmodul [kN/mm ²] |
| $c_{1.1}$ | - | Nachgiebigkeit aus der Verformung des Trapezbleches [mm/kN] |

Die Verformung aus Schubverzerrungen der ebenen Querschnittsteile kann mit der Formel $c_{1.2}$ (38) berechnet werden. $c_{1.2}$ hängt von den folgenden Parametern ab:

- Blechdicke

- Geometrie des Trapezbleches
- Rahmenabstand

$$c_{1.2} = \frac{2 \cdot a \cdot (1 + \nu) \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot h}{d}\right)}{E \cdot t \cdot b} \quad (38)$$

Dabei ist:

- h - Profilhöhe [mm]
- ν - Querdehnzahl [-]
- $c_{1.2}$ - Nachgiebigkeit aus Schubverzerrungen der ebenen Querschnittsteile [mm/kN]

Die Verformung aus Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel zwischen Trapezblech und Pfetten kann mithilfe des Koeffizienten $c_{2.1}$ (39) berücksichtigt werden. Die beeinflussenden Faktoren sind die folgenden:

- Abstand der Querrandverbindungsmittel
- Nachgiebigkeit der Befestigungen

$$c_{2.1} = \frac{2 \cdot a \cdot s_p \cdot p}{b^2} \quad (39)$$

Dabei ist:

- s_p - Nachgiebigkeit der Befestigungen (Blech/Pfette) [mm/kN]
- p - Abstand der Querrandverbindungsmittel (mm)
- $c_{2.1}$ - Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel zwischen Trapezblech und Pfetten [mm/kN]

Die Verformung aus Nachgiebigkeit des Verbindungsmittels am Längsstoß kann mit $c_{2.2}$ (40) berechnet werden. Die Verschraubung erfolgt in diesem Fall meistens auf der Hochsicke. Die Einflussparameter sind hier:

- Anzahl der Schrauben
- Bewegungen an den Verbindungsmitteln mit der Pfette

$$c_{2.2} = \frac{2 \cdot s_s \cdot s_p \cdot (n_{\text{sin}} - 1)}{2 \cdot n_s \cdot s_p + \beta_1 \cdot s_s \cdot n_p} \quad (40)$$

Dabei ist:

- s_s - Nachgiebigkeit der Befestigungen am Profilstoß [mm/kN]
- n_{sin} - Anzahl der nebeneinanderliegenden Profiltafeln

- n_s - Anzahl der Verbindungsmittel im Längsstoß
- β_1 - Beiwert zum Herstellen der Kompatibilität zw. Längsstoßverschiebung an den Verbindungsmitteln mit der Pfette [-], Tabelle 5.2 ECCS [3]
- n_p - Anzahl der Querunterstützungen bzw. Pfetten
- $c_{2.2}$ - Nachgiebigkeit des Verbindungsmittels am Längsstoß [mm/kN]

Die Verformung aus Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel am Längsrand kann mit $c_{2.3}$ (41) berechnet werden. Es gibt einen Unterschied zwischen den Befestigungsformen, wenn jede Seite des Trapezbleches befestigt ist, ergibt sich eine größere Steifigkeit. Die Einflussparameter hier sind wie folgt:

- Anzahl der Schrauben
- Nachgiebigkeit der Befestigungen aus ECCS [3]

$$c_{2.3} = \frac{2}{n_p} \cdot \left(s_{pr} + \frac{s_p}{\beta_2} \right) \quad (41)$$

Dabei ist:

- s_{pr} - Nachgiebigkeit der Befestigungen (Pfetten/Rahmen) [mm/kN]
- $c_{2.3}$ - Nachgiebigkeit des Verbindungsmittels am Längsrand [mm/kN]

Die Nachgiebigkeit der axialen Inanspruchnahmen kann mithilfe des Koeffizienten c_3 (42) in Betracht gezogen werden. Es handelt sich dabei um eine Biegung in der Pfette, aber als Annäherung können wir diese mit der Nachgiebigkeit berechnen.

Die Einflussparameter sind:

- Länge der Pfetten
- Querschnittswerte der Pfetten

$$c_3 = \frac{2 \cdot a^3}{3 \cdot E \cdot A \cdot b^2} \quad (42)$$

Dabei ist:

- A - Querschnittsfläche der Querträger [mm²]
- c_3 - Nachgiebigkeit der axialen Inanspruchnahmen [mm/kN]

Die Summe (43) der verschiedenen Koeffizienten ergibt die gesamte Nachgiebigkeit des Daches. Beim Satteldach wird bei der statischen Berechnung am häufigsten nur die Hälfte des Daches in

Betracht gezogen. In diesem Fall ist die Nachgiebigkeit der Konstruktion die Hälfte des berechneten Ergebnisses.

$$c = c_{1.1} + c_{1.2} + c_{2.1} + c_{2.2} + c_{2.3} + c_3 \tag{43}$$

Dabei ist:

c - gesamte Nachgiebigkeit des Daches [mm/kN]

2.9.4 Berechnungsmethode nach Bogaard

Bogaard hat sich auch mit dem Schubfeld und Trapezblech beschäftigt. Er hat 1987 in seiner Publikation [37] ein allgemeines Verfahren für die Ermittlung der Schubsteifigkeit und der Verformung des Profilbleches ausgearbeitet. Zu diesem Zeitpunkt wurde nur die erste Generation der dünnwandigen Profile verwendet. *Bogaard* [37] hat die mathematischen Gleichungen des Trapezbleches aufgeschrieben, die Grundlage der Analyse war die zweidimensionale Elastizitätstheorie.

Er hat - ähnlich wie *Schardt* und *Strehl*- eine Periode des Trapezbleches untersucht, siehe **Abb.37**. Die Schnittgrößen wurden in einer äquivalenten Ebene dargestellt, das Blech ist durch horizontale Normalkräfte (n_{xx} und n_{yy}) belastet, **Abb.37**.

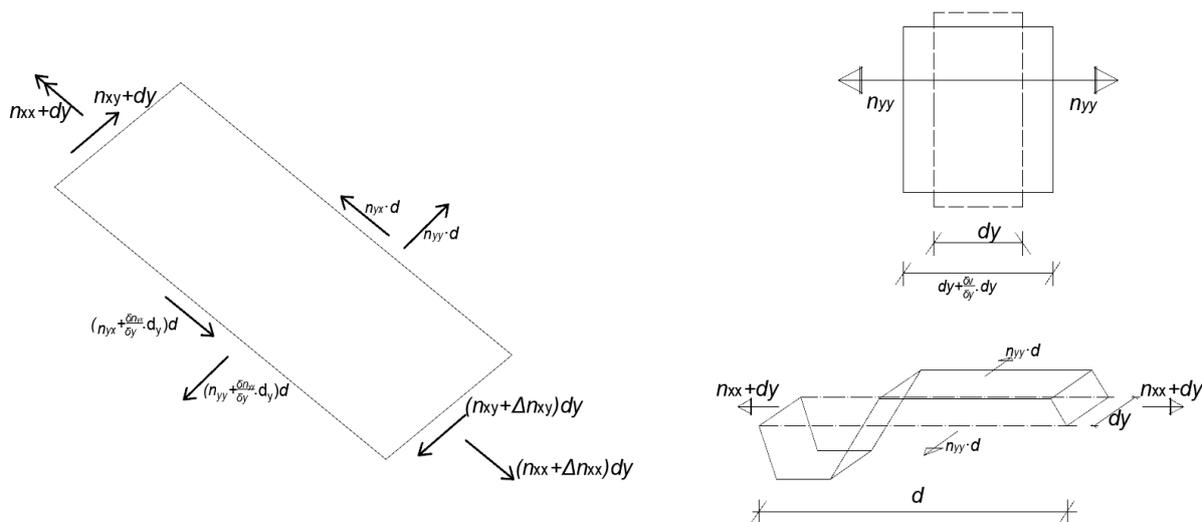


Abb.37: a) Schnittgrößen an der Scheibe b) Verformung infolge die Schnittgrößen und Grundgleichungen [37]

Die Verformung des Untergurtes ist in den Befestigungspunkten fast null, deshalb kann der Verschiebungsquotient Δ/b_d durch den Quotient δ/δ_x ersetzt werden. Um das Gleichgewicht der globalen Kräfte zu sichern, wurden die folgenden Gleichungen nach [37] aufgeschrieben: (44), (45), (46)

$$\frac{\Delta n_{xx}}{d} + \frac{\delta n_{yx}}{\delta_y} = 0 \quad (44)$$

$$\frac{\delta n_{yy}}{\delta_y} + \frac{\Delta n_{xy}}{d} = 0 \quad (45)$$

$$n_{xy} + n_{yx} = 0 \quad \text{Dabei: } \frac{\Delta}{d} = \frac{\delta}{\delta_x} \quad (46)$$

Dabei ist:

- d - Wellenlänge des Trapezbleches [mm]
- n_{xx} - Normalkraft im Trapezblech in Richtung x [kN]
- n_{yy} - Normalkraft im Trapezblech in Richtung y [kN]
- n_{yx} - Schubkraft im Trapezblech in Richtung x [kN]
- n_{xy} - Schubkraft im Trapezblech in Richtung y [kN]

Nach der Ableitung dieser Gleichungen können die Grundgleichungen der Länge dy (Periode) ermittelt werden. [37] Diese sind die folgenden:

$$\frac{\Delta u}{d} = \phi \cdot \frac{\alpha \cdot n_{xx}}{E \cdot t} - \nu \cdot \frac{n_{yy}}{\alpha \cdot E \cdot t} \quad (47)$$

$$\frac{\delta v}{\delta y} = \frac{n_{yy}}{\alpha \cdot E \cdot t} - \nu \cdot \frac{n_{xx}}{\alpha \cdot E \cdot t} \quad (48)$$

$$\frac{\delta u}{\delta y} + \frac{\Delta v}{d} = \alpha \cdot \frac{n_{xy}}{G \cdot t} \quad (49)$$

Dabei ist:

- d - Wellenlänge des Trapezbleches [mm]
- E - Elastizitätsmodul [kN/mm²]
- ϕ - Winkel zwischen Steg und Obergurt [°]
- α - Faktor für die Berücksichtigung der Geometrie [-]
- G - Schubmodul [kN/mm²]

- Δu - Verformung des Bleches in Richtung x [mm]
- Δv - Verformung des Bleches in Richtung y [mm]
- c - Schubkraft im Trapezblech [kN]

Die Verbindung zwischen Steg und Gurt ist sehr weich, deshalb kann man sie im Modell als zwei starre Platten, die nur gelenkig verbunden sind, modellieren. *Bogaard* hat für die verschiedenen konstruktiven Anordnungen und Befestigungsmitteln verschiedene Randbedingungen gemacht. Nach Lösung der Differentialgleichungen und Feststellung der Befestigungsbedingungen für die verschiedenen Ausgestaltungen kann zuerst die Grundgleichung der Verformung (u) in Achse x nach (50) abgeleitet werden. Ich führe die meistverwendete Konstruktion auf: Trapezblech auf Dachpfetten, Tragrichtung parallel zu den Rahmen. [37]

$$u = \frac{\alpha \cdot T}{G \cdot t} \cdot \left(\frac{l - y}{d} \right) + \left[\frac{1}{2} \quad -\frac{1}{2} \right] \cdot \underline{u} \quad (50)$$

Dabei ist:

- d - Wellenlänge des Trapezbleches [mm]
- E - Elastizitätsmodul [kN/mm²]
- α - Faktor für die Berücksichtigung der Geometrie [-]
- G - Schubmodul [kN/mm²]
- T - Schubkraft im Blech [kN]
- l - Länge der Profiltafel [mm]
- \underline{u} - nichtlineare Verformungsvektor

Der erste Anteil der Verformung beinhaltet die lineare Funktion, Wölbkrafttorsion des Bleches infolge $\alpha \cdot \frac{T}{G \cdot t \cdot d}$ Schubbelastung. Der zweite Anteil (\underline{u}) nach (51) beschreibt die nichtlineare Wölbkrafttorsion und die Profilverformung in Längsrichtung. [37]

$$\underline{u} = \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} \cdot e^{-\pi \cdot y / l_2} \cdot \cos \frac{\pi \cdot y}{l_2} \quad (51)$$

Dabei ist:

- l_2 - Wellenlänge des Trapezbleches für die Berücksichtigung der Befestigungsarten [mm]
- A_1 - Konstante [mm] **Anhang.A5.**
- B_1 - Konstante [mm] **Anhang.A5.**

Mit der Kenntnisse der Verformungen, und des \underline{u} Vektors, können alle Schnittkräfte nach Differenzierung bestimmt werden. *Bogaard* hat auch die Methode mit großmaßstäblichen Untersuchungen [38] verifiziert.

Bogaard hat bereits die Exzentrizität berücksichtigt. Bei größeren Pfetten oder höheren Trapezblechen ist die Schwerpunkt immer ferner, **Abb.38**. [37]

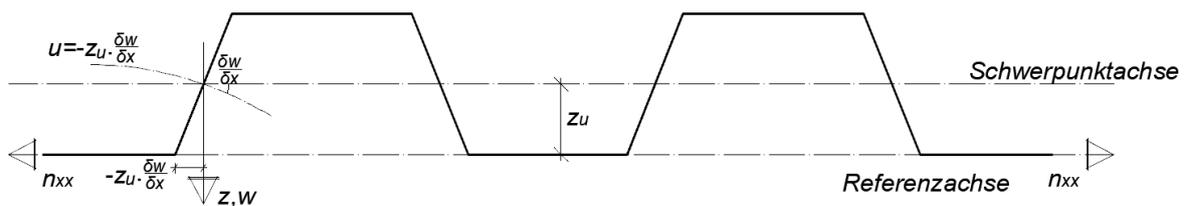


Abb.38: Verformung und Biegemoment infolge Exzentrizität [37]

Es bedeutet eine erhöhte Belastung auf Trapezblech und Pfette. Die Steifigkeitsreduktion der Dachbekleidung kann nicht vermeiden werden. Nach [37] kann das m_{xx} Moment im Blech infolge der n_{xx} Normalkraft nach (52) berechnet werden. Die Exzentrizität beeinflusst auch die horizontalen Verformungen (53), eigentlich die Schubsteifigkeit der Profiltafel. Im Vergleich mit der Gleichung (47), wo Trapezblech durch eine Platte ersetzt war, muss man einen extra Faktor ψ nach (54) einfügen. Der Modifizierungsfaktor hängt von der Größe der Exzentrizität und von der Blechdicke ab. [37]

$$m_{xx} = z_u \cdot n_{xx} \quad (52)$$

Dabei ist:

- m_{xx} - Biegemoment im Trapezblech wegen Exzentrizität [Nmm]
- z_u - Abstand zwischen Schwerpunktschwerachse und Referenzachse des Bleches [mm]
- n_{xx} - Normalkraft im Blech [kN]
- Δu - Verformung des Bleches in Richtung x [mm]
- v - Verformung des Bleches in Richtung y [mm]

$$\frac{\Delta u}{d} = (\phi + \psi) \cdot \alpha \cdot \frac{n_{xx}}{E \cdot t} - \nu \cdot \frac{n_{yy}}{\alpha \cdot E \cdot t} \quad (53)$$

Dabei ist:

$$\psi = 12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \left(\frac{z_u}{t}\right)^2 \quad (54)$$

ψ	-	Modifizierungsfaktor [-]
α	-	Faktor für die Berücksichtigung der Geometrie [-]
E	-	Elastizitätsmodul [N/mm ²]
$\frac{\Delta u}{b_d}$	-	Verformungsquotient in Richtung x [-]
ϕ	-	Winkel zwischen Obergurt und flansch [°]
t	-	Blechdicke [mm]
z_u	-	Exzentrizität [mm]
ν	-	Poissonzahl [-]
d	-	Wellenlänge des Trapezbleches [mm]
n_{yy}	-	Normalkraft im Blech [kN]
n_{xx}	-	Normalkraft im Blech [kN]

Bogaard hat großmaßstäbliche Untersuchungen ausgeführt - er hat die Deformation und die Schubtragfähigkeit des Bleches untersucht. Maßgebende Versagensfälle sind beim Profilblech meistens die Profiltorsion und das Abscheren der Platte beim Schrauben. *Bogaard* hat in seiner Forschung [38] Vorschläge für die Vermeidung der Profiltorsion gemacht. Profiltorsion tritt meistens wegen der freien Deformierung des Bleches und wegen der größeren Randkräften am Rand auf. Mit Aktivierung einer äußeren Druckkraft kann ein erhöhter Widerstand nach [38] erreicht werden. Ein Blech muss am Rand der Profiltafel auf den Blech befestigt werden und auch mit der Unterkonstruktion verbunden werden. Die verbundenen Wellen verteilen die horizontalen Schubkräfte zwischen einander. *Bogaard* postuliert die Steifigkeitserhöhung auf 7-17%, anhand der Probelastungen. [38]

2.9.5 Vergleich der verschiedenen Methoden

Die verschiedenen Berechnungsmethoden liefern unterschiedliche Ergebnisse, die die Verfahren verschiedene Einflussfaktoren berücksichtigen. Die Berechnungsmethode nach *Steinhardt/Einsfeld* [22] kann heutzutage schon nicht mehr verwendet werden, im deutschsprachigen Raum wurde die Weiterentwicklung nach *Strehl* [24] durchgeführt. Dieses Berechnungsverfahren war die Grundlage der deutschen Norm. *Bryan* [27] und *Davis* [28] haben sich auch schon mit Verformungen der Schrauben beschäftigt, deshalb ist die mit dieser Methode nach ECCS [3] berechnete Nachgiebigkeit immer größer. Jedes Verfahren hat sichergestellt, dass die entsprechende Befestigung und Schraubenanzahl die Grundlage des Schubfeldes ist. Beide Verfahren, sowohl nach *Strehl* [24] als auch nach *Bryan* und *Davis* (ECCS Vorschlag [3]) berücksichtigen die Profilverformung (Schubverzerrung, Verwölbung). *Bogaard* hat auch die Befestigungsarten und Randverstärkung berücksichtigt, er hat auch nur die erste Generation der Trapezbleche untersucht. *Bogaard* hat in seiner Forschung [38] Vorschläge für die Vermeidung der Profiltorsion gemacht. Verstärkung des Bleches am Rand z.B. mit aussteifendem Querschnittsblech, kann Profiltorsion reduziert und die Steifigkeit erhöht werden. [6]

Seidel hat in seiner Dissertation [6] eine Vergleichsuntersuchung durchgeführt. Er hat eine Anordnung nach *Walter* [30] untersucht. Das untersuchte Trapezblech war: Hoesch E40 mit einer Blechdicke von 1mm. Die Fläche des Schubfeldes war 3,44m lang und 2,75m breit. Die verwendete Schrauben waren: Setzbolzen im Randbereich und Bohrschrauben bei Stoßbildungen. [6]

Modell	Steinhardt/Einsfeld [mm/kN]	Schardt/Strehl [mm/kN]	Bryan/Davis [mm/kN]	Verifikation Walter [mm/kN]
Nachgiebigkeit	0,1368	0,1243	0,209	0,103

Tab.1: Nachgiebigkeit aus verschiedenen Berechnungsmethode [6]

Die Ergebnisse zeigen, dass die ersten zwei Verfahren (nach *Steinhardt/Einsfeld* und nach *Schardt/Strehl*) die gleiche Nachgiebigkeit liefern. Hier wird das Verbindungsmittel nicht in Betracht gezogen, nur das Trapezblech. Die Konstruktion nach dieser Annahme verhält sich viel steifer. In manchen Fällen kann diese Annahme zu der Unterschätzung der Tragfähigkeit des Gebäudes führen. Das ECCS [3] Verfahren nach *Bryan/Davis* berücksichtigt die Verschiebung der Verbindungsmittel, so dass sich eine größere Nachgiebigkeit ergibt. Der Anteil des Bleches ist bei allen drei Verfahren fast gleich. [6]

2.10 Spezielle Wirkung des Schubfeldes unter seismischen Lasten

Der aussteifende Effekt der Außenschale unter Belastung (Wind, Schnee, Eigengewicht) ist durch Experimente [5], [6] und durch Berechnungen [24], [27], [28] schon festgelegt. Dagegen ist er unter Erdbebenlast noch nicht so detailliert berechnet worden.

Unter seismischen Lasten verhält sich die Tragkonstruktion ganz anders und die Steifigkeit des Gebäudes ist viel größer. Dieser Fakt darf nicht ignoriert werden, weil dies sehr leicht zu der Unterdimensionierung der Tragkonstruktion führen kann. Ich zeige in diesem Kapitel das Verhalten einer Stahlkonstruktion unter Erdbebenlasten mit verschiedenen konstruktiven Anordnungen nach *Joo, Kollar* und *Dunai* [31].

Das analysierte Gebäude war eine allgemeine Industriehalle mit einem Geschoss. Das Gebäude hatte die folgenden geometrischen Parameter: Länge: 60m, Breite: 30m, Rahmenabstand: 7,5m. Die Aussteifung wurde mit zwei Dachverbänden und mit vier Wandverbänden ausgeführt, sehen Sie **Abb.39**. Bekannt waren die Steifigkeit des Systems und die Massen.

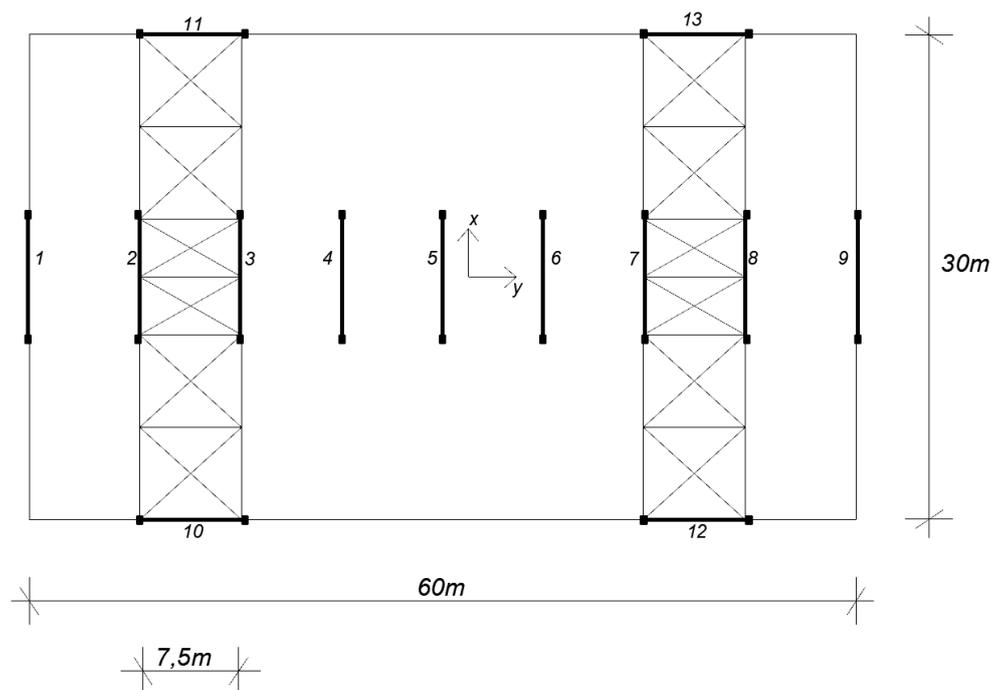


Abb.39: Grundriss mit Aussteifungselementen [31]

Man kann die Dachverformungen berechnen, wenn die Geschosdecke auf mehrere Teile aufgeteilt wird. Die Autoren haben drei verschiedene Deckenmodelle erstellt mit verschiedenen Detaillierungen: [31]

- **Biegesteife Geschosdecke:** Die Verformung der Decken ist vernachlässigbar, so ist die Verformung der vertikalen Aussteifungselemente gleich. (*1. Fall*)

- **In eine Richtung verformbare Decke:** Die Decke ist auf parallele Streifen aufgeteilt und zwischen den Streifen ist die Steifigkeit der schubbelasteten Federn sehr klein. Dies bedeutet, dass die Streifen individuelle Vibration haben. (2. Fall)
- **Flexible Decke:** Die Decke ist hier auch auf Streifen oder Elemente geteilt. Die schubbelasteten und axialen Federn haben gegebene Größen.

Im 1. Fall kann festgelegt werden, dass sich die Dachkonstruktion nicht verformen kann. Die Decke verformt sich ähnlich wie ein Starrkörper unter seismischen Lasten. So kann dieses Modell verwendet werden, wenn die Steifigkeit des Daches gleich mit den anderen Konstruktionselementen ist. Wichtig ist ebenso die gleichmäßige Verteilung der Masse und der Steifigkeiten. Die Schubkräfte sind in der Dachebene klein, was auch die Verformungen erklärt. Die Rahmen müssen auch über die gleiche Steifigkeit verfügen. [31]

Bei der in eine Richtung verformbaren Decke (2. Fall) kann sich das Dach durch Schubbelastung zwischen den Rahmen auch verformen. Dieses Modell ist praktisch für Konstruktionen, in denen die Steifigkeit der Dachaussteifung viel größer ist als die Steifigkeit der Dachbekleidung. In diesem Fall trägt ein Rahmen die Lasten nur aus der direkten Region, in etwa die Hälfte des Rahmenabstands in beide Richtungen. [31]

Es gibt mehrere Möglichkeiten der Modellierung der elastischen Decke. Bei flexiblen Decken wird die Decke auf Streifen aufgeteilt und zwischen den Decken ist die Schubsteifigkeit gegeben. So kann das Dach in beide Richtungen verschoben, um die Quer- und Biegekraft aufzunehmen. Mit der Eingabe der Schubsteifigkeit und der axialen Steifigkeiten können alle Konstruktionen bemessen werden. Der 3. Fall ist ähnlich wie der der flexiblen Decke aber hier wird die Steifigkeit des Daches berücksichtigt. Im 4. Fall werden neben der Dachsteifigkeit auch die Aussteifungselemente berücksichtigt. [31]

Die Belastung war eine Erdbebenlast in Querrichtung. Während der Modellierung wurden die vier Varianten berechnet. Das Ergebnis war die Periodenzeit. Die Dauer des ersten Schwingungszyklus ist ähnlich bei den Fällen: 1, 2 und 4, erkennbar in **Tab.2**. [31]

Modell	biegesteife Decke (1)	verformbare Decke (2)	flexible Decke (3) ohne Aussteifungse.	flexible Decke (4) mit Aussteifungse.
Periodenzeit T [s]	0,338	0,338	1,763	0,421

Tab.2: Periodenzeiten bei verschiedenen Deckenmodellen [31]

Zu den verschiedenen Periodenzeiten gehören verschiedene Kräfte in den Aussteifungselementen, wie in **Tab.3** zu erkennen. Je größer die Periodenzeit ist, desto kleiner ist die Belastung der Wand- und Dachverbände. Deshalb ist es wichtig, das passende Modell auszuwählen, das am besten das reale Verhalten simuliert. [31]

Modell	biegesteife Decke (1)	verformbare Decke (2)	flexible Decke (3) ohne Aussteifungse.	flexible Decke (4) mit Aussteifungse.
Normalkraft [kN]	57,53	58,53	16,57	55,37

Tab.3: Normalkraft in den Aussteifungselementen [31]

Im 4. Fall ist die Periodenzeit nur 5% größer als bei dem biegesteifen Deckenmodell. Hier wird die Dachbekleidung auch berücksichtigt. Bei einer größeren Dachsteifigkeit ist das Verhalten des Gebäudes näher an dem Modell mit biegesteifer Decke. Es sollte sichergestellt werden, dass die Elemente nicht unterdimensioniert werden. Im 3. Fall wird bei dem flexiblen Modell nur die Steifigkeit des Daches berücksichtigt. Dann ist die Periodenzeit 4-mal größer, 1,763s. Die Normalkraft ist in diesem Fall in den Aussteifungselementen nur 16,57kN. Dies ist viel weniger als 55,37kN, wenn die Aussteifungselemente auch berücksichtigt werden. So kann eine Konstruktion sehr leicht unterdimensioniert werden, wenn man mit einer kleineren Steifigkeit rechnet. Dieser Fehler geht zu Lasten der Sicherheit. Die Massenverteilung kann auch ähnliche Probleme verursachen. [31]

Die folgende Konklusion kann gezogen werden. Wenn die Steifigkeit der Dachaussteifung (Windverband) viel größer ist als die Steifigkeit der Dachbekleidung, ist dann der Moment- und Querkraftverlauf ähnlich zu einem Zweifeldträger. Die Normalkraft bei der Einleitung ist ebensoviel wie bei den Pfetten. Umgekehrt trägt die Dachbekleidung die horizontalen Lasten. So ist es möglich, ein schlankes Aussteifungssystem auszuführen. Dies ist nur zweckmäßig, wenn man genaue Daten über die Schubfestigkeit des Trapezbleches hat. Diese Studie [31] hat auch die aussteifende Wirkung des Trapezbleches bestätigt, aber auch die Wichtigkeit der genauen Berechnung. Die Betrachtung des Schubfeldes und die vorgeschlagene Berechnungsmethode müssen zu jeder Ausgestaltung passen. [31]

2.11 Zusammenfassung der Literaturrecherche

Seit mehreren Jahren sind die Vorteile der leichten Dachbekleidung bei Industriebauten bekannt. Am häufigsten werden Rahmen in der Primärkonstruktion genutzt und als Sekundärelemente dienen die auf den Rahmen befestigten Pfetten und Profilbleche. Durch mehrere Versuche [5], [6], [24] kann festgestellt werden, dass das Trapezblech nicht nur als Platte, sondern auch als Scheibe

funktioniert. So kann die Dachbekleidung bei einfachen, untergeordneten Gebäuden an der horizontalen Lasttragung teilnehmen. Bei Rahmenkonstruktionen werden in Längsrichtung Wind- und Dachverbände eingesetzt. Mit der Berücksichtigung des Schubfeldes können diese Elemente weglassen werden.

EN 1993 1-3 [2] beinhaltet keine genaue Berechnungsmethode, sie schlägt die ECCS Publications Nummer 88 (1995) [3] für die Berücksichtigung des Schubfeldes vor. Diese Berechnung basiert auf der Methode von *Bryan* [27] und *Davis* [28]. Hier wird die Nachgiebigkeit der einzelnen Elemente (Trapezblech, Verbindungsmittel, Pfette) separat in Betracht gezogen und am Ende die Nachgiebigkeit summiert. Eine frühere Methode nach *Schardt/Strehl* [23], [24] hat sich nur mit der Verformung des Bleches beschäftigt, aber die Schrauben zeigen hier eine deutlich große Nachgiebigkeit. Bei der Planung muss man maßgebende Versagensfälle festhalten, um das Trapezblech mit einer signifikanten Sicherheit zu bemessen.

Die gesamte Nachgiebigkeit einer Profiltafel ist die Summe der einzelnen Komponenten. Globales und lokales Beulen des Trapezbleches ist am häufigsten maßgebend. Lokales Beulen tritt im Flansch oder in Unter- und Obergurt auf. Globales Beulen bedeutet einen Versagensfall im globalen Bereich, wenn das gesamte Bleche versagt.

Die Dachkonstruktion kann sowohl mit Pfetten als auch ohne Pfetten ausgeführt werden. Die direkte Befestigung des Bleches ist nach ECCS [3] erlaubt, aber die Effektivität ist mit Pfetten viel größer. Das Trapezblech muss auch Kräfte in seiner Ebene durch Querbiegung tragen, hier ist die kleinere Spannweite vorteilhaft.

Die Verschraubung erfolgt im Wellental oder mit längeren Kalotten auf der Hochsicke. Bei der Befestigung auf der Hochsicke muss eine entsprechende Wasserabdichtung angebracht werden. Am häufigsten werden gewindefurchende Schrauben, Blindnieten und Setzbolzen eingesetzt. Für alle Verbindungsmittel wird eine Mindestduktilität vorgeschrieben. Die Auswahl der Verbindungsmittel erfolgt anhand der Blechdicke. Dies bedeutet, dass bei Verbindungsmitteln erst Verformungen auftreten, bevor sie gänzlich zerstört sind. Die Verschiebung hat aber auch eine obere Grenze bevor die Versagenslast erreicht wird.

Am Rand erfolgt die Endbefestigung der Profiltafel an einem Endbalken oder mithilfe von ergänzenden Blechen.

Die Ausbildung der Stöße durch Überlappung zwischen den Platten ist auch wichtig, da der Schubfluss zwischen den Tafeln weitergeleitet werden muss. Hier wird oft eine Schubknagge für die Kraftweiterleitung eingesetzt.

Am Dach sind oft Öffnungen angeordnet, die die Wirkung des Schubfeldes stark reduzieren und Spannungsspitzen am Rand erzeugen. Bis zu einem Öffnungsanteil von 3% muss man mit keiner Beschränkung nach ECCS Vorschlag [3] bei der Planung rechnen. Bei kleineren Öffnungen, Leitungsdurchführungen oder einer Regenwasserableitung wird eine extra Platte auf dem Trapezblech befestigt.

Der Rahmen wirkt sich auf die Dachbekleidung aus: die einzelne Steifigkeit der Elemente trägt zu der Gesamtsteifigkeit der Konstruktion bei. Das Verhältnis zwischen Rahmen und Dach kann am besten mit der relativen Nachgiebigkeit r nach (8) bezeichnet werden. Wenn die relative Nachgiebigkeit r groß ist, hat die Dachbekleidung eine kleine aussteifende Wirkung. Wenn die relative Nachgiebigkeit r klein ist, hat die Dachbekleidung eine große aussteifende Wirkung. Wegen der Zusammenarbeit des Rahmens und des Daches kann die Schubkraft in der Profiltafel und die Nachgiebigkeit reduziert werden. Die Reduktion ist am Rand kleiner als bei inneren Rahmen.

Die Dachbekleidung hat neben des Aussteifungseffekts große Auswirkung auf die Dachpfetten. Bei schlanken, kaltgeformten Querschnitten ist Biegedrillknicken der Hauptversagensfall aufgrund einer hohen Druckkraft. Das Trapezblech behindert durch den Schubfluss die seitliche Verschiebung, so dass eine höhere kritische Last bei den Pfetten erreicht werden kann. Das Trapezblech oder die Sandwichpaneele werden am häufigsten mit selbstbohrenden Schrauben an den Pfetten befestigt.

Unter einer Erdbebenlast verhält sich eine Konstruktion anders. Die Dachbekleidung hat bei einer genauen Ausführung eine gegebene Steifigkeit. Diese Steifigkeit reduziert die horizontalen Verschiebungen des Gebäudes. Wenn man mit einer kleineren Steifigkeit als in der Realität vorhanden rechnet, kann die Konstruktion sehr leicht unterdimensioniert werden [31]. In manchen Fällen können die Verbindungsmittel bei großer Steifigkeit überlastet werden. Vorgeschlagen wird die Weiterentwicklung der Berechnungsmethode bei verschiedenen Konstruktionsvarianten.

Nach der ECCS-Berechnung kann eine innere Trapezblechbekleidung nicht berücksichtigt werden, aber ähnlich zu einer äußeren Dachbekleidung reduziert die Innenschale auch die Verformungen. Mehrere Untersuchungen [5], [6], [7] zeigen, dass das Schubfeld und dessen Effektivität von der konstruktiven Ausgestaltung und vom Elementtyp abhängt. Die derzeit gültige ECCS [3] Berechnungsmethode nach *Bryan/Davis* berücksichtigt die verschiedenen Elemente, aber eine genaue Untersuchung wäre nötig. Im Folgenden möchte ich maßgebende Einflussfaktoren bestimmen und die Ergebnisse mit einem FE-Modell vergleichen. Die Ergebnisse einer großmaßstäblichen Untersuchung an der TU Budapest [5], [32] werden als Kontrollwerte verwendet.

3 Musterberechnung und Auswertung der Ergebnisse, Einflussfaktoren

Ich habe die Elemente vom Hersteller *Wiegmann Gruppe* für die Berechnungen und für die Modellierung verwendet. In diesem Kapitel stelle ich das Berechnungsschema nach der EN 1993-1-3 [3] (ECCS) durch ein Musterbeispiel vor, die verschiedenen Ausgestaltungen wurden nach ECCS Vorschlag [3] berechnet. Die Hälfte des Daches wurde als Schubfeld modelliert und die

Pfetten wurden als Einfeldträger berücksichtigt. Im Musterbeispiel erfolgt die Verschraubung in jedem Wellental mit kurzen Bohrschrauben und in den Überlappungszonen wurden auch Schrauben eingesetzt.

Materialkennwerte

Elastizitätsmodul: $E := 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Schubmodul: $G := 81000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Poissonzahl: $\nu := 0.3$

Geometrie

Pfette:

Profilname: WP 140-20

Profildicke: $t_p := 1.5\text{mm}$

Profilhöhe: $H_p := 140\text{mm}$

oberer Flansch: $B_{1,p} := 66\text{mm}$

unterer Flansch: $B_{2,p} := 59\text{mm}$

Lippe: $L_p := 21\text{mm}$

Länge: $a := 6\text{m}$

Pfettenabstand: $b_1 := 1.5\text{m}$

Anzahl der Pfetten: $n_p := 5$

Anzahl der Pfetten/Blech: $n_{p1} := 5$

Anzahl der Bleche
in der Rahmenebene: $n_b := 1$

Querschnittsfläche: $A_p := [H_p - 2 \cdot t_p + B_{1,p} + B_{2,p} + 2 \cdot (L_p - t_p)] \cdot t_p = 451.5 \cdot \text{mm}^2$

Koeffizienten für die Berücksichtigung der inneren Blechen:

$$\alpha_1 := 0.70 \quad \alpha_2 := 0.67 \quad \alpha_3 := 0.80 \quad \alpha_4 := 1$$

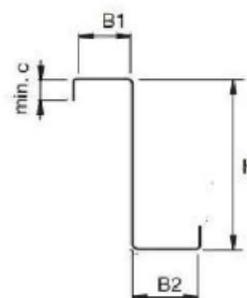


Tabelle 5.4/5.8 ECCS

Trapezblech:

Profilname:	WP 20/130
Profildicke:	$t_t := 0.5\text{mm}$
Profilhöhe:	$h_t := 20\text{mm}$
Baubreite:	$b_{tf} := 1060\text{mm}$
Wellenlänge:	$d_t := 133\text{mm}$
Obergurt:	$l_{1t} := 32.5\text{mm}$
Untergurt:	$l_{2t} := 73\text{mm}$

Länge: $b_t := 6.4\text{m}$

Anzahl: $n_t := \text{round}\left(\frac{a}{b_{tf}}\right) = 6$

Verhältnissbeiwert: $hd := \frac{h_t}{d_t} = 0.15$ $\theta := \text{atan}\left(\frac{d_t - l_{1t} - l_{2t}}{2} \cdot \frac{1}{h_t}\right) = 34.509 \cdot \text{deg}$

$ld := \frac{l_{1t}}{d_t} = 0.244$

$K_1 := 0.061$ *Tabelle 5.6 ECCS*

Verbindungsmittel:

Typ:

Durchmesser: $d_n := 5.5\text{mm}$

Länge: $l_n := 25\text{mm}$

Stückzahl/Pfette: $n_s := \text{round}\left(\frac{a}{d_t}\right) = 45$

$p := d_t = 133 \cdot \text{mm}$

$\beta_1 := 1.23$ $\beta_2 := 2.04$ *Tabelle 5.2 ECCS*

Nachgiebigkeit der Befestigungen am Profilstoß
(Überlappung):

$s_s := 0.25 \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$ *Tabelle 5.1 ECCS*

Nachgiebigkeit der Befestigungen (Blech/Pfette):

$s_p := 0.35 \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$ *Tabelle 5.1 ECCS*

Nachgiebigkeit der Befestigungen (Pfetten/Rahmen):

$s_{pr} := 0.38 \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$ *Tabelle 5.3 ECCS*

Nachgiebigkeit:

Verformung aufgrund
der Profilendverwölbung:

$$c_{1.1} := \frac{a \cdot d_t^{2.5} \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_4 \cdot K_1}{E \cdot t_t^{2.5} \cdot b_t^2} = 0.034 \cdot \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

Schubverzerrungen der ebenen
Querschnittsteile:

$$c_{1.2} := \frac{2 \cdot a \cdot (1 + \nu) \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot h_t}{d_t}\right)}{E \cdot t_t \cdot b_t} = 0.0302 \cdot \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

Nachgiebigkeit der Befestigungsmittel
am Querrand:

$$c_{2.1} := \frac{2 \cdot a \cdot s_p \cdot p}{b_t^2} = 0.0136 \cdot \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel
am Längsstoß:

$$c_{2.2} := \frac{2 \cdot s_s \cdot s_p \cdot (n_t - 1)}{2n_s \cdot s_p + \beta_1 \cdot n_p \cdot s_s} = 0.0265 \cdot \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel
am Längsrand:

$$c_{2.3} := \frac{2}{n_p} \cdot \left(s_{pr} + \frac{s_p}{\beta_2}\right) = 0.221 \cdot \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

Nachgiebigkeit aus Dehnung der Pfetten:

$$c_3 := \frac{2b_t^3}{3 \cdot E \cdot A_p \cdot a^2} = 0.051 \cdot \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

$$c := \frac{b_t^2}{a^2} \cdot (c_{1.1} + c_{1.2} + c_{2.1} + c_{2.2} + c_{2.3}) + c_3 = 0.421 \cdot \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

3.1 Verschiedene konstruktive Ausgestaltungen

In diesem Kapitel beschäftige ich mich mit den verschiedenen Querschnitte und Profilen. In der **Tabelle 4.** sind die Ergebnisse zusammengefasst. Ich habe drei Pfetten- und Profilblechvarianten analysiert. Die Größe der Pfette beeinflusst die Nachgiebigkeit weniger und hat nur Auswirkung auf den c_3 Faktor. ECCS [3] berücksichtigt nur die Querschnittsfläche der Pfetten, aber nicht die Blechdicke und die Exzentrizität. Dies wird versucht und mit dem FE-Modell verglichen werden. Bei größeren Trapezblechen steigt die Nachgiebigkeit bedeutend. Der Unterschied zwischen dem WP20- und dem WP35-Profil ist 23%, bei einem größeren Trapezblech ergibt sich eine größere Nachgiebigkeit. Die Wirkung der Exzentrizität ist größer als die Wirkung des Querschnittswuchses. [5]

Pfette	Profilblech	$c_{1.1}$	$c_{1.2}$	$c_{2.1}$	$c_{2.2}$	$c_{2.3}$	c_3	c [mm/kN]
Z140	WP20	0,034	0,0302	0,0136	0,0265	0,221	0,051	0,421
	WP35	0,121	0,0312	0,0212	0,0401	0,221	0,051	0,545
	WP50	0,151	0,0333	0,0189	0,0426	0,221	0,051	0,582
Z180	WP20	0,034	0,0302	0,0136	0,0265	0,221	0,0433	0,413
	WP35	0,121	0,0312	0,0212	0,0401	0,221	0,0433	0,537
	WP50	0,151	0,0333	0,0188	0,0426	0,221	0,043	0,574
Z200	WP20	0,034	0,0302	0,0136	0,0265	0,221	0,04	0,41
	WP35	0,121	0,0312	0,0212	0,0401	0,221	0,04	0,534
	WP50	0,151	0,0333	0,0188	0,0426	0,221	0,04	0,571

Tab.4. Nachgiebigkeit bei verschiedene Pfetten und Trapezbleche

Die Nachgiebigkeit hängt sehr stark von der Befestigungsart ab. In der **Tabelle 5.** sind die einzelnen Komponenten erkennbar, wenn das Trapezblech in jedem Wellental oder nur in jedem zweiten Wellental verschraubt ist. Bei den $c_{1.1}$, $c_{2.1}$, $c_{2.1}$ und $c_{2.3}$ Werten ist eine deutliche Veränderung, wegen der vorbenannten Profiltorsion zu erkennen. Nach ECCS-Vorschlag [3] kann die Befestigung mit den K -Werten durch Iteration berücksichtigt werden. Das Schubfeld ist im zweiten Fall 68% nachgiebiger (Befestigung in jedem 2. Wellental), deshalb schlägt die Fachliteratur [12] die steife Befestigung vor. [5]

	$c_{1.1}$	$c_{1.2}$	$c_{2.1}$	$c_{2.2}$	$c_{2.3}$	c_3	c [mm/kN]
Befestigung in jedem Wellental	0,0340	0,0302	0,0136	0,0265	0,2210	0,0510	0,4210
Befestigung in jedem 2. Wellental	0,2090	0,0302	0,0273	0,0520	0,2640	0,0510	0,7140
Abweichung in %	515%	0%	101%	96%	19%	0%	70%

Tab.5. verschiedene Befestigungsarten

4 Modellierung des Schubfeldes mit dem FE-Modell

Die im vorherigen Kapitel vorgestellte Berechnungsmethode nach ECCS [3] habe ich mit einem FE-Modell verglichen. Die Berechnungsmethode nach ECCS [3] basiert auf den einzelnen Steifigkeiten der Sekundärelemente. Zuerst habe ich nur die in der Berechnung berücksichtigten Einflussfaktoren modelliert. Deshalb habe ich kein Gesamtmodell (mehrere Rahmen und Aussteifungselemente) aufgebaut, sondern nur eine halbes Dach mit Balken, Pfetten, Verbindungsmittel und Trapezblechen.

4.1 Beschreibung des Modells

Die Modellierung wurde mittels den in [2] und [3] angegebenen Programmen ausgeführt. **Abb.40.** zeigt die allgemeine Größe und die konstruktive Ausgestaltung. Die Spannweite ist 12m und der Abstand zwischen den Rahmen ist 6m. Der Stützenfuß ist gelenkig ausgeführt, aber die Rahmenecke ist biegesteif. Die Z-Pfetten liegen in einem Abstand von 1,5m auf den Balken, hier wurde nur die zweite Generation der Pfetten analysiert.

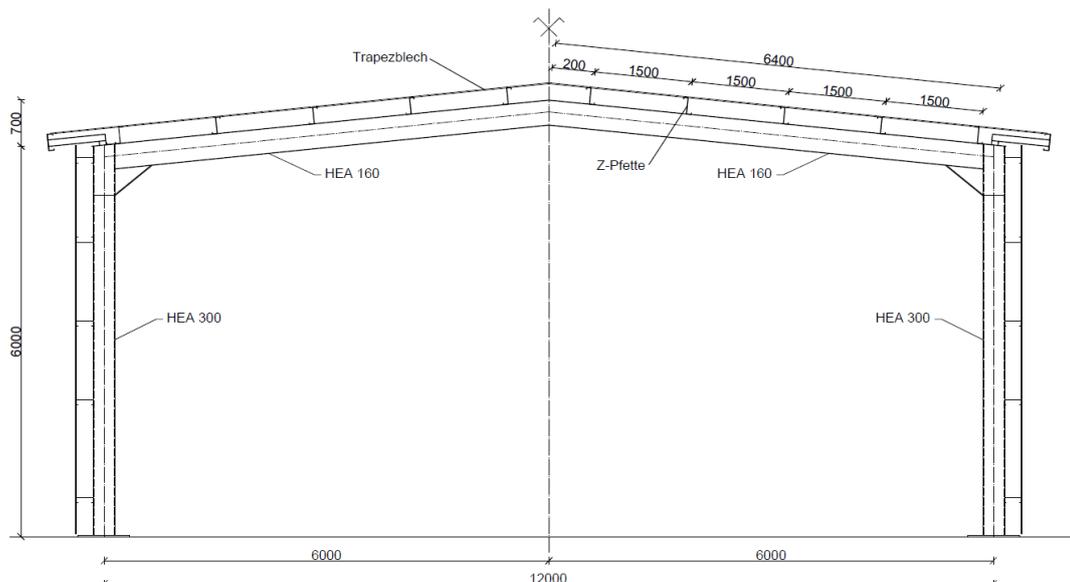


Abb.40. Übersichtszeichnung der modellierten Konstruktion

Die Grundidee war es, das detaillierte und verifizierte FE-Modell mit der gültigen Berechnungsmethode nach ECCS [3] zu vergleichen und die Ergebnisse auszuwerten. Ich habe das Modell ähnlich wie *Radnay* in seiner Dissertation [40] gebaut und die Grundeinstellungen habe ich auch nach [40] aufgenommen. Zuerst habe ich die Hälfte des Daches zwischen zwei Rahmen mit den oben genannten Größen und Eigenschaften modelliert. Mithilfe der Ergebnisse habe ich die Bleche und die Pfetten als Schalenelemente modelliert.

In **Abb.41.** sind das Schubfeldmodell und die Auflagerungen dargestellt. Das Ziel war es, das Trapezblech auf Schub zu aktivieren. Deshalb habe ich die folgenden Auflagerungen nach [40] verwendet. Bei dem 1. Balken sind die Verschiebungen in Y, Z Richtungen behindert, aber in der Ebene der Stablänge (X-Richtung) ist die Verschiebung möglich. So kann das Schubfeld modelliert werden. Bei dem 2. Balken sind die Verschiebungen in alle Richtungen behindert, und hier ist ein Auflager wegen der Drehung um die X-Achse zu finden. [40]

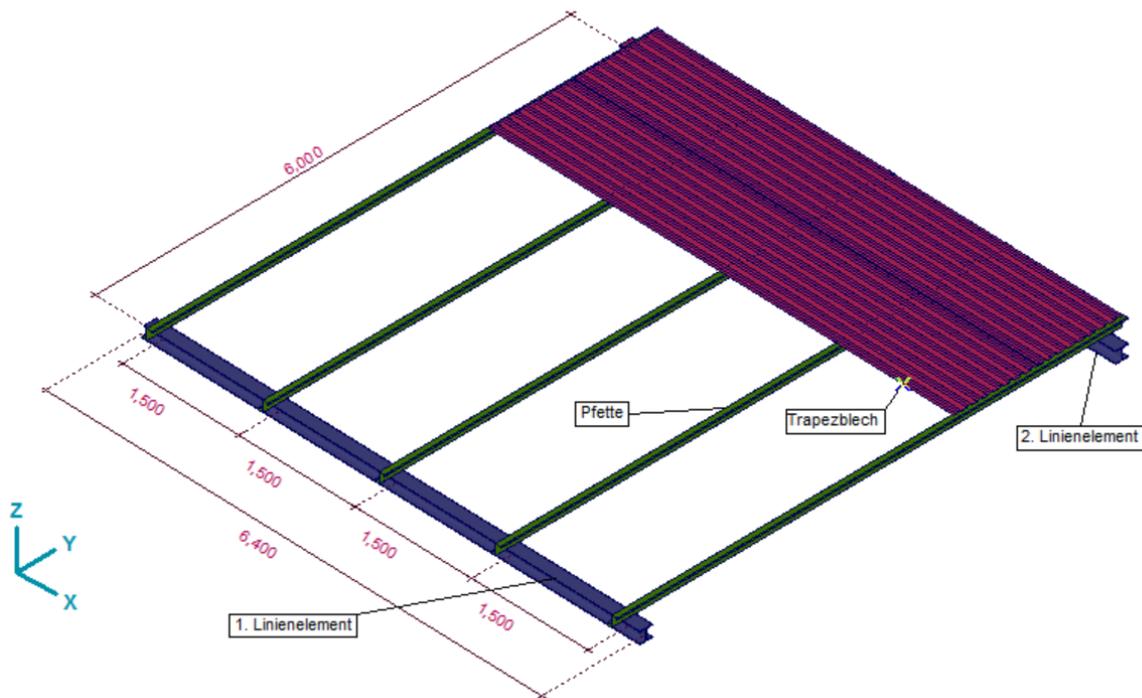


Abb.41: FE-Modell des Schubfeldes

Die Belastung ist 1kN beim linken Auflager des 1. Linienelements in Richtung X, (**Abb.42.**) Der 1. Stab kann in Richtung X frei verschoben werden, wenn das Schubfeld nicht aktiviert ist. Die Effektivität des Schubfeldes wird durch die horizontale Verschiebung des Bleches unter 1kN definiert. Es ergibt sich die Nachgiebigkeit.

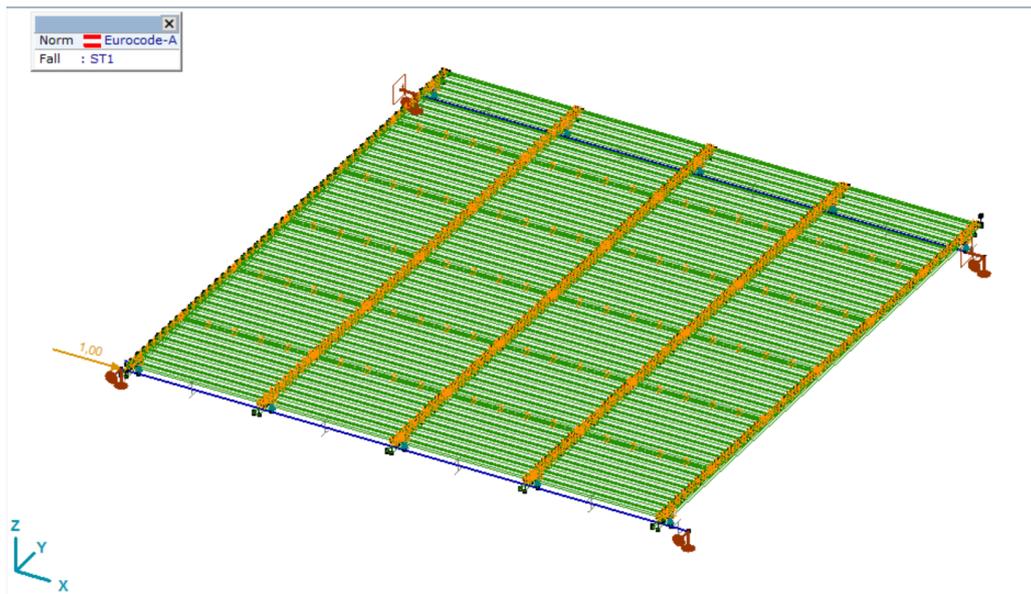


Abb.42: Belastung und Verbindungsmittelverteilung

Der Halter hat aber eine deutliche Verdrehung, die man bei der Modellierung auch berücksichtigen muss. Die Biegesteifigkeit der Halter habe ich separat berechnet. Als Schale wurden Balken und Halter analysiert. Heutzutage werden meistens geschweißte Ausgestaltungen verwendet. Ein 1m langer Balken als Schale habe ich gebaut und am Rand der Balken wurden Linienlager eingesetzt. [40]

Bei einer geschweißten Ausgestaltung, **Abb.43**, wurde nur eine Schale verwendet, die Belastung ist 1kN im Schwerpunkt der Schrauben in Richtung der Balken. Hier habe ich einen einfachen U-förmigen Halter modelliert, die Verdrehung ist in diesem Fall 0,00318rad. Mit mehreren Haltern und Biegesteifigkeit habe ich die Nachgiebigkeit des Schubfeldes berechnet, die Ergebnisse zeigen nicht so große Abweichungen. Bei den verschiedenen Ausgestaltungen wurde die Biegesteifigkeit der Halter mit einem allgemeinen Wert berechnet.

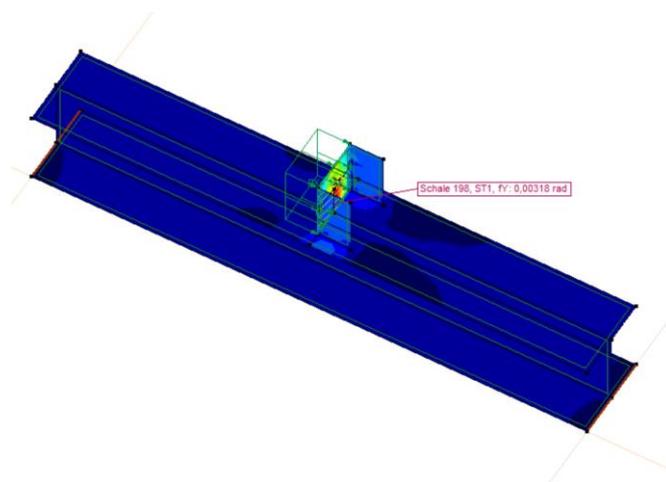


Abb.43: Detailmodell für die Berechnung die Biegesteifigkeit der Halter

Zwischen Halter und Pfette ist die Kraftübertragung mit Schrauben gesichert. **Abb.44. a)** zeigt das statische Modell des Anschlusses. Die Schrauben wurden hier auch als Feder mit gegebenen Federkonstanten analysiert, die Werte habe ich aus dem ECCS-Vorschlag [3] (**Anhang.A6**) und aus der Forschung von Höglund [12] für gewindefurchende Schrauben entnommen. Der Halter ist mit 4 Schrauben an der Pfette verbunden. In Längsrichtung der Schrauben habe ich eine große Federkonstante (steife Auflagerung) eingestellt und quer zur Schraubachse habe ich eine kleinere Steifigkeit nach ECCS Vorschlag für Schraubenwiderstände [3] verwendet. Zwischen den Schrauben sind zwei Starrkörper eingesetzt. Starrkörper und Pfette sind mit dem Knoten-Knoten-Verbindungs mittel verbunden. Die zwei Starrkörper sichern die Kraftübertragung und modellieren den Pfettenhalter als ein flächenförmiges Auflager. Der Balken wurde als Stab modelliert. Deshalb habe ich die Exzentrizität mit einem längeren Knoten-Knoten-Verbindungs mittel berücksichtigt. [40]

Die Befestigung des Trapezbleches erfolgt in jedem oder in jedem zweiten Wellental, hier wurden auch Federn eingebaut. Diese Federn verfügen über eine unendlich große Steifigkeit in ihrer Längsrichtung. Quer zur Achse habe ich die in der ECCS [3] genannten Widerstände, ähnlich wie bei den Schrauben bei der Pfettenbefestigung, eingestellt, sehen Sie **Abb.44. b)**. [40]

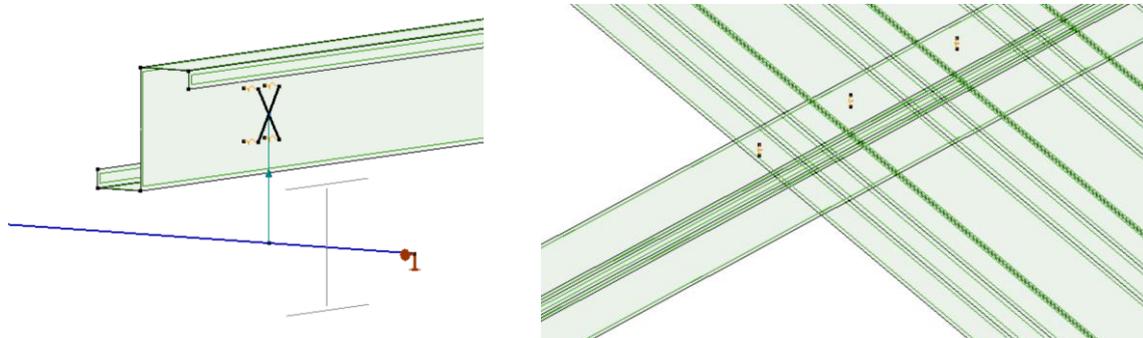


Abb.44: a) Modellierung des Pfettenhalters b) Befestigung des Bleches

Im Modell wurden sechs 1034mm lange Profiltafeln verwendet. Die Kraftübertragung zwischen den Tafeln, am Längsstoß ist sehr wichtig bei der Schubfeldwirkung. Meistens werden die Bleche überlappt und mit Schrauben in einem Abstand von 20cm oder 30 cm verbunden. Ich habe hier auch eine Feder verwendet, aber jetzt in der Ebene des Trapezbleches. **Abb.45.** zeigt die eingestellte Federkonstante und die Kontaktelemente.

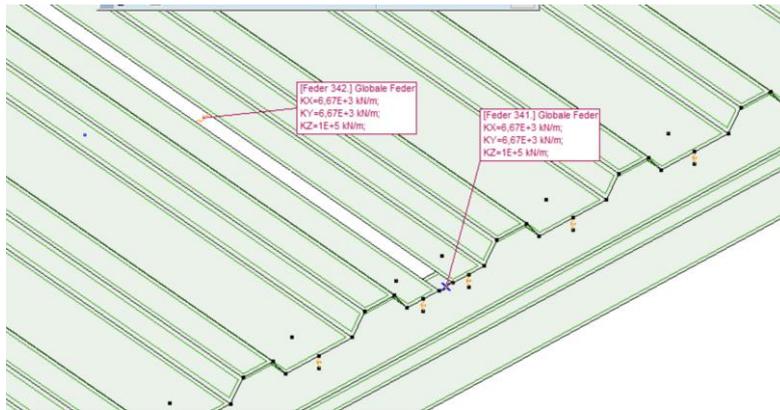


Abb.45: Trapezblech Längsstößen (Überlappung)

Zuerst habe ich das Blech nur mit einer Reihe Schrauben auf der Pfette befestigt, aber so war die Konstruktion zu nachgiebig. Unter der 1kN Scherkraft wurden die Pfetten sehr stark durch Profiltorsion und Knippen verformt. Die so erhaltenen horizontalen Verschiebungen waren sehr groß und da das Z-Profil in nur einem Punkt befestigt war, konnte sich der obere und untere Flansch ohne Widerstand verdrehen. Wegen dieser Probleme habe ich den oberen Flansch mit zwei extra Federn verstärkt. Diese Elemente verfügen in der Ebene des Bleches über keinen Widerstand, sie funktionieren nur als vertikales Auflager; dies ist in **Abb.46** zu erkennen.

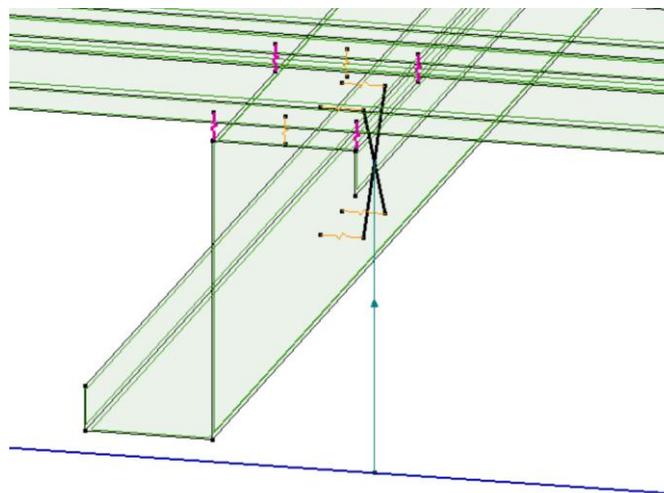


Abb.46: Auflagerung des Flansches wegen Torsion

Mithilfe dieser Änderungen haben sich die Ergebnisse verbessert. Mit der automatischen Netzgenerierungsfunktion wurde das Netz bei den Schalelementen generiert. Bei den Federn und Kontaktelemente wurde eine Netzverfeinerung durchgeführt.

Wichtig ist, dass das Modell nur die Hälfte des Daches beinhaltet. Bei den späteren Auswertungen und Vergleichen verwende ich immer diesen Wert. Bei den Verifikationen kann man die

Nachgiebigkeit des ganzen Daches sehr leicht ermitteln, halb so groß als die Nachgiebigkeit des Modells (Hälfte des Daches)

4.2 Verifikation des FE-Modells

Bei einem FE-Modell ist die Verifikation und ein Vergleich mit anderen Ergebnissen sehr wichtig, so dass die richtige Funktionalität geprüft werden kann.

Der wichtigste Ausgangspunkt war in diesem Fall eine Untersuchung an der Budapest University of Technology and Economics [5], [32]. Im nächsten Kapitel zeige ich die ausgeführte Untersuchung und die technischen Daten auf. Als Kontrolle habe ich die von der Untersuchung bekommenen Ergebnisse verwendet. Die zweite Verifikation war ein Versuch von *Seidel* [6]. In seiner Dissertation hat er sich mit der Schubfeldwirkung beschäftigt und hat Versuche mit verschiedenen Profilen ausgeführt. Mit dieser Verifikation beschäftige ich mich im 6.5.2 Kapitel "Verifikation des Trapezbleches".

4.2.1 Verifikation des Schubfeldmodells mit großmaßstäblicher Untersuchung

Die erste Verifikation ist ein großmaßstäbliches Experiment im Ausführungsmaßstab 1:1 an der Budapest University of Technology and Economics, Department of Structural Engineering [5], [32], ausgeführt während meines Bachelorstudiums.

Der Versuch verlief wie folgt. Es wurde eine Halle mit zwei Rahmen und eine ergänzende Stahlkonstruktion für die Belastungs-Bemessung aufgebaut, sehen Sie **Abb.47**.



Abb.47: Simulationshalle und die Belastung und Bemessungsgeräte [33]

Hier wurde der experimentelle Nachweis des Schubfeldes untersucht. Verschiedene Einstellungen, Schrauben, Schraubenbilder, Überlappungen, Profilblechstärken, Dachpfetten mit verschiedenen Größen und Dicken wurden ausprobiert und mithilfe der Messgeräte die Ergebnisse gesammelt. **Abb.48.** zeigt die hydraulische Presse in Querrichtung. [5]

Bei diesem Hauptträger war die Belastung eine Druckkraft in horizontale Richtung und bei dem anderen Hauptträger eine Zugkraft in horizontale Richtung. So konnte das Schubfeld aktiviert werden. [5]



Abb.48: hydraulische Presse [33]

Die Messung ergab Verschiebungen parallel zum Stahlrahmen und auch in Querrichtung. In den Dachverbänden (Drahtseil) wurden die Spannungen und die Verschiebungen gemessen. Der Rahmen für die Belastung war sehr stabil und steif. Trotz der massiven Konstruktion konnten auch die Verschiebungen gemessen werden, so dass über die ausreichende Steifigkeit Informationen gesammelt werden konnten. Mit dem Kraft-Verschiebungs-Diagramm wurde die Steifigkeit der Rahmen berechnet. [5]

Während der Untersuchung wurden sehr viele Einstellungen ausprobiert und bei jedem System wurden mindestens zwei Belastungstests gemacht. Zuerst wurde der Rahmen ohne Trapezblech belastet, so dass später die Effektivität des Schubfeldes berücksichtigt werden konnte. [5]

Die Ergebnisse zeigen, dass die Berechnung der Steifigkeit bei allgemeinen Konstruktionen nach ECCS [3] sicherlich geeignet ist. Aber die Nachgiebigkeitswerte stimmen nach ECCS nicht mit den Untersuchungsergebnissen überein, wenn verschiedene Profilhöhen und Blechstärken verwendet werden. Das Experiment war sehr nützlich, da so die wichtigsten Eigenschaften und stark beeinflussbare Parameter ermittelt werden konnten. [5]

Ich habe das in Kapitel 5.1 dargestellte Modell modifiziert, damit ich es mit der Untersuchung vergleichen kann. Der Rahmenabstand war in diesem Fall auch 6m, aber die Spannweite 17m. Auf einer Seite des Daches wurden acht Pfetten befestigt. Die Untersuchung hat sich auch nur mit dem Schubfeld im Dachbereich beschäftigt. Die Länge des Balkens war 9,5m. Die Exzentrizität wurde

auch aktualisiert. Während der Untersuchung wurden zahlreiche Profile und Einstellungen ausprobiert, aber zur Verifikation habe ich nur einige Standardeinstellung ausgewählt. Während der Untersuchung hat die Forschungsgruppe andere Profile von *Lindab* verwendet, deshalb habe ich während der Verifikation diese Elemente eingesetzt. Ein Pfettenhalter wurde durch Schweißen am Balken befestigt und mit vier selbstbohrenden Schrauben an der Pfette verankert. Die Annahmen waren in diesem Fall auch ähnlich, im 5.1 Kapitel vorgestellte Annahmen und Einstellungen wurden angewandt. Zu der genauen Kenntniss der Biegesteifigkeit des Halters wurde wieder ein Modell aus Schalelementen gebaut. Hier war die Verdrehung unter 1kN Last im Schwerpunkt viel größer, 0,00274rad. [5]

In der folgenden Tabelle wurden die Nachgiebigkeit des Daches zu den verschiedenen Ausführungen und die Nachgiebigkeit des FE-Modells zusammengefasst, sehen Sie **Tab. 6**. In jedem Wellental befestigtes Trapezblech wurde nur analysiert. Bei verschiedenen Pfetten und Trapezblechen zeigt das FE-Modell eine gute Anpassung an den Versuch. Das Modell ist in jedem Fall nachgiebiger, und bei größerer Exzentrizität und höherem Profil ist der Unterschied größer. [5]

c [mm/kN]	FEM-Modell	Versuch in Budapest [32]	Unterschied
Z150/LTP 45	1,452	1,416	2,54%
Z150/LTP 20	1,317	1,293	1,86%
Z200/LTP 45	1,730	1,616	7,05%
Z200/LTP 20	1,628	1,515	7,46%

Tab.6: Nachgiebigkeit nach Versuch [32] und nach FE-Modell

Mithilfe der Ergebnisse kann festgestellt werden, dass das Modell für die weiteren Berechnungen ausreichend ist. Das Modell folgt den Veränderungen bei verschiedenen konstruktiven Ausgestaltungen. Natürlich verfügt das Modell über mehrere Beschränkungen, bei zu kleinen Pfetten ist die Verschiebung schon unter dem Eigengewicht zu groß. Zu gegebenen Rahmenabständen können nur gegebenen Profile und Querschnitte verwendet werden.

5 Vergleichsuntersuchungen nach der ECCS-Berechnungsmethode

Das Ziel war es mit einem verifizierten FE-Modell die gültige Berechnungsmethode eines Schubfeldes zu vergleichen und auszuwerten. Im vorherigen Kapitel habe ich das Modell durch eine großmaßstäbliche Untersuchung [32] verifiziert, so dass das Modell für die Vergleichsuntersuchungen geeignet ist. Die folgenden Parameter und Elemente wurden detailliert im weiteren Verlauf dieser Arbeit untersucht: Rahmenabstand, Blechstärke der Pfetten, Trapezblechhöhe und innere Schale.

5.1 Rahmenabstand

Wichtig für die Effektivität des Schubfeldes ist auch der Rahmenabstand. Bei verschiedenen Konstruktionen ist der Rahmenabstand zwischen 4m und 7m. Dieser beeinflusst die Anzahl der Profiltafeln. *Schaul* [39] hat die Effektivität des Schubfeldes untersucht, er hat festgestellt dass, der Rahmenabstand große Auswirkung auf die Steifigkeit hat. Dieser Parameter hat Auswirkung auf die Nachgiebigkeit des Rahmens in Querrichtung. Eine allgemeine Z-Pfette (WZ200) mit einer Blechstärke von 2mm wurde ausgewählt. WZ40- und WZ20-Trapezprofile wurden eingesetzt. [39]

Abb.49. fasst die Ergebnisse zusammen. Bei 5m Rahmenabstand ergibt sich die größte Steifigkeit, bei 4m und bei 6m ergeben sich schon kleinere Steifigkeiten. Die Ergebnisse zeigen eine ähnliche Tendenz wie *Schaul* [39].

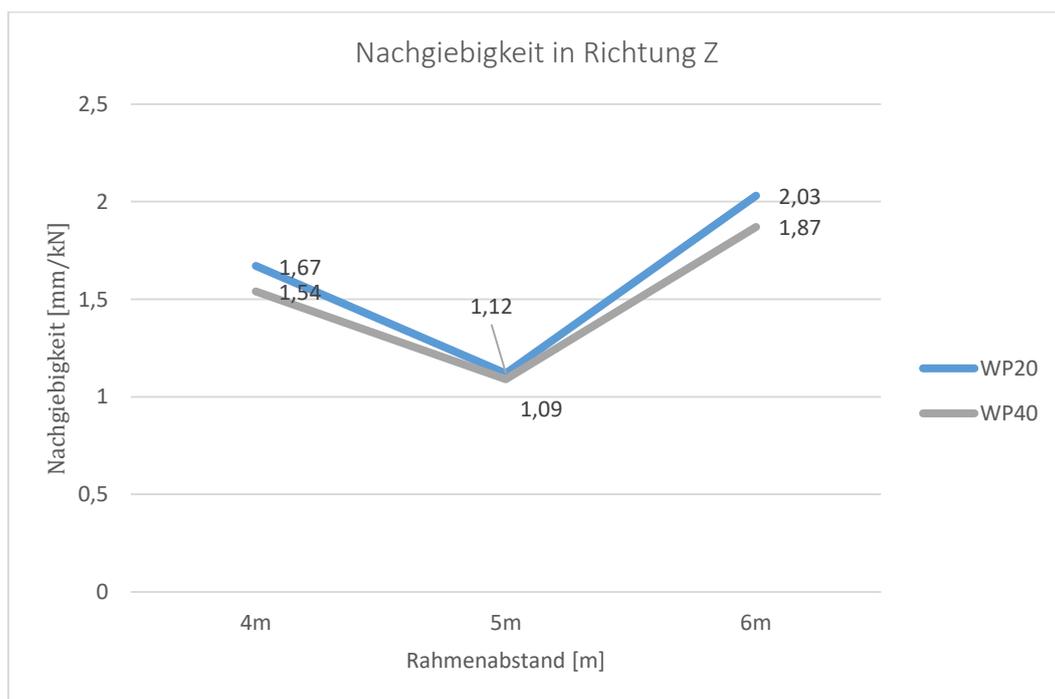


Abb.49: Nachgiebigkeit bei verschiedenem Rahmenabstand

Dies gilt auch für die Aussteifungselemente. Bei 6m sind die Lasten viel größer, was zu großen vertikalen Verformungen führt. Das Schubfeld hat die größte Effektivität in einem 45°-Winkel, diagonal zum Trapezblech. So kann das Blech auf Schub aktiviert werden. Ähnlich wie beim Trapezblech gibt es auch bei den Aussteifungselementen eine optimale Lösung, die Diagonalen funktionieren auch bei einem 45°-Winkel am besten. [39]

5.2 Blechdicke der Pfetten

In Kapitel 4.1 habe ich mich schon mit der Nachgiebigkeit der Pfetten beschäftigt. Der ECCS [3] berücksichtigt nur die Querschnittsfläche in dem c_3 Koeffizient. Zur Vergleichsuntersuchung wurden eine allgemeine Pfette (Z180) und ein Trapezblech (WP35) ausgewählt, die einzelne Variable ist die Blechdicke der Pfette. Die Ergebnisse wurden in **Abb.50** zusammengefasst. Nach ECCS [3] ist eine kleine Reduktion der Nachgiebigkeit bei zunehmender Blechstärke bemerkbar, aber diese Änderung ist sehr klein im Vergleich mit dem FE-Modell. [5], [39]

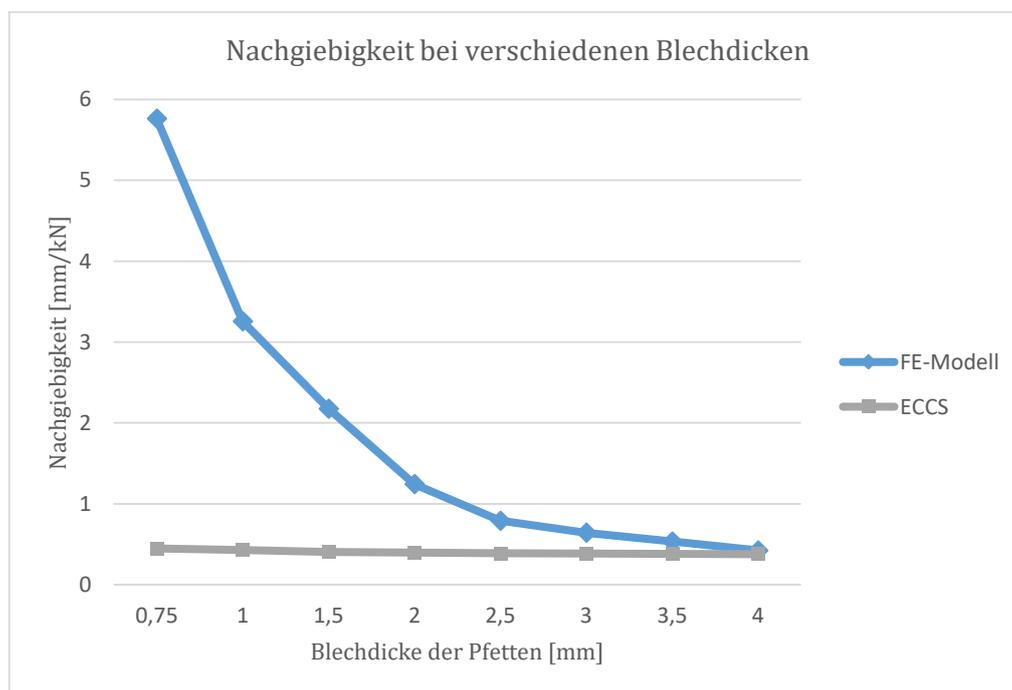


Abb.50: Nachgiebigkeit bei verschiedenen Blechdicken

Im FE-Modell ist eine deutliche Steifigkeitsreduktion bemerkbar bei einer 0,75mm dicken Pfette. Dieser Fehler wurde schon in den früheren Untersuchungen [5] [6], [39], [40] auch festgestellt. Dies ist normal, da die Pfette viel nachgiebiger ist und sich so eine größere Verformung ergibt. In

Tab.7. sind die einzelne Nachgiebigkeitswerten bei verschiedenen Pfetten zusammengefasst, doch nur die c_3 Komponente ändert sich. [5], [39]

Pfette	Profilblech	$c_{1.1}$	$c_{1.2}$	$c_{2.1}$	$c_{2.2}$	$c_{2.3}$	c_3	ECCS [mm/kN]	FEM [mm/kN]	ECCS/FEM [-]
Z140	WP35/1	0,02	0,02	0,021	0,04	0,22	0,047	0,410	1,817	443%
Z180	WP35/1	0,02	0,02	0,021	0,04	0,22	0,043	0,406	2,176	536%
Z200	WP35/1	0,02	0,02	0,021	0,04	0,22	0,04	0,403	2,816	699%

Tab.7: Nachgiebigkeit der Pfetten

In **Abb.51.** ist das Problem sehr gut erkennbar: der Unterschied zwischen FE-Modell und Berechnung ist erheblich größer. Das Liniendiagramm stellt die Nachgiebigkeit und die Verformungen des Trapezbleches und der Verbindungsmittel dar. So kann die geringe Verformungserhöhung erkannt werden, so wie die ECCS [3] die Pfetten berücksichtigt. Grund der großen Abweichung ist, dass der ECCS die Pfetten nur anhand ihrer Querschnittsfläche betrachtet. Die Berechnung sollte das reale Verhalten ergeben: bei größeren Pfetten oder dünneren Blechen sollte die Verformung größer sein. Die Konstruktion kann sich nicht so steif verhalten. [5], [39]

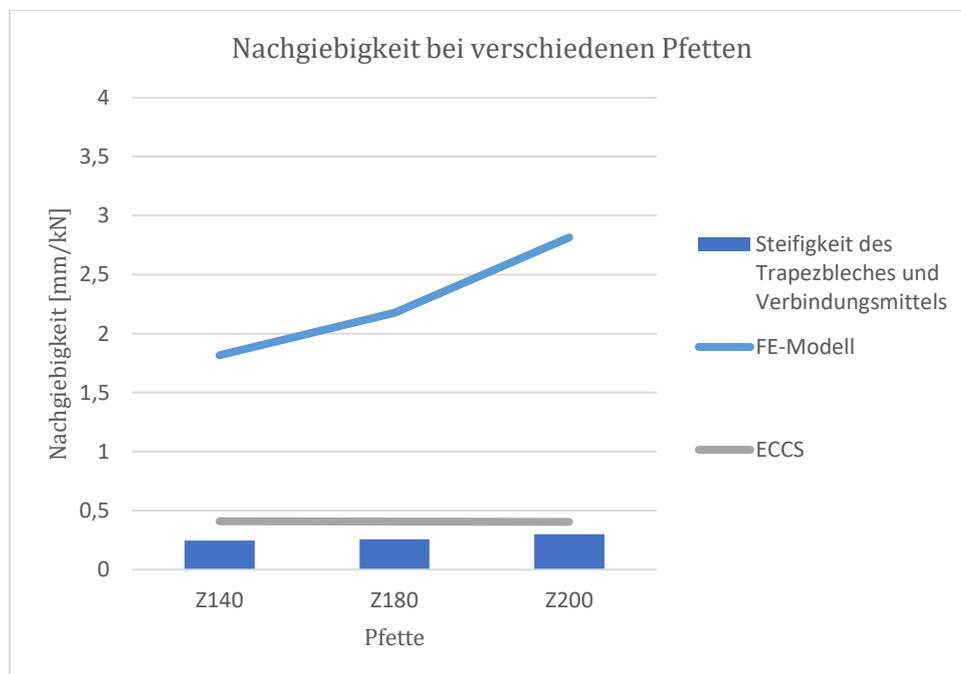


Abb.51: Nachgiebigkeit bei verschiedenen Pfetten

5.3 Trapezblechhöhe

Das Trapezblech beeinflusst auch die Ergebnisse. In Kapitel 4.1 konnte festgestellt werden, dass bei größeren Trapezblechhöhen die Steifigkeit kleiner ist. Dies ist normal, da die Exzentrizität

auch größer ist und der Obergurt weiter vom Schwerpunkt der Pfette liegt. Hier wurden auch verschiedene Trapezprofile ausprobiert, die Ergebnisse wurden in **Abb.52**. zusammengefasst. [5], [39]

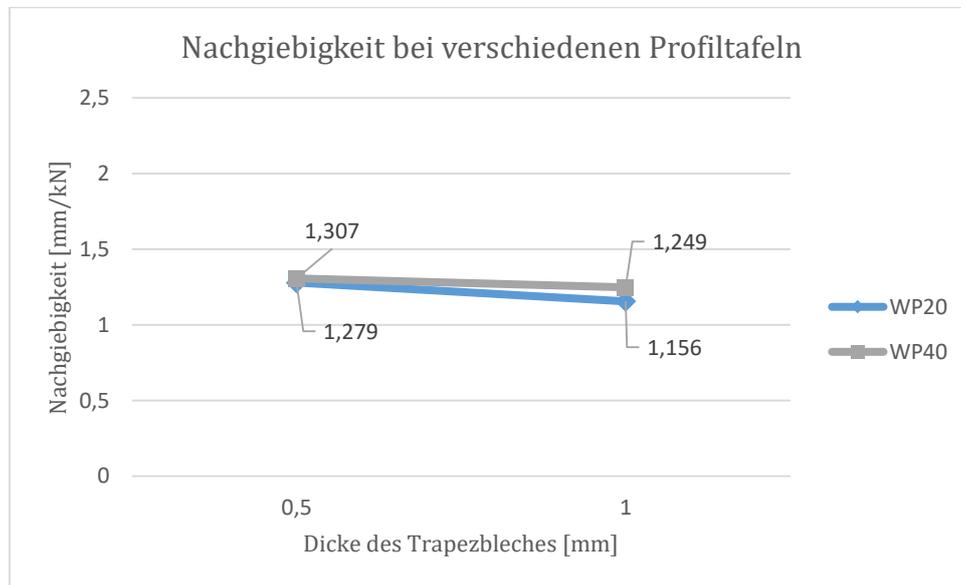


Abb.52: Nachgiebigkeit bei verschiedenen Profiltafeln

Mit der Erhöhung der Blechdicke der Profiltafeln ergibt sich aber eine kleine Reduktion der Nachgiebigkeit im FE-Modell. Die Rechnung nach ECCS [3] beinhaltet auch diese Reduktion, aber die Wirkung des größeren Abstands vom Schwerpunkt ist deutlicher. Die Ergebnisse nach ECCS und dem FE-Modell sind ähnlich und bei verändernden Parametern nähern sie sich an. [5], [39]

5.4 Trapezblech als innere Schale

EN 1993 1-3 [2] und ECCS [3] gibt keine Vorschläge für innere Trapezbleche, aber heutzutage werden oft auch wegen architektonischen Gründen die Rahmen drinnen mit einem Blech verkleidet. Innere Schale reduziert auch die Verformung des Daches und die genaue Kenntnis über die Schubfeldgröße ist wichtig, z.B. unter Erdbebenlast. [32] Wenn man mit einer Steifigkeit rechnet, die kleiner ist als in der Realität, kann es zur Unterdimensionierung des Gebäudes führen. Hier habe ich im Modell nur dickere Z-Profile verwendet, um die große Abweichung wegen der Biegung der Pfetten zu umgehen. Mit der inneren Schale kann man ca. 8-17% Verformungsreduktion erreichen. Innere Schale hat keine so große Effektivität wie die äußere Schale. [5], [39]

5.5 Verifikation des Trapezbleches

Die vorherigen Ergebnisse und Untersuchungen [5], [6], [39] zeigen, dass es zwischen ECCS Berechnung und FE-Modellierung bei verschiedenen konstruktiven Ausgestaltungen Unterschiede gibt. Die Berechnung nach ECCS [3] basiert auf den verschiedenen Steifigkeiten der Elemente Schrauben, Trapezblech und Pfette.

Die einzelnen Nachgiebigkeitskomponenten wurden separat analysiert. Die ersten zwei Werte, $c_{1.1}$ und $c_{1.2}$ berücksichtigen die Nachgiebigkeit des Bleches. Mehrere Forschungen [6], [7], [39] haben schon mit der Analyse des Trapezbleches beschäftigt. In diesem Kapitel wurde das tatsächliche Verhalten des Bleches mit ECCS Berechnungsmethode verglichen.

5.5.1 Verifikation nach Seidel

Zur Verifikation des Trapezbleches diente auch ein Großversuch mit Profiltafeln. *Seidel* hat in seiner Dissertation [6] verschiedene Profilbleche als zweiseitige Bekleidung untergesucht.

Seidel hat auch ein FE-Modell versucht, die Verifikation des Modells erfolgte anhand des großmaßstäblichen Versuchs [6]. Hier wurden die Steifigkeiten mit der Berechnung nach *Strehl* [24] verglichen. Wegen der Vergleichbarkeit hat er eine modifizierte Ersatzsteifigkeit verwendet, so dass *Seidel* [6] die Ergebnisse mit der theoretischen Steifigkeit nach *Strehl* vergleichen konnte. Die ECCS-Bemessungsmethode [3] basiert auf der Bemessung nach *Strehl* und die Grundkomponenten sind gleich. In der folgenden Tabelle sind die Steifigkeiten von *Seidel* [6] zusammengefasst. Die Steifigkeit nach *Strehl* ist in jedem Fall größer als die Steifigkeitswerten aus dem FE-Modell von *Seidel* [6]. Das FE-Modell von *Seidel* ist nachgiebiger, ähnlich meinem Versuch. Die größte Abweichung ist 5% nach *Seidel*, so dass festgestellt werden kann, dass die Berechnung der Steifigkeit des Trapezbleches nach ECCS [3] und nach *Strehl* [24] ausreichend genau ist. [6]

Blechlänge [mm]	Blechtyp	Blechdicke [mm]	S_{Strehl} [kN]	$S_{\text{FE-Strehl}}$ [kN]	$S_{\text{FE-Strehl}}/S_{\text{Strehl}}$ [-]
2000	39/183	0,75	4709	4447	0,94
		1	9718	9239	0,95
		1,25	16775	15943	0,95
3000	85/280	0,75	4787	4621	0,97
		1	9968	9875	0,99
		1,25	17376	17445	1,00

Tab.8: Steifigkeit des Trapezbleches nach *Strehl* und nach dem FE-Modell von *Seidel* [6]

5.6 Modifizierung der Pfettensteifigkeit

Mithilfe der vorherigen Untersuchungen kann festgestellt werden, dass die Berechnung der Steifigkeit des Trapezbleches nach ECCS [3] genau ist. Aber da ein deutlicher Unterschied zwischen FE-Modell und Berechnung zu erkennen ist, habe ich auch die anderen Einflussfaktoren gründlich analysiert. Diese Koeffizienten ergeben sich durch die Deformation der Verbindungsmittel und der Beanspruchung der Pfetten. Eine separate Untersuchung ist in diesem Fall nicht möglich, weshalb das ganze Schubfeld analysiert werden muss. [39], [5]

Bei verschiedenen Blechdicken und Pfettengrößen folgt ECCS nicht dem tatsächlichen Verhalten der Konstruktion. In diesem Fall ergab sich der größte Unterschied, weshalb ich mich mit der Nachgiebigkeit der Pfetten und ihrer Umgebung beschäftige. Die Werte, die die Nachgiebigkeit der Pfetten berücksichtigen, sind stark durch Fehler belastet. Die Berechnung nach ECCS [3] zieht nicht in Betracht, dass die Trapezbleche bei größeren Pfetten immer weiter von den Balken entfernt liegen. Wegen dieser Vernachlässigung gibt es fast keinen Unterschied bei verschiedenen Ausgestaltungen. Trotzdem funktioniert die Konstruktion ganz anders. Die aussteifende Wirkung des Trapezbleches ist nicht maßgebend bei größerer Exzentrizität. ECCS macht keinen Unterschied bei den verschiedenen Profilhöhen und die so berechnete Nachgiebigkeit ist fast immer steifer als das tatsächliche Ergebnis. Deshalb habe eine approximative Berechnung gemacht und mehrere Formeln ausprobiert. *Schaul* [39] hat ähnliche Untersuchungen für Wand- und Dachpaneele gemacht- er hat eine Formel für die Modifizierung durch mehrere Vergleichsuntersuchungen hergestellt. Durch die Anwendung der Formel von *Schaul* kann der Unterschied auf 15-20 % reduziert werden (**Anhang.A9**). [5], [39]

Zuerst wurde die Steifigkeit der Pfette nach EN 1993-1-3 [2] erstellt. Hier wurde nur die Komponente der Pfette nach [39] berücksichtigt. Bei der Berechnung der Steifigkeit der Pfette ergibt EN 1993 1-3 [2] den Kehrwert der Ersatzfedersteifigkeit (56). Dieser Kehrwert ist äquivalent mit der gesuchten Nachgiebigkeit. Die Formel beinhaltet die Geometrie der Pfette: die Höhe des Querträgers, die Breite der Gurte und den Abstand zwischen den Befestigungspunkten. [5], [39]

$$\frac{1}{K} = \left(\frac{4 \cdot (1 - \nu^2) \cdot h^2 \cdot (h_d + b_{\text{mod}})}{E \cdot t^3} + \frac{h^2}{C_d} \right) \quad (56)$$

Dabei ist:

t - Blechdicke der Pfette [mm]

- h, h_d - Gesamthöhe der Pfette (2. Generation) [mm], **Anhang.A7.**
 a - Abstand zwischen Verbindungsmittel und Pfettensteg [mm]
 K - Querbettung [kN/m]
 E - Elastizitätsmodul [N/mm²]
 C_D - gesamte Drehsteifigkeit [kNm/m]

Die Verdrehungsbehinderung der Pfette durch das Trapezblech kann mithilfe der Formel (57) berücksichtigt werden, (**Abb.15.**) Eine Drehfeder wird eingesetzt.

$$C_d = \frac{1}{\left(\frac{1}{C_{d,A}} + \frac{1}{C_{d,C}}\right)} \quad (57)$$

Dabei ist:

- $C_{d,A}$ - Steifigkeit der Drehbettung der Verbindung zwischen Profilblech und Pfette [kNm/mm]
 $C_{d,C}$ - Steifigkeit der Drehbettung entsprechend der Biegesteifigkeit des Profilbleches [kNm/mm]

Die Steifigkeit der Feder besteht aus zwei Komponenten. Eine ist die Steifigkeit der Verbindungsmittel zwischen Profilblech und Pfette (58). Die andere berücksichtigt die Biegesteifigkeit des Trapezbleches (59).

$$C_{d,A} = C_{100} \cdot k_{ba} \cdot k_t \cdot k_{bR} \cdot k_A \cdot k_{bT} \quad (58)$$

Dabei ist:

- C_{100} - Drehfedersteifigkeit (entspricht $C_{d,A}$ für $b_a=100\text{mm}$) [kNm/m], **Anhang.A8.**
 b_t - Breite des Profilblechgurtes [mm]

$$C_{d,C} = \frac{k \cdot E \cdot I_{\text{eff}}}{s} \quad (59)$$

Dabei ist:

- I_{eff} - wirksames Flächenmoment 2. Grades je Breitereinheit des Profilbleches [cm⁴]
 k - Koeffizient nach **Abb.56.** [-]

s - Pfettenabstand [mm]

Die nötige Werten können nach den Formeln: (60), (61), (62), (63) berechnet werden.

$$k_{ba} = \left(\frac{b_a}{100} \right)^2 \quad (60)$$

$$k_{bR} = 1 \quad (61)$$

$$k_{bT} = \left(\frac{b_{Tmax}}{b_T} \right)^{0,5} \quad (62)$$

$$k_A = 1 \quad (63)$$

Dabei ist:

- b_a - Breite des Pfettengurtes [mm]
- b_T - Breite des Profilblechgurtes [mm]
- h, h_t - Rippenabstand des Bleches [mm]

Die in EN 1993 1-3 [2] beschriebene Federsteifigkeit habe ich dem Schubfeldmodell nach *Schau* [39] angepasst. Im Folgenden stelle ich die tatsächliche Berechnung und die neue Nachgiebigkeitskomponente vor. Die minimale Blechdicke ist 0,75mm und die neue Komponente wird c_4 genannt. [5], [39]

Durch ein Beispiel zeige ich die Berechnungsmethode und die neue Komponente ein (WP35-Profilblech und Z180-Pfette). Die in Kapitel 4.1 verwendeten Bezeichnungen sind hier auch gültig. Den k -Wert habe ich nach EN 1993 1-3 [2] auf 6 genommen (Innenfeld und positive Verdrehung), wie in **Abb.56**. zu erkennen ist.

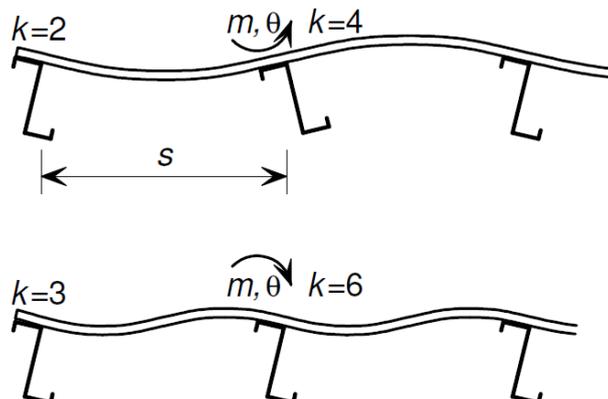


Abb.56: Berechnungsmodelle für den k -Wert [2]

5.6.1 Musterberechnung für die Ermittlung des neuen c_4 Faktors

effektives Trägheitsmoment:	$I_{\text{eff}} := 23.64 \frac{\text{mm}^4}{\text{m}}$	
k-Koeffizient:	$k := 6$	
Breite des Untergurtes(Trapezblech):	$l_{2t} := 119\text{mm}$	
Ausgestaltung der Dachbekleidung:	$b_{T,\text{max}} := 120\text{mm}$	
	$C_{100} := 2 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$	
Koeffizienten:	$k_{bR} := 1$	$k_A := 1.04$
	$k_{ba} := \left(\frac{\frac{B_{1,p}}{\text{mm}}}{100} \right)^2 = 0.5$	$k_{bT} := 1$
	$k_t := \left(\frac{\frac{t_t}{\text{mm}}}{0.75} \right)^{1.5} = 1.54$	

Verbindung zwischen Profilblech und Pfette:

$$C_{D,A} := C_{100} \cdot k_{ba} \cdot k_t \cdot k_{bR} \cdot k_A \cdot k_{bT} = 1614.314\text{N}$$

Biegesteifigkeit des Profilbleches:

$$C_{D,C} := \frac{k \cdot E \cdot I_{\text{eff}}}{b_1} = 21.276\text{N}$$

Steifigkeit der Drehbettung:

$$C_D := \frac{1}{\left(\frac{1}{C_{D,A}} + \frac{1}{C_{D,C}} \right)} = 20.999\text{N}$$

modifizierte Nachgiebigkeitskomponente:

$$c_4 := \left[\frac{4 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \left(H_p - \frac{H_p}{4} \right)^2 \left[\left(H_p - \frac{H_p}{4} \right) + \frac{B_{1,p}}{2} \right]}{E \cdot t_p^3 \cdot a \cdot n_p} + \frac{\left(H_p - \frac{H_p}{4} \right)^2}{C_D \cdot a \cdot n_p \cdot \frac{a}{2 \cdot d_t}} \right] = 2.107 \cdot \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

Schaul [39] hat nach mehreren Versuchen einen optimalen Anteil gefunden. Er hat nur die 5/6 der Pfette berücksichtigt. Nach der Berechnung der verschiedenen konstruktive Anordnungen habe ich festgestellt, dass nur 3/4 der Profilhöhe beeinflusst die Steifigkeit. In diesem Fall ist eine Modifizierung möglich, da nur Pfetten ohne Stegversatz untersucht wurden. Im folgenden Diagramm (Abb.57.) habe ich die Ergebnisse der modifizierten Berechnung (ECCS neu) und des FE-Modells verglichen. Im Vergleich mit der ursprünglichen ECCS-Berechnung [3] sind die Abweichungen viel kleiner und die Nachgiebigkeit folgt der Veränderung der Blechstärke. Die frühere 400-500%-Abweichung hat sich so auf 10-15% verringert. Die neue Formel berücksichtigt schon die Blechdicke der Pfette und die Höhe der Pfette. [5], [39]

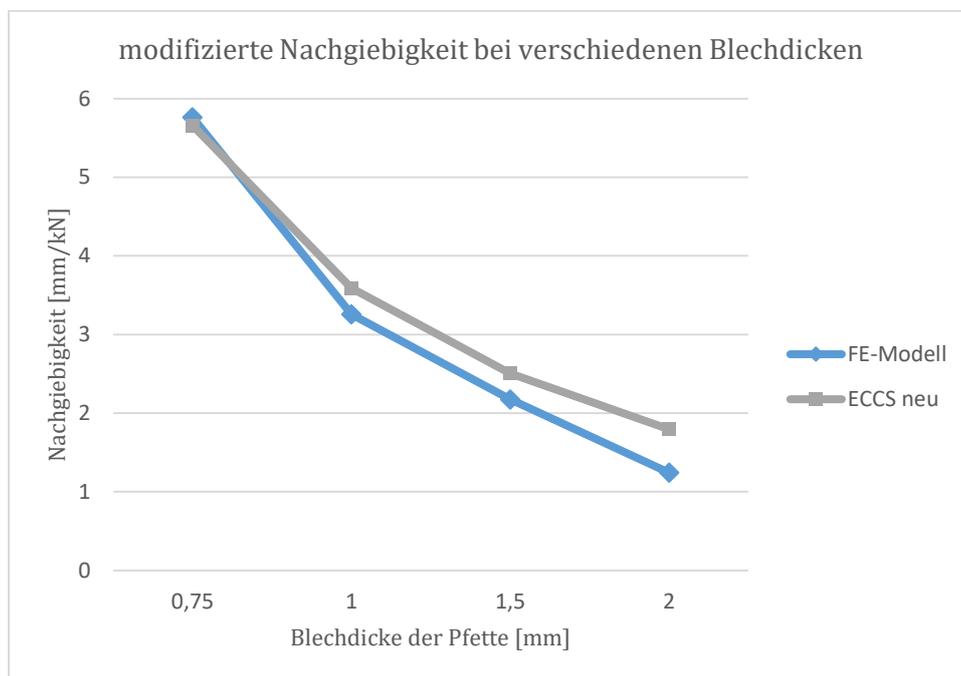


Abb.57. modifizierte Nachgiebigkeit bei verschiedenen Blechdicken, neue c_4 Faktor

Pfette	Profilblech	$c_{1.1}$	$c_{1.2}$	$c_{2.1}$	$c_{2.2}$	$c_{2.3}$	c_3	ECCS [mm/kN]	c_4	ECCS neu [mm/kN]	FEM [mm/kN]	ECCS/FE M [-]
Z140	WP35/1	0,02	0,02	0,021	0,04	0,22	0,047	0,410	1,31	1,72	1,817	-5%
Z180	WP35/1	0,02	0,02	0,021	0,04	0,22	0,043	0,406	2,11	2,51	2,176	15%
Z200	WP35/1	0,02	0,02	0,021	0,04	0,22	0,04	0,403	2,79	3,19	2,816	13%

Tab.9: neue c_4 Faktor und die modifizierte ECCS-Berechnung

Die vorherigen Ergebnisse zeigen, dass der neue c_4 Faktor (64) eine gute Annäherung ergibt. Die Abweichung sinkt auf 13-15% ab. Mithilfe der Modifizierung der ECCS-Berechnung bekommt man Ergebnisse, die sich dem wirklichen Verhalten annähern.

$$c_4 = \left(\frac{4 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \left(H_p - \frac{H_p}{4}\right)^2 \cdot \left(\left(H_p - \frac{H_p}{4}\right) + \frac{B_{1,p}}{2}\right)}{E \cdot t^3 \cdot a \cdot n_p} + \frac{\left(H_p - \frac{H_p}{4}\right)^2}{\frac{C_d \cdot a^2 \cdot n_p}{d_t}} \right) \quad (64)$$

Dabei ist:

- H_p - Höhe des Querträgers [mm]
- $B_{1,p}$ - Breite des Ober- und Untergurtes [mm]
- a - Rahmenabstand [m]
- n_p - Anzahl der Pfetten
- d_t - Wellenlänge des Trapezbleches [mm]
- C_d - Steifigkeit der Drehfederbettung [kNm/m]
- t - Blechdicke der Pfette [mm]

Abb.58. zeigt die einzelnen Nachgiebigkeitskomponenten. Der neue c_4 Faktor stellt 85% der gesamten Steifigkeit.

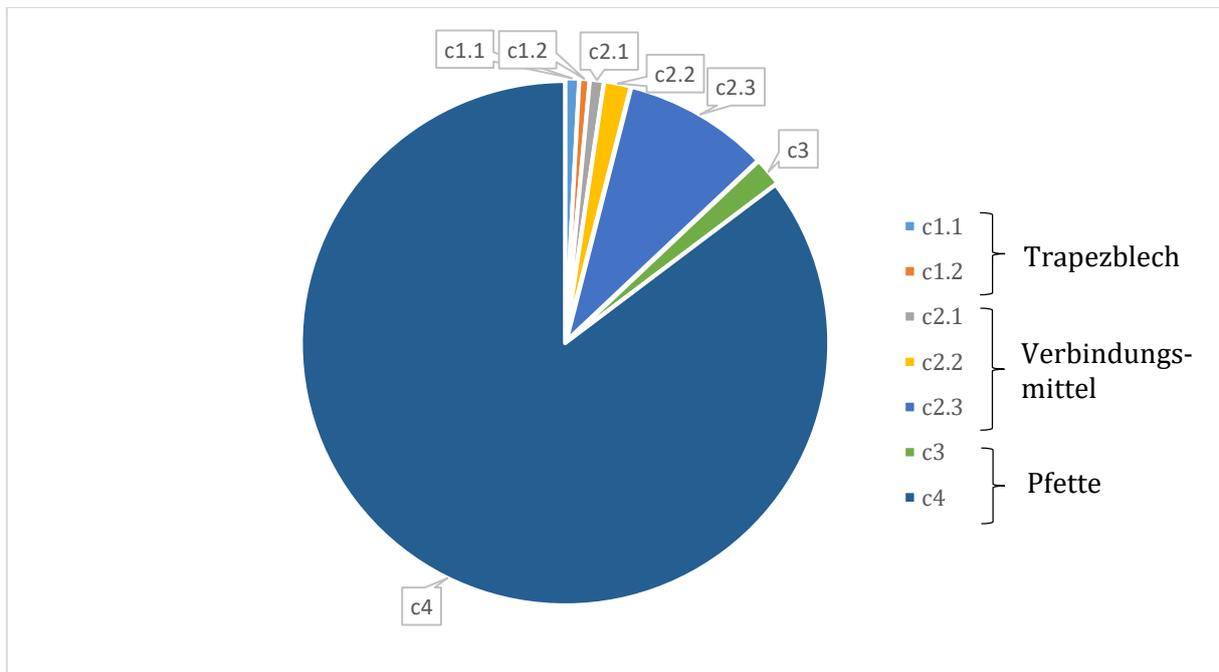


Abb.58: die einzelnen Nachgiebigkeitswerte mit der neuen c_4 Komponente

5.7 Wirkung der sekundären Aussteifungselemente und die Möglichkeiten der Ausgestaltung

In diesem Kapitel beschäftige ich mich mit den Einflussfaktoren der sekundären Elemente und den verschiedenen konstruktiven Ausgestaltungen, z.B. Dachneigung und Spannung.

5.7.1 Wirkung der Dachneigung

ECCS [3] berücksichtigt die Neigung des Daches nicht, obwohl die Dachneigung die Lastverteilung beeinflusst. Bei einem Satteldach wirkt das Schubfeld nicht horizontal und die Dachbekleidung nimmt auch an der vertikalen Lasttragung teil. *Radnay* hat in seiner Dissertation [40] mit der mathematische Ableitung der Rahmenkonstruktionen beschäftigt. [40]



Abb.59: Nachgiebigkeit in Richtung der Belastung beim Satteldach [40]

Abb.59. zeigt die Kräfte und die Komponenten beim Satteldach nach [40]. Mithilfe der Formel (65) kann die Nachgiebigkeit in der Ebene des Daches berechnet werden. Man sollte diese Wirkung auch berücksichtigen, obwohl die ECCS Berechnung [3] sie missachtet. [40]

$$c_{\text{steil}} = c_{\text{dia}} \cdot \cos(\alpha)^2 \quad (65)$$

Dabei ist:

- F - Belastung [kN]
- α - Dachneigung [°]
- Δ - Verschiebung in Richtung der Kraft [mm]

5.7.2 Vorspannung

In manchen Fällen können die Vorteile der Spannung der sekundären Aussteifungselemente sehr gut ausgenutzt werden. Bei einem diagonalen Windverband, bei dem die Elemente nur auf Zug beansprucht werden, kann die Spannung die Effektivität erhöhen. Bei einem X-Windverband arbeitet immer nur ein Diagonalstab und wegen der Spannung ist die Verschiebung viel kleiner. [40]

Abb.60. zeigt einen einfachen diagonalen Windverband und die Hauptträger. Die horizontalen und vertikalen Elemente verfügen in diesem Fall über unendlich große Steifigkeit, eigentlich ist diese Annahme korrekt, weil der Windverband meist als Rundstahl ausgeführt ist. Die Belastung ist 1 kN, dadurch treten, die auf dem linken Bild zu erkennenden, Kräfte auf. In diesem Fall arbeitet immer nur ein Diagonalstab. [40]

Die Abbildung auf der rechten Seite zeigt die Kräfte in den Elementen unter Spannung. Die Vorspannung in den sekundären Elementen ist $F/2\cos\alpha$. Unter 1kN Belastung erfolgt keine größere Belastung, die Spannung bringt keine Mehrbeanspruchung. Aber z.B. bei größeren Spannweiten oder bei langen Hallen kann die Verschiebung vermieden werden. Wegen der Vorspannung erfolgen im zweiten Fall halb so große Verformungen wie im ersten Fall. Die Steifigkeit ist zweimal so groß bei vorgespannter Ausgestaltung, wenn die Elemente mit unendlich großen Steifigkeit verfügen. Eigentlich hängt die Steifigkeitserhöhung von der tatsächlichen Steifigkeit der Elemente ab. [40]

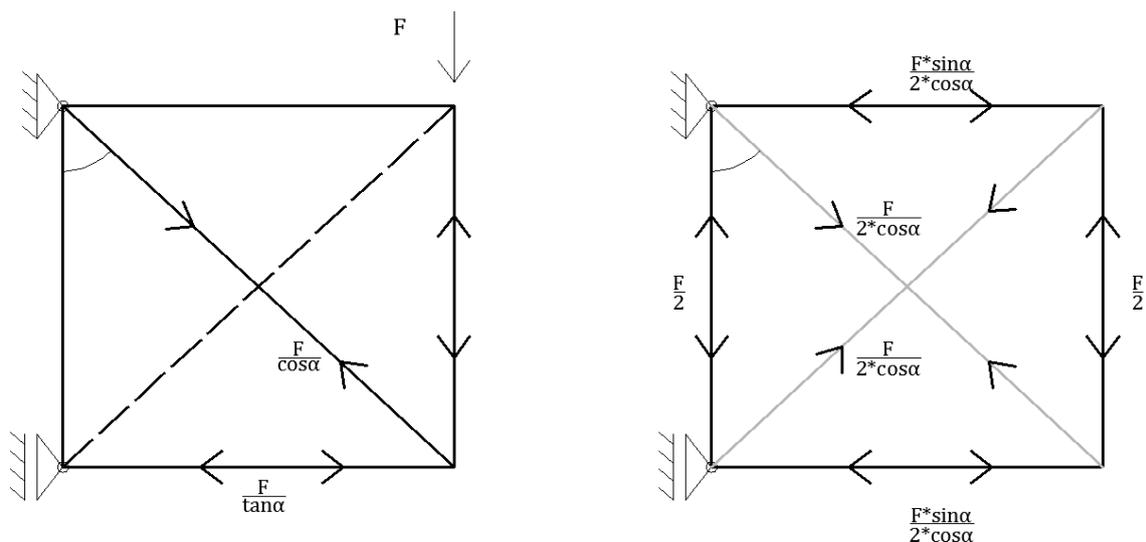


Abb.60: Spannung im Windverband [40]

6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit habe ich Hallen mit Trapezblechbekleidung hinsichtlich der Steifigkeit analysiert. Im ersten Teil wurden die verschiedenen Berechnungsmethoden [3], [22], [23], [24], [28] vorgestellt, und durch eine Musterberechnung wurde die Steifigkeit der Dachbekleidung nach EN 1993-1-3 ermittelt. EN 1993 1-3 [2] gibt bei einer leichten Stahlkonstruktion die Möglichkeit, das Trapezblech als aussteifendes Element zu berücksichtigen. Eine große Anzahl an Literatur [6], [12], beschäftigt sich mit diesen Themen - die Rechnungsverfahren basieren immer auf Untersuchungen. Zuerst wurde ein Literaturresearch ausgeführt, die wichtigsten Regeln und Einflussparameter wurden festgestellt. Beim Schubfeld spielt die Befestigung eine sehr wichtige Rolle, die beste Lösung ist die vierseitige Verschraubung. Nach heutiger Stand der Literatur [5], [6], [12], [32] hat die Steifigkeit des Dach- und Wandbekleidung eine große Auswirkung auf die gesamte Steifigkeit des Gebäudes, im Falle eines Erdbebens spielt sie eine große Rolle. Die Vernachlässigung des Schubfeldes bei einer Leichtkonstruktion kann sehr leicht zur Unterdimensionierung der Aussteifungselemente führen. Beim Erdbeben ohne Berücksichtigung der Steifigkeit der Dachbekleidung wird eine viel kleinere Periodenzeit nach [32] ermittelt. Genaue Kenntnisse des Schubfeldes und ein korrektes Berechnungsverfahren sind allerdings nötig. Frühere Untersuchungen [6], [32] haben festgestellt, dass ECCS [3] Verfahren bei manchen Fällen ungenau ist und die Ergebnisse nicht das tatsächliche Verhalten der Konstruktion verfolgen. Ziel dieser Arbeit war, das gültige Verfahren nach EN 1993-1-3 [2], den ECCS Vorschlag [3] mit einem FE-Modell zu vergleichen und die wichtigsten Einflussfaktoren festzustellen.

Die positive Wirkung des Schubfeldes kann nicht nur beim Trapezblech, sondern auch bei einem Sandwichpaneel oder bei einem Kassettenprofil ausgenutzt werden. Die Ermittlung der Schubsteifigkeit der Dachbekleidung aus Sandwichpaneelen erfolgt auch durch Untersuchungen [14], [15], [16]. Dabei wurde in der vorliegenden Arbeit ein allgemeines Verfahren vorgestellt. Zur Stabilisierung schlanker biegeknick- und biegedrillknickgefährdeter Bauteile kann Schubfeld auch verwendet werden. Das Trapezblech weicht den Obergurt des Trägers aus – es bedeutet eine stabilisierende Wirkung auf den Träger und eine belastende Wirkung auf die Dachbekleidung.

Im zweiten Teil der Arbeit wurde ein detailliertes FE-Modell gebaut, um die verschiedenen Einflussparametern und die Genauigkeit festzustellen. Die Hälfte des Daches (zwei Balken, Pfetten, Trapezblech) wurde als Schale aufgebaut, die Verbindungen wurden als Federn modelliert. Zur Verifikation des Modells wurden die Ergebnisse mit einer großmaßstäblichen Untersuchung [32] verglichen. Während der Verifikation wurde das Modell verfeinert. Zu den Vergleichsuntersuchungen wurden die folgenden Parametern modifiziert: Rahmenabstand,

Geometrie des Trapezbleches und der Pfette, Verschraubung, Abstand der Schrauben, Blechstärke.

Das ECCS Verfahren basiert auf den einzelnen Steifigkeitskomponenten der Elemente und so wurden zuerst diese Komponente verglichen. In den meisten Fällen habe ich ähnliche Werte bekommen, aber bei Änderung der Blechstärke der Pfette war das Unterschied ziemlich groß. Die maximale Abweichung hat 400% erreicht, das FE-Modell war in jedem Fall nachgiebiger. Die europäische Berechnung zieht die Blechstärke der Pfette und die Exzentrizität des Trapezbleches nicht in Betracht, dieser Fehler muss allerdings korrigiert werden. Ziel der Arbeit war, das Verfahren nach ECCS zu verbessern, und neue Steifigkeitskomponente herzustellen. Bei größeren Profilen fällt der Schwerpunkt des Trapezbleches immer ferner vom Träger, deshalb sinkt die Aussteifungswirkung. ECCS berücksichtigt diese jedoch nicht. Eine neue Komponente wurde durch mehrere Iterationen hergestellt.

Der neue c_4 (45) Faktor hängt von der Höhe der Pfette, Blechstärke des Trapezbleches, Anzahl der Schrauben, Breite des Obergurtes, Anzahl der Pfetten und von der Exzentrizität ab. Grund der Formel (45) war die Steifigkeit der Pfetten in EN 1993-1-3 [3], durch mehrere Vergleichsberechnungen wurde es festgestellt, dass nur 3/4 der Profilhöhe die Steifigkeit beeinflusst. Die frühere 400-500% Abweichung hat sich so auf 10-15% verringert. Mithilfe der Modifizierung der ECCS-Berechnung bekommt man Ergebnisse, die sich dem tatsächlichen Verhalten annähern.

FE-Modell wurde auch mit einer Untersuchung aus Budapest [32], [5], Ungarn verglichen, die Untersuchung wurde direkt zur Analysierung des Schubfeldes aufgestellt. Das FE-Modell und die Untersuchung [32] haben Ähnlichkeit aufgewiesen. Es kann festgestellt werden, dass Schubsteifigkeit des Trapezbleches maßgebend ist, fast ähnlich zu einem allgemeinen Windverband. Das Schubfeld kann unter bestimmten Umständen neben herkömmlichen Dach- und Wandverband als Aussteifungselement wirtschaftlich vorteilhaft eingesetzt werden.

Bei der Berechnung des Schubfeldes wird die Neigung des Daches in Norm [3] nicht berücksichtigt, obwohl die Dachneigung die Lastverteilung beeinflusst. Bei einem Satteldach wirkt das Schubfeld nicht horizontal und die Dachbekleidung nimmt auch an der vertikalen Lasttragung teil. Hier wurde auch ein neues Formel (64) hergestellt, damit sicherlich die Steifigkeit ermittelt werden kann.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass mit der Einführung des neuen c_4 Faktors (64) die Berechnung genau ist, aber es wäre allerdings nötig, mehrere Untersuchungen und zahlreiche Berechnungen bei verschiedenen Anordnungen durchzuführen. Eine weitere Entwicklungsmöglichkeit ist die Verkoppelung der Dach- und Wandbekleidung - so wäre der Aussteifungseffekt des Schubfeldes noch effektiver.

Bezeichnungen

Großbuchstaben

A	-	Querschnittsfläche der Querträger [mm ²]
A_a	-	äußere virtuelle Arbeit [Nm]
A_d	-	Größe der Öffnung [cm ²]
A_i	-	innere virtuelle Arbeit [Nm]
A_1	-	Konstante [mm] Anhang.A5.
B_R	-	Breite einer Profilperiode [mm]
B_1	-	Konstante [mm] Anhang.A5.
C_D	-	Drehfedersteifigkeit [kNm/m]
$C_{D,A}$	-	Steifigkeit der Drehbettung der Verbindung zwischen Profilblech und Pfette [kNm/mm]
$C_{D,C}$	-	Steifigkeit der Drehbettung entsprechend der Biegesteifigkeit des Profilbleches [kNm/mm]
$C_{\theta,k}$	-	Verdrehsteifigkeit [kNm/m]
C_{100}	-	Drehfedersteifigkeit (entspricht $C_{d,A}$ für $b_a=100\text{mm}$) [kNm/m], Anhang.A8.
D	-	Druckkraft in den Deckblechen [N]
E	-	Elastizitätsmodul [N/mm ²]
F	-	Schubkraft [kN]
$F_{Ed,S}$	-	zusätzliche Stegbeanspruchung [kN]
$F_{S,Rd}$	-	Grenzlochleibungskraft der Schraube [kN]
G	-	Schubsteifigkeitsmodul vom Trapezblech [kN/m ²]
G^*	-	Scheibenmodul des Schubfeldes [kN/m ²]
H	-	Wandscheibentragfähigkeit [N]
I	-	Flächenträgheitsmoment des Trapezbleches [cm ⁴]
I_{eff}	-	wirksames Flächenmoment 2. Grades je Breitereinheit des Profilbleches [cm ⁴]
I_w	-	Wölbflächenmoment der Pfette [cm ⁶]
I_z	-	Flächenträgheitsmoment des Trägerquerschnitts um die schwache Achse [cm ⁴]
K	-	Querbettung [kN/m]
K_v	-	Faktor zur Berücksichtigung der Verdrehbarkeit des Querträgers [-]
K_{θ}	-	Faktor zur Berücksichtigung des Momentenverlaufs und der Art der Verdrehbarkeit des drehbehindert gestützten Trägers, Anhang.A1.
K_{Tm}	-	Schraubenkraft an der Lasteinleitungsstelle infolge T_m [kN]
K_1, K_2	-	Profilkonstante in Abhängigkeit der Querrandbefestigung [-], Tabelle 5.6 und 5.7 ECCS [3]

K_3	-	Schubfeldwert [3] [-]
L	-	Länge der Querträger [mm]
L_s	-	Stützweite der Trapezprofile [mm]
M^a	-	äußeres Moment [Nmm]
M^i	-	inneres Moment [Nmm]
$M_{pl,k}$	-	plastische Momententragfähigkeit des Trägers [kNm]
M_y	-	Moment um y -Achse [kNm]
σ_w	-	minimale Knitterspannung [N/mm^2]
R_{zd}	-	Auflagerkraft aus Biegebeanspruchung [kN]
$R_{w,RkA}$	-	zulässige Auflagerkraft [kN]
S	-	Schubsteifigkeit [kN/mm]
S_c	-	Nachgiebigkeit des Daches [mm/kN]
S_k	-	Nachgiebigkeit des Rahmens [mm/kN]
S_i	-	Stabilisationskraft in einer Pfette [kN/mm]
T_d	-	Schubfluss infolge der Einwirkungen in GZT [kN/m]
T_{max}	-	maximaler Schubverlauf infolge des linearen Moments [kN/m]
T_m	-	mittlerer Schubfluss [kN/m]
T_{mittel}	-	mittlerer Schubfluss im Obergurt [kN/m]
$T_{1,Rk}$	-	char. Schubflussbeanspruchbarkeit [kN/m]
$T_{2,Rk,N}$	-	Grenzschubfluss zur Einhaltung der Relativverschiebung $h/20$ bei Normalbe- festigung [kN/m]
$T_{3,Rk}$	-	Grenzschubfluss zur Einhaltung des Gleitwinkels $1/750$ [kN/m]
$T(z)$	-	Schubflussverlauf [kN/m]
V_g	-	Bemessungswert der globalen Beulen [kN]
V_i	-	Tragfähigkeit der Schraube auf Abscheren [N]
V_l	-	Bemessungswert der lokalen Beulen [kN]
V_{red}	-	reduzierte Beulsteifigkeit [kN]
V_{sd}	-	Schubkraft [kN]
V°	-	Bemessungswert der Schubfeldtragfähigkeit [kN]

Kleinbuchstaben

a	-	Schubfeldbreite [mm]
a_d	-	Druckzonenhöhe [mm]
α	-	Faktor für die Berücksichtigung der Geometrie [-]

α_1	-	Koeffizient für Berücksichtigung der Pfettenanzahl [-], Tabelle 5.4 ECCS [3]
α_4	-	Koeffizient für Berücksichtigung der Pfettenanzahl [-], Tabelle 5.4 ECCS [3]
b	-	Breite des Trapezbleches [mm]
b_t	-	Breite des Profilblechgurtes [mm]
b_a	-	Breite des Pfettengurtes [mm]
b_o	-	Breite des Obergurtes [mm]
b_T	-	Breite des Profilblechgurtes [mm]
b_u	-	Breite des Untergurtes [mm]
β_1	-	Beiwert zum Herstellen der Kompatibilität zw. Längsstoßverschiebung an den Verbindungsmitteln mit der Pfette [-], Tabelle 5.2 ECCS [3]
c	-	Verschiebung des Trapezbleches infolge 1kN Schubkraft [mm]
$c_{1.1}$	-	Nachgiebigkeit aus der Verformung des Trapezbleches [kN/mm]
$c_{1.2}$	-	Nachgiebigkeit aus Schubverzerrungen der ebenen Querschnittsteile [kN/mm]
$c_{2.1}$	-	Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel [kN/mm]
$c_{2.2}$	-	Nachgiebigkeit des Verbindungsmittels am Längsstoß [kN/mm]
$c_{2.3}$	-	Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel am Längsrand [kN/mm]
d	-	Wellenlänge [mm]
Δv_i	-	Verformung der Schraubenverbindung [mm]
Δ_{red}	-	reduzierte horizontale Verformung des Rahmens [mm]
c_n	-	nötige Schraubenanzahl [-]
c_q	-	Federsteifigkeit der Schraubenverbindung [kN/mm]
η	-	Reduktionsfaktor, Anhang.A2.
f_{L1}	-	Scheibenverschiebung infolge T_m [mm]
f_y	-	Streckgrenze [N/mm ²]
ϕ	-	Winkel zwischen Steg und Obergurt [°]
γ_{Mser}	-	Teilsicherheitsbeiwert [-]
γ_{M1}	-	Teilsicherheitsbeiwert [-]
γ	-	Schubwinkel [rad]
γ_1	-	Verformung ohne Querschnittsverformung [deg]
γ_2	-	Verformung aus Querbiegung [deg]
h	-	Trägerhöhe [cm]
h, h_d	-	Gesamthöhe der Pfette (2. Generation) [mm], Anhang.A7.
h_1	-	Höhe des Trapezbleches [mm]
k	-	Verschiebung des Rahmens [mm]
k	-	Koeffizient nach Abb.54. [-]
l	-	Länge des Profiltafels [mm]

l_2	- Wellenlänge des Trapezbleches für die Berücksichtigung der Befestigungsarten [mm]
m_{xx}	- Biegemoment im Trapezblech wegen Exzentrizität [Nmm]
n	- Anzahl der Pfetten [-]
n_p	- Anzahl der Querunterstützungen bzw. Pfetten
n_{sin}	- Anzahl der nebeneinanderliegenden Profiltafeln
n_s	- Anzahl der Verbindungsmittel im Längsstoß
n_{xx}	- Normalkraft im Trapezblech in Richtung x [kN]
n_{yy}	- Normalkraft im Trapezblech in Richtung y [kN]
n_{yx}	- Schubkraft im Trapezblech in Richtung x [kN]
n_{xy}	- Schubkraft im Trapezblech in Richtung y [kN]
ν	- Querdehnzahl [-]
p	- Abstand der Querrandverbindungsmittel (mm)
ψ	- Modifizierungsfaktor [-]
r	- relative Steifigkeit [-]
s	- Pfettenabstand [mm]
s_p	- Nachgiebigkeit der Befestigungen (Blech/Pfette) [mm/kN]
s_{pr}	- Nachgiebigkeit der Befestigungen (Pfetten/Rahmen) [mm/kN]
s_s	- Nachgiebigkeit der Befestigungen am Profilstoß [mm/kN]
s_{sc}	- Nachgiebigkeit des Verbindungsmittels [mm/kN]
t	- Blechdicke [mm]
t_1, t_2	- Dicke der Deckbleche [mm]
u	- Verschiebung [mm]
\underline{u}	- nichtlineare Verformungsvektor
v	- Verformung des Bleches in Richtung y [mm]
x_i	- Abstand der i Schraube von P Punkt [mm]
z_u	- Abstand zwischen Schwerpunktachse und Referenzachse des Bleches [mm]

Literaturverzeichnis

- [1] EN 1993-1-1:2014-10: *EC 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*
- [2] EN 1993-1-3: 2010-09: *EC 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-3: Allgemeine Regeln - Ergänzende Regelungen für kaltgeformte dünnwandige Bauteile und Bleche*
- [3] *European Recommendations for the Application of Metal Sheeting acting as a Diaphragm – Stressed Skin Design, ECCS (European Convention for Constructional Steelwork), 1995*
- [4] ÖNORM B 1993-1-3 *Eurocode 3- Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-3: Allgemeine Regeln – Ergänzende Regeln für kaltgeformte dünnwandige Bauteile und Bleche*
- [5] Joó, A., Mayer, R., Kenez, A., Racz, A.: *Cladding Stiffness of Industrial Steel building Part 2: Full-scale tests* 2015, Budapest, Hungary
- [6] Seidel, F.: *Scheibentragverhalten von Trapezprofilen ohne Schubfeldausbildung*, 2010
- [7] H. Wright and K. M. Hossain: „*In-Plane Shear Behaviour of Profiled Steel Sheetting*“, *Thin-Walled Structures* Vol. 29, Nos. 1-4, pp. 79-100, 1997
- [8] <http://www.dammer.de/projekte/stahlbau>
- [9] <http://www.lindab.com/hu/pro/about-lindab/news/Pages/Lindab-archiCAD.aspx>
- [10] EN 1090-4: 2015 12 15 *Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken - Teil 4: Technische Anforderungen an kaltgeformte Bauelemente aus Stahl und tragende Bauteile für Dach-, Decken-, Boden- und Wandanwendungen*
- [11] <http://www.kingspanpanels.co.uk/panels/products/insulated-wall-panels/architectural-wall-panels/louvre/>
- [12] Torsten, H.: *Stabilisation by stress skin diaphragm action*, The Swedish Institute of Steel Construction Publication 174, Stockholm, ISBN:91 7127 032 0,
- [13] Kindmann R., Krahwinkel M.: *Bemessung stabilisierender Verbände und Schubfelder Stahlbau 70 (2001), Heft 11*
- [14] Naujoks, B., Hörnel-Metzger, B.: *SandSet-Erforschung von Sandwichelementen als selbst tragende Bauteile. T3299, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2013.*
- [15] Naujoks, B., Hörnel-Metzger, B.: *Sandwichelemente als aussteifendes Schubfeld und tragende Wandscheibe. Stahlbau 84 (2015), Heft 11*
- [16] Dürr, M. *Die Stabilisierung biegedrillknickgefährdeter Träger durch Sandwichelemente und Trapezbleche*, 2008
- [17] Vogel, U., Heil, W.: *Traglast-Tabellen, Tabellen für die Bemessung durchlaufender I-Träger mit und ohne Normalkraft nach dem Traglastverfahren (DIN 18800, Teil 2). 3. Auflage*, Stahl-Eisen-Verlag, 1993
- [18] Heil, W.: *Stabilisierung von biegedrillknickgefährdeten Trägern durch Trapezblechscheiben. Stahlbau 63 (1994), S. 169-178*
- [19] Sauer, R., Wagner, W.: *Experimentelle und numerische Untersuchungen zur aussteifenden Wirkung von Trapezblechscheiben. Stahlbau 64 (1995), S. 289-294*
- [20] *DIN 18807-4:1999-12: Verbindungen zwischen Stahltrapezprofilen und Bauteilen aus Stahl - Teil 4: Ermittlung der Tragfähigkeit durch Versuche*

- [21] Uhl T.: *Stahl-Schubfeld Leistungsbeschreibung des BauStatik-Moduls S834.de Stahl-Schubfeld - EC 3, DIN EN 1993-1-3 mb-news 2/2016*
- [22] Steinhardt, O., Einsfeld, U.: *Trapezblechscheiben im Stahlhochbau - Wirkungsweise und Berechnung*, Die Bautechnik 47 (1970), S. 331 - 335
- [23] Schardt, R., Strehl, C.: *Theoretische Grundlagen für die Bestimmung der Schubsteifigkeit von Trapezblechscheiben - Vergleich mit anderen Berechnungsansätzen und Versuchsergebnissen*, Stahlbau 45 (1976), S. 97 - 108
- [24] Strehl, C.: *Berechnung regelmäßig periodisch aufgebauter Falterwerksquerschnitte unter Schubbelastung am Beispiel des Trapezbleches*, 1976
- [25] Strehl, C.: *Bestimmung der Schubsteifigkeitswerte von Trapezprofilen mit Tabellen-Kalkulationsprogramm*, Stahlbau 74 (2005)
- [26] *European recommendations on the Stabilization of Steel Structures by Sandwich Panels*, CIB publication 379, 2014
- [27] Bryan, E. R.: *Wand-, Dach- und Deckenscheiben im Stahlbau*, Der Bauingenieur 50 (1975), S. 341 - 346
- [28] Davies, J.M., Lawson, R.M.: *The Shear Deformation of Profiled Metal Sheeting*, *International Journal for Numerical Methods in Engineering Vol. 12 (1978)*, S. 1507 - 1541
- [29] Baehre, R., Wolfram, R.: *Zur Schubfeldberechnung von Trapezprofilen*, Stahlbau 55 (1986), S. 175 - 179
- [30] Walter, E.: *Systemintegrierte Befestigungstechnik - Untersuchungen des statischen und dynamischen nichtlinearen Verhaltens von Elementen zur Befestigung der Ausbauelemente, sowie deren Einfluss auf das Last-Verformungsverhalten eines Gebäudes*, Dissertation Universität Innsbruck, 1994
- [31] Joó, A., Kollár, L., Dunai, L.: *Seismic design of steel industrial buildings by reduced DOF models", Steel A new and Traditional material for Buiding 2006 pp. 519-527.*
- [32] *Research and Test at the Budapest University of Technology, Department of Structural Engineering 2014*
- [33] <http://epito.bme.hu/hirek/20140718>
- [34] Uhl, T.: *Stahl-Schubfeld S. 26-31*
- [35] Kolbitsch, A.: *Hochbaukonstruktionen I S. 243-261*
- [36] ECCS TC7 TWG 7.9, *European Recommendations on the Stabilization of Steel Structures by Sandwich Panels, 2014*
- [37] Bogaard, van den, A.W.A.M.J.: *Mathematical theory of stressed skin action in profiled sheeting with various edge conditions 1987 ISBN:90-6814-505-3*
- [38] Bogaard, van den, A.W.A.M.J.: *Diaphragm effect of trapezoidally profiled steel sheets: experimental research into the influence of force application 1989*
- [39] Schaul, P.: *Steel hall structures trapezoidal sheeting's examinations in terms of stiffness, 2014*
- [40] Dr Radnay. L.: *Megépült acél keretszerkezetek hatarallapotainak vizsgalatai: A merevítő rendszer atalakitasa, a burkolat hatasa*

- [41] Papp, F.; *Stahlkonstruktionen Vorlesungsfolien, Budapest*
- [42] A.M. Wrzesien, J.B.P. Lim, Y. Xu, I.A. macLeod, R.M. Lawson: *Effect of stressed skin action on the behaviour of cold-formed steel portal frame* Engineering Structures 105 (2015) 123-136
- [43] <https://www.astron.biz/de/bausystem/produkte/tragkonstruktion/>
- [44] Friedrich. G., Ronald, K.; *Hallen aus Stahl Planungsleitfaden 2011*, Bauformstahl
- [45] <https://www.zbn-civil-engineers.com/single-post/2016/05/05/Schiebung>

Verwendete Programme

- [1] Mathcad 15
- [2] AxisVM X4 Academic Version
- [3] Dlubal RFEM
- [4] Autodesk AutoCAD 2014

Anhänge

A-1

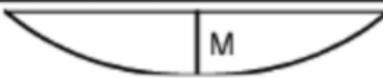
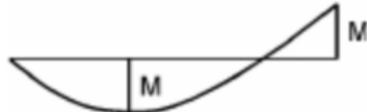
Fall	Momentenverlauf	freie Drehachse	gebundene Drehachse
1		4,0	0
2a		3,5	0,12
2b			0,23
3		2,8	0
4		1,6	1,0
5	 $\psi \leq -0,3$	1,0	0,7

Abb.A1: Faktor zum Berücksichtigung des Momentenverlaufs und der Art der Verdrehbarkeit des drehbehindert gestützten Trägers [1]

Table 7.1 Reduction factor η for each frame in a building (see Annex C for the mathematical expressions for this table)

* †	Values of relative flexibility r																								
	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.50	2.00
3	0.005	0.010	0.015	0.020	0.029	0.038	0.048	0.057	0.065	0.074	0.083	0.091	0.111	0.130	0.149	0.167	0.184	0.200	0.231	0.259	0.286	0.310	0.333	0.429	0.500
4	0.010	0.020	0.029	0.038	0.057	0.074	0.091	0.107	0.123	0.138	0.153	0.167	0.200	0.231	0.259	0.286	0.310	0.333	0.375	0.412	0.444	0.474	0.500	0.600	0.667
5	0.015	0.029	0.043	0.056	0.082	0.106	0.129	0.150	0.170	0.190	0.208	0.225	0.265	0.301	0.333	0.362	0.388	0.412	0.454	0.490	0.521	0.548	0.571	0.659	0.714
6	0.020	0.039	0.057	0.075	0.109	0.140	0.170	0.198	0.225	0.250	0.273	0.296	0.347	0.392	0.432	0.468	0.500	0.529	0.580	0.622	0.658	0.688	0.714	0.805	0.857
7	0.020	0.038	0.056	0.073	0.104	0.134	0.160	0.185	0.208	0.230	0.250	0.268	0.310	0.347	0.379	0.407	0.432	0.455	0.494	0.526	0.554	0.579	0.600	0.677	0.727
8	0.029	0.037	0.083	0.108	0.155	0.198	0.237	0.272	0.305	0.336	0.364	0.390	0.448	0.497	0.540	0.576	0.608	0.636	0.684	0.721	0.752	0.778	0.800	0.871	0.909
9	0.024	0.047	0.068	0.088	0.124	0.157	0.186	0.213	0.237	0.259	0.280	0.298	0.340	0.375	0.406	0.432	0.456	0.477	0.513	0.543	0.569	0.591	0.611	0.683	0.731
10	0.039	0.074	0.108	0.139	0.196	0.246	0.291	0.331	0.367	0.400	0.429	0.457	0.515	0.563	0.604	0.638	0.667	0.734	0.767	0.793	0.813	0.833	0.892	0.923	
11	0.043	0.084	0.121	0.156	0.219	0.275	0.323	0.369	0.408	0.444	0.476	0.506	0.569	0.620	0.663	0.698	0.728	0.754	0.795	0.827	0.852	0.873	0.889	0.938	0.962
12	0.029	0.055	0.079	0.101	0.141	0.176	0.207	0.234	0.258	0.280	0.300	0.319	0.359	0.393	0.421	0.447	0.469	0.488	0.522	0.551	0.575	0.597	0.615	0.685	0.732
13	0.048	0.091	0.130	0.167	0.231	0.286	0.334	0.376	0.413	0.446	0.473	0.502	0.558	0.603	0.641	0.672	0.698	0.721	0.758	0.787	0.811	0.830	0.846	0.898	0.927
14	0.057	0.109	0.156	0.199	0.274	0.339	0.394	0.443	0.483	0.522	0.555	0.585	0.646	0.693	0.734	0.765	0.792	0.814	0.849	0.875	0.895	0.911	0.923	0.959	0.976
15	0.033	0.063	0.089	0.113	0.156	0.191	0.222	0.250	0.274	0.295	0.315	0.333	0.371	0.403	0.430	0.454	0.475	0.494	0.527	0.554	0.578	0.599	0.617	0.686	0.732
16	0.056	0.106	0.151	0.191	0.260	0.318	0.367	0.409	0.446	0.478	0.506	0.532	0.585	0.627	0.662	0.690	0.715	0.735	0.770	0.796	0.818	0.836	0.851	0.901	0.928
17	0.070	0.132	0.187	0.237	0.321	0.390	0.449	0.498	0.540	0.577	0.609	0.637	0.695	0.739	0.774	0.802	0.825	0.844	0.874	0.896	0.913	0.926	0.936	0.966	0.979
18	0.075	0.141	0.199	0.252	0.341	0.414	0.475	0.526	0.570	0.608	0.641	0.670	0.729	0.773	0.808	0.835	0.857	0.875	0.903	0.923	0.938	0.949	0.957	0.981	0.990
19	0.037	0.070	0.098	0.124	0.168	0.204	0.235	0.261	0.285	0.306	0.325	0.342	0.379	0.409	0.436	0.458	0.479	0.497	0.529	0.556	0.579	0.599	0.618	0.686	0.732
20	0.063	0.121	0.170	0.213	0.285	0.344	0.393	0.434	0.469	0.500	0.528	0.552	0.602	0.641	0.673	0.700	0.723	0.743	0.775	0.800	0.821	0.838	0.853	0.901	0.928
21	0.083	0.154	0.216	0.270	0.360	0.431	0.490	0.539	0.580	0.615	0.645	0.672	0.725	0.766	0.797	0.822	0.843	0.860	0.886	0.906	0.920	0.932	0.941	0.968	0.980
22	0.092	0.171	0.239	0.298	0.396	0.474	0.536	0.588	0.631	0.668	0.700	0.737	0.780	0.820	0.850	0.873	0.891	0.906	0.929	0.944	0.956	0.964	0.971	0.987	0.993
23	0.041	0.076	0.106	0.133	0.177	0.213	0.244	0.270	0.293	0.313	0.331	0.348	0.383	0.413	0.438	0.461	0.481	0.499	0.530	0.556	0.579	0.600	0.618	0.686	0.732
24	0.073	0.134	0.186	0.231	0.305	0.364	0.412	0.452	0.486	0.516	0.542	0.565	0.612	0.650	0.680	0.706	0.727	0.746	0.777	0.802	0.822	0.839	0.854	0.901	0.928
25	0.095	0.175	0.241	0.299	0.392	0.464	0.521	0.569	0.608	0.641	0.670	0.695	0.744	0.781	0.810	0.833	0.852	0.867	0.892	0.910	0.924	0.934	0.943	0.969	0.981
26	0.109	0.199	0.274	0.338	0.441	0.521	0.583	0.633	0.675	0.709	0.738	0.763	0.812	0.847	0.873	0.893	0.909	0.922	0.941	0.954	0.963	0.970	0.976	0.989	0.994
27	0.113	0.206	0.285	0.351	0.458	0.539	0.603	0.654	0.696	0.731	0.760	0.785	0.833	0.867	0.892	0.911	0.926	0.938	0.954	0.966	0.974	0.980	0.984	0.994	0.997
28	0.045	0.082	0.114	0.141	0.185	0.221	0.251	0.276	0.298	0.318	0.335	0.351	0.386	0.415	0.440	0.462	0.482	0.499	0.530	0.557	0.580	0.600	0.618	0.686	0.732
29	0.081	0.166	0.201	0.247	0.322	0.380	0.427	0.465	0.498	0.526	0.551	0.573	0.618	0.654	0.684	0.709	0.730	0.748	0.779	0.803	0.823	0.840	0.854	0.901	0.928
30	0.107	0.193	0.264	0.323	0.418	0.489	0.545	0.590	0.628	0.659	0.686	0.709	0.750	0.780	0.817	0.839	0.856	0.871	0.894	0.912	0.925	0.935	0.943	0.969	0.981
31	0.124	0.224	0.305	0.373	0.478	0.557	0.618	0.666	0.705	0.737	0.764	0.787	0.831	0.863	0.886	0.904	0.918	0.930	0.946	0.958	0.967	0.973	0.978	0.990	0.995
32	0.133	0.239	0.325	0.397	0.508	0.590	0.653	0.702	0.741	0.774	0.800	0.823	0.865	0.895	0.916	0.932	0.944	0.953	0.967	0.975	0.981	0.986	0.988	0.996	0.998

* Number of frames in building; † frame number. Note: The number of frames in the building is inclusive of the gable ends. Frame 1 is the end gable, frame 2 the penultimate frame and so on.

Abb.A2: Reduktionsfaktor η , ECCS Annex C 3, Tabelle 7.1 [3]

A-3

Gewindeformschrauben mit Scherbeanspruchung:	
<u>Grenzlochleibungskraft:</u>	$F_{b,Rd} = \alpha f_u d t / \gamma_{M2}$
Für α gilt:	<ul style="list-style-type: none"> – wenn $t = t_1$: $\alpha = 3,2 \sqrt{t/d}$ jedoch $\alpha \leq 2,1$ – wenn $t_1 \geq 2,5 t$ und $t < 1,0$ mm: $\alpha = 3,2 \sqrt{t/d}$ jedoch $\alpha \leq 2,1$ – wenn $t_1 \geq 2,5 t$ und $t \geq 1,0$ mm: $\alpha = 2,1$ – wenn $t < t_1 < 2,5 t$: α ist durch lineare Interpolation zu bestimmen.
<u>Grenzzugkraft im Nettoquerschnitt des Blechs:</u>	$F_{n,Rd} = A_{net} f_u / \gamma_{M2}$
<u>Grenzabscherkraft:</u>	Die Grenzabscherkraft $F_{v,Rd}$ ist durch Versuche zu ermitteln ^{*2)} und in der Form $F_{v,Rd} = F_{v,Rk} / \gamma_{M2}$ darzustellen
<u>Bedingungen:</u> ^d	$F_{v,Rd} \geq 1,2 F_{b,Rd}$ oder $\Sigma F_{v,Rd} \geq 1,2 F_{n,Rd}$
Gewindeformschrauben bei Zugbeanspruchung:	
<u>Beanspruchbarkeit für Durchknöpfen:</u> ^b	
– für statische Belastung:	$F_{p,Rd} = d_w t f_u / \gamma_{M2}$
– bei Windbelastung und gleichzeitigem Auftreten von Wind und statischer Belastung:	$F_{p,Rd} = 0,5 d_w t f_u / \gamma_{M2}$
<u>Beanspruchbarkeit für Ausreißen:</u>	<ul style="list-style-type: none"> Wenn $t_{sup} / s < 1$: $F_{o,Rd} = 0,45 d t_{sup} f_{u, sup} / \gamma_{M2}$ (s ist die Gewindesteigung) Wenn $t_{sup} / s \geq 1$: $F_{o,Rd} = 0,65 d t_{sup} f_{u, sup} / \gamma_{M2}$
<u>Grenzzugkraft bei Schaftbruch:</u>	Die Grenzzugkraft $F_{t,Rd}$ ist durch Versuche zu ermitteln ^{*2)} .
<u>Bedingungen:</u> ^d	$F_{t,Rd} \geq \Sigma F_{p,Rd}$ oder $F_{t,Rd} \geq F_{o,Rd}$
Anwendungsgrenzen: ^c	
<u>Allgemein:</u>	$e_1 \geq 3 d$ $p_1 \geq 3 d$ $3,0 \text{ mm} \leq d \leq 8,0 \text{ mm}$ $e_2 \geq 1,5 d$ $p_2 \geq 3 d$
<u>Bei Zugbeanspruchung:</u>	$0,5 \text{ mm} \leq t \leq 1,5 \text{ mm}$ und $t_1 \geq 0,9 \text{ mm}$ $f_u \leq 550 \text{ N/mm}^2$
<p>^a Diese Tabelle gilt, wenn der Schraubenkopf am dünneren Blech liegt.</p> <p>^b Die angegebenen Werte setzen voraus, dass die Unterlegscheibe ausreichende Steifigkeit hat, um größere Verformungen oder ein Durchknöpfen des Schraubenkopfes zu verhindern.</p> <p>^c Gewindeformschrauben dürfen außerhalb der Anwendungsgrenzen eingesetzt werden, wenn die Tragfähigkeit durch Versuche ermittelt wird.</p> <p>^d Die geforderten Bedingungen sollten erfüllt werden, wenn Verformungskapazität der Verbindung benötigt wird. Werden die Bedingungen nicht erfüllt, ist sicherzustellen, dass die erforderliche Verformungskapazität durch andere Bauteile sichergestellt werden kann.</p> <p>ANMERKUNG^{*2)} Der nationale Anhang darf Weiteres zur Grenzabscherkraft und Grenzzugkraft von Gewindeformschrauben enthalten.</p>	

Abb.A3: Beanspruchbarkeit von Gewindeformschrauben, ECCS Tabelle 8.2 [3]

A-4

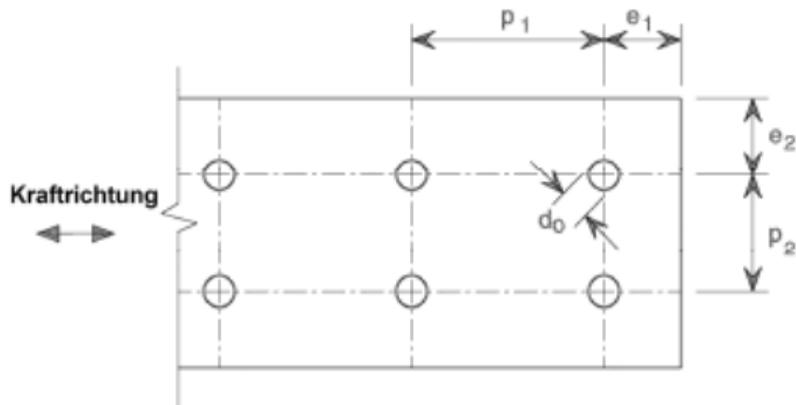


Abb.A4: Rand- und Zwischenabstände von Verbindungsmitteln und Punktschweißungen [3]

A-5

$$A_1 = + \frac{12 \cdot T}{E \cdot t} \cdot \left(\frac{l_1}{\pi \cdot d} \right)^3 \cdot \frac{1}{e_1 - e_2} \cdot \frac{\theta_o + \eta_o \cdot e_2}{\theta_o \cdot \eta_u + \eta_o \cdot \theta_u} \quad (66)$$

$$B_1 = - \frac{12 \cdot T}{E \cdot t} \cdot \left(\frac{l_2}{\pi \cdot d} \right)^3 \cdot \frac{1}{e_1 - e_2} \cdot \frac{\theta_o + \eta_o / e_1}{\theta_o \cdot \eta_u + \eta_o \cdot \theta_u} \quad (67)$$

Dabei ist:

- T - Schubkraft [kN]
- E - Elastizitätsmodul [kN/mm²]
- t - Blechdicke [mm]
- l_1, l_2 - Wellenlänge des Trapezbleches für die Berücksichtigung der Befestigungsarten [mm]
- d - Breite einer Periode [mm]
- e_1, e_2 - mathematische Funktion der Variablen x und y
- θ_o, θ_u - nichtlineare Kombinationen von $\alpha_o, \alpha_w, \alpha_u$
- η_o - dimensionslose Formfaktor [-]
- η_u - dimensionslose Formfaktor [-]

Die α Faktoren können nach (68) ermittelt werden, **Abb.A5.** zeigt die Geometrie des Bleches.

$$\alpha_o = \frac{b_o}{b_u} \quad \alpha_u = \frac{b_u}{d} \quad \alpha_w = \frac{2 \cdot l_w}{d} \quad \alpha = \frac{b_o + 2 \cdot l_w + b_u}{d} \quad (68)$$

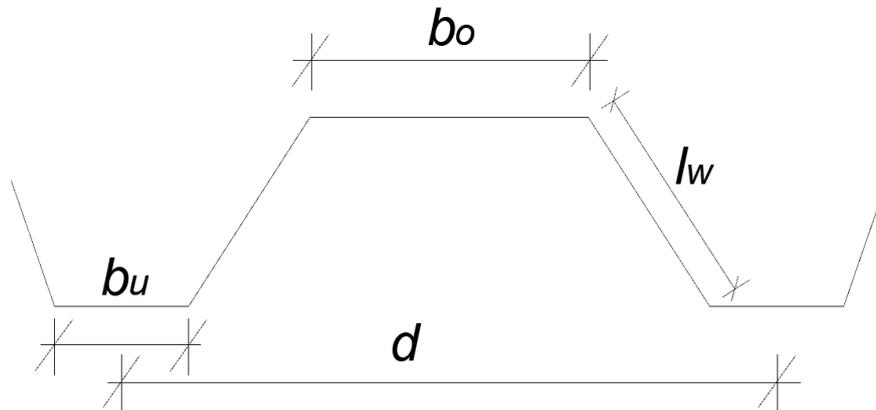


Abb.A5: Geometrie des Trapezbleches [37]

Die nichtlineare Kombinationen von α_o , α_w , α_u können nach (69) und (70) ermittelt werden.

$$\theta_o = \alpha_o^3 + \alpha_w \cdot \alpha_o^2 + 1/2 \cdot \alpha_o \cdot \alpha_u \cdot \alpha_w \quad (69)$$

$$\theta_u = \alpha_u^3 + \alpha_w \cdot \alpha_u^2 + 1/2 \cdot \alpha_o \cdot \alpha_u \cdot \alpha_w \quad (69)$$

$$l_1 = \frac{\pi}{\beta} \cdot \sqrt[4]{\frac{\theta_o \cdot \eta_u + \eta_o \cdot \theta_u}{2} \cdot (\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})} \quad (69)$$

$$l_2 = \frac{\pi}{\beta} \cdot \sqrt[4]{\frac{\theta_o \cdot \eta_u + \eta_o \cdot \theta_u}{2} \cdot (\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})} \quad (69)$$

$$\frac{\pi}{\beta} = \frac{7}{3} \cdot b_d \cdot \sqrt{h/t} \quad (69)$$

$$\zeta = 1 + \frac{(\theta_o + \theta_u) - 2 \cdot (\alpha_o - \alpha_u) \cdot (\theta_o - \theta_u)}{(\alpha_o - \alpha_u)^2 \cdot (\eta_u + \eta_o)} \quad (69)$$

A-6

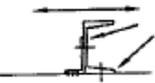
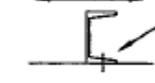
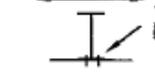
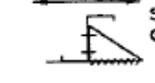
Table 5.3 Design strengths and flexibilities of purlin/rafter connections				
connection number	type of purlin (and cleat)	connection detail	design strength F_{pr} (kN)	flexibility s_{pr} (mm/kN)
1	102x51 rolled steel channel (89x64x7.8 angle cleat x89mm long)	 two 16 mm bolts	4.9	0.84
2		 toes welded	20.0	0.11
3	152x76 rolled steel channel (76x64x6.2 angle cleat x127mm long)	 two 19 mm bolts	14.4	0.60
4		 flange unbolted	7.2	1.20
5		 flange bolted	19.6	0.35
6		 flange bolted	25.0	0.13
7		 stiffened cleat	25.0	0.05
8	254x102x 22 kg/m Universal Beam	 two 16 mm bolts	10.0	2.60
9	203x51x2.0 zed (178x89x9.4 angle cleat x127mm long)	 16 mm bolts	4.4	1.40
10		 stiffened cleat	7.2	0.38

Abb.A6: Tragfähigkeit der Verbindungsmittel zwischen Pfetten/Halter [3]

A-7

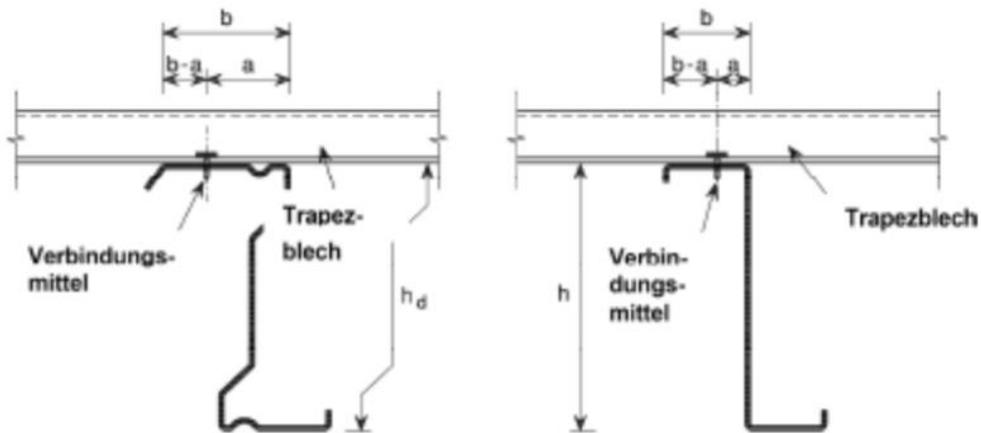


Abb.A7: Pfette und befestigtes Blech, Höhe der Pfetten [2]

A-8

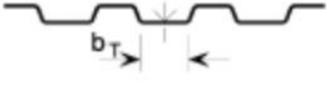
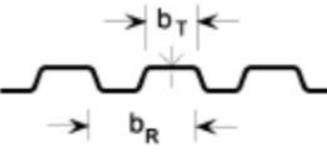
Lage der Profilbleche		Befestigung am		Abstand der Befestigungen		Scheibendurchmesser mm	C_{100} kNm/m	$b_{T,max}$ mm
Positiv ^a	Negativ ^a	Untergurt	Obergurt	$e = b_R$	$e = 2b_R$			
Bei Auflast:								
x		x		x		22	5,2	40
x		x			x	22	3,1	40
	x		x	x		K_a	10,0	40
	x		x		x	K_a	5,2	40
	x	x		x		22	3,1	120
	x	x			x	22	2,0	120
Bei abhebender Last:								
x		x		x		16	2,6	40
x		x			x	16	1,7	40
Dabei ist b_R der Rippenabstand; b_T die Breite des an der Pfette angeschlossenen Untergurtes des Trapezblechprofils.								
<p>K_a steht für eine Stahlabdeckplatte mit $t \geq 0,75$ mm (siehe Darstellung)</p> 						<p>Profilbefestigung</p> <p>– am Untergurt:</p>  <p>– am Obergurt:</p> 		
Die angegebenen Werte gelten bei:								
– Schraubendurchmesser: $\varnothing = 6,3$ mm;								
– Unterlegscheibendicke: $t_w \geq 1,0$ mm.								
^a Die Lage des Profilblechs ist positiv, wenn der schmalere Gurt auf der Pfette liegt, und negativ, wenn der breitere Gurt auf der Pfette liegt.								

Abb.A8: Drehfedersteifigkeit C_{100} für Trapezblechprofile [2]

A-9

$$c_{3.2.c} := \frac{4 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \left(H_p - \frac{H_p}{6}\right)^2 \cdot \left(H_p - \frac{H_p}{6} + \frac{B_{1.p}}{2}\right)}{a \cdot E \cdot t_p^3}$$

Abb.A9: neuer Steifigkeitsfaktor [39]