**Inhaltsverzeichnis**

I. Begriffe und Zahlen 4

I.1. Glossar 4

I.2. Wörter für die Diplomarbeit 11

I.3. Sonstiges 12

I.4. Das verwendete Zahlensystem 13

**I.4.1.** Rechnen mit ganzen Zahlen 13

**I.4.2.** Rechnen mit rationalen Zahlen 14

**I.4.3.** Rechnen mit reellen Zahlen 16

**I.4.4.** Das Zahlensystem in Anwendung 18

II. Problem, Aufgabenstellung und Ziel der Diplomarbeit 22

III. Tipps, Tricks und Tools 23

III.1. Warum wiegt die Diplomarbeit weniger als ein Megabyte? 23

III.2. Wie gebe ich Lambdaquer in Word ein 24

III.3. Tools und Makros 25

**III.3.1.** Der Code 28

IV. Platten – & Schubbeulen nach beiden Normen & beide Modelle 71

IV.1. Allgemeiner Lösungsweg 71

IV.2. Modell der wirksamen Breiten nach dem Eurocode 1993-1-5 71

**IV.2.1.** Geometrie 72

**IV.2.2.** Bruttoquerschnittswerte 73

**IV.2.3.** Abminderungsfaktor ρc 73

**IV.2.4.** Wirksame Breiten 74

**IV.2.5.** Schubbeulen 75

**IV.2.6.** Lokales Beulen aus einer Einzellast 75

**IV.2.7.** Interaktion 76

IV.3. Modell der wirksamen Spannungen nach dem DIN 18800-3 77

**IV.3.1.** Geometrie 77

**IV.3.2.** Bruttoquerschnittswerte 77

**IV.3.3.** Abminderungsfaktor κpx 77

**IV.3.4.** Nachweis 77

**IV.3.5.** Schubbeulen 78

**IV.3.6.** Lokales Beulen aus einer Einzellast 78

**IV.3.7.** Interaktion 80

IV.4. Modell der wirksamen Spannungen nach dem Eurocode 1993-1-5 80

IV.5. Modell der wirksamen Breiten nach der DIN 18800-2 81

IV.6. Untersuchung der Formeln 81

**IV.6.1.** Überführung des Eurocodewichtungsfaktors zur DIN 81

**IV.6.2.** Wirksame Breiten 82

**IV.6.3.** Negative wirksame Breiten in der DIN 83

**IV.6.4.** Herleitung der λ-Berechnungsformeln 85

**IV.6.5.** Wirkungsweise von η und Flanschbonus 87

**IV.6.6.** Einfluss der Schlankheit auf die wirksame Breite 87

**IV.6.7.** Einfluss der Steghöhe auf die wirksame Breite 88

**IV.6.8.** Einfluss des Randspannungsverhältnis ψ auf die wirksame Breite 90

**IV.6.9.** Vergleich der Abminderungsfaktoren für Schubbeulen 94

**IV.6.10.** Einfluss der Steghöhe hw auf die Stegtragfähigkeit 95

**IV.6.11.** Einfluss des Quersteifenabstandes a auf die Stegtragfähigkeit 98

V. Erstes Rechenbeispiel: einfaches Beulfeld mit Flanschen 101

V.1. Modell der wirksamen Breiten nach dem Eurocode 1993-1-5 101

**V.1.1.** Geometrie 101

**V.1.2.** Bruttoquerschnittswerte 101

**V.1.3.** Berechnung von ρc 102

**V.1.4.** Wirksame Querschnittswerte 105

**V.1.5.** Schubbeulen 108

**V.1.6.** Lokales Beulen aus Einzellast 109

**V.1.7.** Interaktion 109

V.2. Modell der wirksamen Spannungen nach der DIN 18800-3 111

**V.2.1.** Geometrie 111

**V.2.2.** Bruttoquerschnittswerte 111

**V.2.3.** Berechnung von κpx 111

**V.2.4.** Nachweis 112

**V.2.5.** Querkraft 112

**V.2.6.** Lokales Beulen aus Einzellast 113

**V.2.7.** Interaktion 113

V.3. Modell der wirksamen Spannungen nach dem Eurocode 1993-1-5 114

V.4. Modell der wirksamen Breiten nach der DIN 18800-2 114

V.5. Zusammenfassung 118

**V.5.1.** Rechenaufwand 119

**V.5.2.** Stahlverbrauch. 119

**V.5.3.** Vergleich zwischen Aufwand und Stahlverbrauch 120

**V.5.4.** Variation der Belastung 120

VI. Berechnung der semiplastischen Tragfähigkeit 122

VI.1. Einbau einer Normalkraft in die Gleichung 124

VI.2. Zusammenfassung 125

VII. zweites Rechenbeispiel: Zweifeldträger mit Gleichstreckenlast 126

VII.1. Modell der wirksamen Breiten nach dem Eurocode 1993-1-5 126

**VII.1.1.** Geometrie 126

**VII.1.2.** Bruttoquerschnittswerte 127

**VII.1.3.** Berechnung von ρc 129

**VII.1.4.** Wirksame Querschnittswerte 134

**VII.1.5.** Schubbeulen 137

**VII.1.6.** lokales Beulen aus einer Einzellast 140

**VII.1.7.** Interaktion 142

VII.2. Modell der wirksamen Spannungen nach der DIN 18800-3 143

**VII.2.1.** Geometrie 143

**VII.2.2.** Bruttoquerschnittswerte 144

**VII.2.3.** Berechnung von κpx 145

**VII.2.4.** Nachweis 149

**VII.2.5.** Schubbeulen 149

**VII.2.6.** Lokales Beulen aus einer Einzellast 150

**VII.2.7.** Interaktion 152

VII.3. Modell der wirksamen Spannungen nach dem Eurocode 1993-1-5 153

VII.4. Modell der wirksamen Breiten nach der DIN 18800-2 155

VII.5. Zusammenfassung 156

**VII.5.1.** Abminderungsfaktoren. 156

**VII.5.2.** Zusammenfassung der einzelnen Nachweise 157

**VII.5.3.** Rechenaufwand 158

**VII.5.4.** Stahlverbrauch 158

**VII.5.5.** Vergleich zwischen Aufwand und Stahlverbrauch 159

VII.6. Variation der Geometrie 160

**VII.6.1.** Träger mit Längssteife am Stegende 160

**VII.6.2.** Träger mit Längssteife in der Spannungsnulllinie 161

**VII.6.3.** Einfluss des Ortes der Steife auf die Tragfähigkeit 164

**VII.6.4.** Einfluss der Stahlgüte auf die Tragfähigkeit 164

VIII. drittes Rechenbeispiel: Zweifeldträger mit vielen Lasten 166

VIII.1. Modell der wirksamen Breiten nach dem Eurocode 1993-1-5 166

**VIII.1.1.** Geometrie 166

**VIII.1.2.** Bruttoquerschnittswerte 168

**VIII.1.3.** Berechnung von ρc 168

**VIII.1.4.** Wirksame Querschnittswerte 176

**VIII.1.5.** Schubbeulen 178

**VIII.1.6.** Lokales Beulen aus einer Einzellast 180

**VIII.1.7.** Interaktion 181

**VIII.1.8.** Sonstige Nachweise 184

VIII.2. Modell der wirksamen Spannungen nach der DIN 18800-3 186

**VIII.2.1.** Geometrie 186

**VIII.2.2.** Bruttoquerschnittswerte 187

**VIII.2.3.** Berechnung von κpx 187

**VIII.2.4.** Nachweis 190

**VIII.2.5.** Schubbeulen 190

**VIII.2.6.** Lokales Beulen aus einer Einzellast 191

**VIII.2.7.** Interaktion 193

**VIII.2.8.** Sonstige Nachweise 194

VIII.3. Modell der wirksamen Spannungen nach dem Eurocode 1993-1-5 194

VIII.4. Modell der wirksamen Breiten nach der DIN 18800-3 196

VIII.5. Zusammenfassung 199

**VIII.5.1.** Zusammenfassung der einzelnen Nachweise 199

**VIII.5.2.** Rechenaufwand 200

**VIII.5.3.** Stahlverbrauch 200

**VIII.5.4.** Vergleich zwischen Aufwand und Stahlverbrauch 201

VIII.6. Variation der Geometrie 202

**VIII.6.1.** Mehr Tragfähigkeit durch dünnere Längssteifen 202

**VIII.6.2.** Beulfeld mit mikroskopischen Steifen 203

**VIII.6.3.** Auswirkung der Längssteifengröße auf die Tragfähigkeit 204

**VIII.6.4.** Variation der Belastung 205

IX. viertes Rechenbeispiel: Kastenstütze mit Druck und Biegung 207

IX.1. Modell der wirksamen Breiten nach dem Eurocode 1993-1-5 207

**IX.1.1.** Geometrie 207

**IX.1.2.** Bruttoquerschnittswerte 209

**IX.1.3.** Berechnung von ρc 210

**IX.1.4.** Wirksame Querschnittswerte 211

**IX.1.5.** Biegeknicknachweis 212

**IX.1.6.** Schubbeulen und Interaktion 215

IX.2. Modell der wirksamen Spannungen nach dem Eurocode 1993-1-5 215

IX.3. Modell der wirksamen Breiten nach der DIN 18800-2 215

**IX.3.1.** Geometrie 215

**IX.3.2.** Bruttoquerschnittswerte 216

**IX.3.3.** Berechnung von κpx 216

**IX.3.4.** Wirksame Querschnittswerte 218

**IX.3.5.** Biegeknicknachweis 219

**IX.3.6.** Schubbeulen und Interaktion 222

IX.4. Modell der wirksamen Spannungen nach der DIN 18800-3 223

IX.5. Zusammenfassung 224

**IX.5.1.** Ergebnisse 224

**IX.5.2.** Stahlverbrauch 224

**IX.5.3.** Rechenaufwand 225

**IX.5.4.** Vergleich zwischen Aufwand und Stahlverbrauch 226

**IX.5.5.** Variation der Belastung 226

X. Auswertung 227

X.1. Kriterium: Stahlverbrauch 227

X.2. Kriterium: Rechenaufwand 228

X.3. Kriterium Abwägung von Rechenaufwand und Stahlverbrauch 229

X.4. Weitere Eigenschaften der Normen 230

X.5. Forderungen für die Zukunft 231

XI. Verzeichnisse 233

XI.1. Tabellen 233

XI.2. Bilder 234

XI.3. Grafiken 235

XI.4. Diagramme 235

XI.5. Herkunft der Tabellen, Bilder, Grafiken, Diagramme 236

XI.6. Quellen und Literatur 237

# Begriffe und Zahlen

## Glossar

**Abminderungsfaktor**: Bei dicken Bauteilen rechnet man Belastung durch Belastbarkeit. Dünne Bauteile erzeugen zusätzliche Belastungen, wenn sie sich ungünstig verformen. Die Belastungen werden nicht addiert. Man verwendet stattdessen die ursprüngliche Belastung und multipliziert die Belastbarkeit mit dem Abminderungsfaktor. Der Abminderungsfaktor liegt zwischen 0 und 1. Er ist 1 bei dicken Bauteilen und nahe 0 bei zu Dünnen. Es gibt 3 Sorten von Abminderungsfaktoren, für jede Art von *Stabilität* einen. In der Diplomarbeit geht es nur um den Abminderungsfaktor für Beulen.

Für das Beulen kann der Abminderungsfaktor auch dazu verwendet werden, um am Träger gewisse Mengen Stahl weg zu rechnen. Damit rechnet man wieder Belastung durch Belastbarkeit, aber in der Belastbarkeit ist ein löchriger Träger enthalten. Der Clou ist, dass ein löchriger Träger mehr trägt, als ein vollständiger Träger mal Abminderungsfaktor.

**Balken**: Dieses Bauteil kann sowohl Kräfte in seiner Richtung tragen (**Normalkraft**), als auch Kräfte senkrecht dazu.

**Elastisch**: Das belastete Bauteil verformt sich und nach dem Wegnehmen der Last hat es keine bleibenden Verformungen. Das Gegenteil ist plastisch.

**Empirische Formel**: Diese Formel wurde aus Versuchen gewonnen und ist damit nicht exakt.

**Festigkeit**: Die Festigkeit ist die maximale *Spannung* (Kraft durch Fläche), die das Material aufnehmen kann. Da Stahl sich stark verformen kann, ohne zu brechen, kann er nur bis zur *Streckgrenze* belastet werden.

**Flächenhalbierende**: Sie teilt den *Querschnitt* des Trägers in eine obere und untere Hälfte mit gleicher Fläche.

**Gelenk**: Ein Gelenk überträgt Kräfte, aber keine *Momente*. Die Bauteile drehen sich um das Gelenk.

**Geometrie**: alle Maße des Trägers.

**Ideale Beulspannung**: Diese Spannung verbeult den Träger. Das Wort ideal bedeutet, dass der Träger perfekt gerade ist und innerlich aus einem makellosem Stahl besteht.

**Infolge** = aus (Dieses Wort kann durch das andere ersetzt werden.)

**Interaktion**: Wirken mehrere Auslastungen gleichzeitig, so werden diese irgendwie miteinander verrechnet. Die einfachste Form ist die Addition. Um gesamte Auslastung möglichst realitätsnah zu erfassen, kommt meist auch der Pythagoras zum Einsatz oder eine spezielle Formel.

**Interpolieren**: Aus einer Versuchsreihe, Tabelle oder Diagramm sind nur für einige x-Werte entsprechende y-Werte angegeben. Meist ist für den gesuchten y-Wert aber kein x-Wert angegeben. Für dieses Problem gibt es eine Formel, in der benachbarte Punkte eingesetzt werden. Dies nennt man interpolieren. Benutzt man 2 Punkte und eine Geradengleichung, dann nennt man das **linear interpolieren**.

**Krümmung**: Die Änderung der Veränderung. Mathematisch ist das die zweite Ableitung. Die Parabel f(x)=x² ist **positiv** **gekrümmt**.

**Moment (Biegemoment)**: Kräftepaar mal Abstand. Hält man eine Hantel mit ausgestrecktem Arm, so benötigt man mehr Kraft diese zu halten, als wenn man sie dicht am Körper hebt. Das Gewicht der Hantel ist die eine Kraft und Gegenkraft im Oberarm ist die andere Kraft. Die Kraft, die durch den Arm wandert, heißt **Querkraft**. Dafür wird keine Muskelkraft benötigt. Diese Kraft mal dem Abstand ist das Moment, für das Muskelkraft aufgewendet werden muss. Die Kraft im Muskel erzeugt im Knochen eine Gegenkraft. Um die Hantel halten zu können, muss die Kraft mal dem Abstand zum Knochen genau so groß sein, wie das Moment, das die Hantel erzeugt.

Das Moment ist wichtig, um Kräfte in Balken erklären zu können.

**Nachweis**: Das Wort wird als Kurzform für Nachweis der Tragfähigkeit verwendet. Meistens errechnet man die Auslastung, die kleiner als 1 sein muss. Hinter der Auslastung wird < 1 geschrieben und Nachweis erfüllt darunter geschrieben.

**Norm**: Eine Norm ist ein großes Dokument, das beschreibt, welche Formel und welches Rechenmodell man verwenden muss. Diese Vorschriften sind bei Formeln notwendig, die durch Versuche gewonnen wurden. Die binomische Formel steht beispielsweise nicht in einer Norm, weil diese Formel mathematisch hergeleitet wurde und überall auf der Welt und zu jeder Zeit immer die gleichen Ergebnisse liefert. Wie viel Gewicht ein Holzbrett aushalten kann, wird von einer Norm beschrieben. Unterschiedliche Normen haben unterschiedliche Formeln und errechnen somit ein unterschiedliches Gewicht. Eine Fichte wächst im Gebirge anders als im Flachland und ein Stahl wird in Spanien auch etwas anders geschmiedet, als in Deutschland. In der Diplomarbeit werden die beiden Normen **DIN** und **Eurocode** untersucht.

**Plastisch**: Das stark belastete Bauteil verformt sich und nach dem Wegnehmen der Last hat es bleibenden Verformungen.

**Querschnitt**

Grafik verschiedene Querschnitte

image1.wmf

Doppel T Profil, U-Profil, Rechteck, Kreis, Kasten, Rohr, Plattenbalken

Die rote Fläche heißt Querschnitt. In vielen Bildern der Diplomarbeit wird nur diese dargestellt.

**Querschnittsklasse**: Sie beschreibt, ab wann ein *Querschnitt* beult. Querschnitte der Klasse 1 beulen nie und bei Klasse 4 beulen sie bevor der Stahl seine *Streckgrenze* erreicht. Je dicker der Querschnitt, desto höher ist die Klasse. Die Diplomarbeit handelt von Klasse 4 Querschnitte.

**Schlank** = dünn. Mit speziellen Formeln wird eine bezogene Schlankheit errechnet, die große Bauteile mit Kleinen vergleichbar macht.

**Schnittgrößen und Querschnittswerte**: Schnittgrößen sind Belastungen und dazu zählen *Moment*, *Querkraft* und *Normalkraft*. Querschnittswerte sind proportional zur Belastbarkeit und dazu zählen: Fläche, *Widerstandsmoment* und *Flächenträgheitsmoment*. Das plastische Moment beschreibt eine Belastbarkeit. Es gibt folgende Paare: Normalkraft und Fläche, Moment und Widerstandmoment, Querkraft und Fläche mit Flächenträgheitsmoment.

**Schwerpunkt**: Der Ort im *Querschnitt*, um den dieser rotieren würde. Er ist wird in vielen Formeln benötigt.

**Sichere Seite**: Eine Berechnung liefert eine höhere Belastung, als die in der Realität ist, oder die Berechnung liefert eine geringere Belastbarkeit als in der Realität. Damit ist sicher, dass das Bauwerk nicht einstürzt.

**Spannungsnullinie**: Der Ort in einem gebogenen *Balken*, wo keine *Spannungen* auftreten. Im *Querschnitt* ist das eine Linie.

**Stab**: Dieses Bauteil nimmt nur Kräfte in seiner Richtung auf. Da dem Bauteil meist auch andere Kräfte zugewiesen werden, wird das Wort *Balken* bevorzugt.

**Stabilität**: Ein Bauteil wird nicht dadurch zerstört, dass es seine Festigkeit überschritten wird, sondern, dass es sich stark verformt. Hängt man an einem dünnen Stab ein Gewicht, so biegt er sich in einer Richtung. Da das Gewicht sich nicht mehr über der Mitte befindet, so biegt er sich weiter weg. Dadurch ist das Gewicht noch weiter entfernt. Dadurch biegt er sich noch weiter weg. Ist der Stab dick genug, so stoppt der Prozess irgendwann. Der Stab wird stark belastet. Diese Versagensform nennt man **Knicken (Biegeknicken)** und dieser Stab heißt **Knickstab**. Die anderen beiden heißen Biegedrillknicken und Beulen.

Auf dem Bild sind 4 Knickstäbe dargestellt. Ist das Gewicht doppelt so weit von der Mitte entfernt, so verformt er sich doppelt so stark. Ist das Gewicht jedoch doppelt so groß, so verformt er sich mehr als das doppelte. Ist der Stab zu dünn, dann zieht das Gewicht den Stab zu Boden.

image2.wmfGrafik Verformung eines Knickstabes bei unterschiedlicher Last

Grafik1.emf

Grafik1.emfGrafik1.emfGrafik1.emf

Es gibt 3 Arten des Stabilitätsversagens. Diese sind Knicken, Biegeknicken und Beulen. Beim Biegeknicken wandert der Querschnitt in eine Richtung. Beim Biegedrillknicken verdreht er sich zusätzlich. Beim Beulen bleibt der Querschnitt an Ort und Stelle, aber einzelne Querschnittsteile verformen sich.

Grafik drei verschiedene Versagensformen

**image4.wmfGrafik1.emf**

**Spannung**: Kraft durch Fläche. Oder Moment durch Widerstandmoment. Positive Spannungen heißen **Zug** und negative heißen **Druck**.

**statische Systeme**

Kräfte werden durch Pfeile dargestellt.

Ein Auflager wird durch ein Dreieck mit Kreis dargestellt und dort werden die Kräfte eingeleitet. Eine Einspannung kann zusätzlich Momente aufnehmen.

Der Balken ist ein dicker Strich und leitet die Kräfte weiter.

Für Gelenke zeichnet man einen kleinen Kreis. Dort kann der Balken sich verdrehen.

Grafik verschiedene statische Systeme

image5.wmf

**Streckgrenze**: Die Streckgrenze beschreibt beim Stahl, bei welcher *Spannung* er sich *plastisch* verformt. Das Formelzeichen für Streckgrenze ist fyd. Es gibt Stähle in unterschiedlicher Stahlgüte, das heißt mit unterschiedlicher Streckgrenze. Die 2 häufigsten Sorten tragen 235N/mm² und 355kN/mm². Diese Stähle haben die Stahlgüte S235 und S355. Vor der Festigkeit wird ein S geschrieben.

**image6.wmfTeilfeldbeulen:**

Grafik ausgesteifer Träger mit Bezeichnung

Ein Einzelfeld befindet sich zwischen Quersteifen und Längssteifen. Wird Einzelfeldbeulen gerechnet, dann entsteht in der Mitte ein Loch. Ein Teilfeld befindet sich zwischen den Quersteifen und beinhaltet Längssteifen. Danach wird Teilfeldbeulen gerechnet und der verbleibende Stahl an den Längssteifen wird dünner.

**Teilsicherheitsbeiwert**: Eine Zahl, mit der Belastungen multipliziert werden und Belastbarkeiten dividiert werden. Je zuverlässiger das Material oder Belastung, desto näher ist diese an 1. Ein Formelzeichen ohne Teilsicherheitsbeiwert erhält zusätzlich den tiefgestellten Buchstaben k für **charakteristisch**. Ist der Teilsicherheitsbeiwert enthalten, erhält es den tiefgestellten Buchstaben d für **Design**. Tiefgestelle Buchstaben heißen Index. Die charakteristische (k) Streckgrenze (y) des Stahls (f) hat das Formelzeichen fyk.

**Trägerteile**

Grafik Bezeichnung der Trägerteile

image7.wmf

**Unendlich klein**: Das Gegenteil von unendlich groß. Während eine unendlich große Zahl vor dem Komma unzählbar viele Ziffern besitzt, hat eine unendlich kleine Zahl nach dem Komma unzählig viele Nullen, aber ist dennoch nicht Null. Unendlich kleine Zahlen sind wichtig zum Grenzwert untersuchen wichtig und entscheidend bei Bedingungen. Z.B. Wenn die Zahl größer ist als 0, dann Formel A, sonst B. Für 1,45·10-15 wird also Formel A verwendet.

**Vereinfachung (Rechenvereinfachung)**: Anstelle eines langen Algorithmus oder Formel wird eine kürzere Vatiante verwendet, um ein Ergebnis schneller berechnen zu können. Hat man die Zahlen a und b, wobei a wesentlich größer ist als b, so lautet die Vereinfachung der Binomischen Formel (a+b)²= a²+ 2·a·b. Die Arbeit b² zu errechnen wird erspart, weil der Einfluss zu gering ist. Eine Vereinfachung ist meistens so gestaltet, dass sie die Belastung erhöht oder die Belastbarkeit reduziert. Weiterhin erschweren Vereinfachungen stark das Verständnis, vor allem, wenn nicht geschrieben wird, dass vereinfacht wurde. In der Diplomarbeit werden weitestgehend auf Vereinfachungen verzichtet.

## Wörter für die Diplomarbeit

In dieser Diplomarbeit werden Wörter und Strukturen verwendet, die falsch verstanden werden können, weil jeder sie anders verwendet. Um Missverständnisse zu vermeiden, werden diese Wörter genauer beschrieben.

Algorithmus / Formelapparat:

Diese Begriffe werden verwendet, wenn nicht eine einzige Formel das Ergebnis liefert, sondern eine ganze Gruppe.

proportional:

Doppelt so viel von der einen Größe bedeutet doppelt so viel von der anderen Größe.  
Die Gleichung für einen proportionalen Zusammenhang lautet: f(x)= a∙x  
Das Zeichen für proportional ist ~. Zum Runden wird ≈ verwendet.

linear:

Doppelt so viel mehr von der einen Größe bedeutet doppelt mehr so viel von der anderen Größe. Die Gleichung für einen linearen Zusammenhang lautet: f(x)= a∙x + b. In einigen Texten ist für linear f(x)= a∙x gemeint. In dieser Diplomarbeit wird das Wort proportional verwendet.

nicht linear:

Doppelt so viel mehr von der einen Größe bedeutet, dass von der anderen Größe nicht doppelt so viel hinzukommt. f(x)≠ a∙x + b. In einigen Texten ist f(x)≠ a∙x gemeint. In dieser Diplomarbeit wird die Bezeichnung nicht proportional verwendet.

entweder oder:

Für die Bedingung muss genau eine Teilbedingung wahr sein, damit die Bedingung wahr ist.

oder:

Für die Bedingung muss mindestens eine Teilbedingung wahr sein, damit die Bedingung wahr ist. Ein und/oder ist überflüssig. In einigen Texten ist gemeint, dass genau eine Bedingung wahr sein muss. In dieser Diplomarbeit wird das Wort entweder oder verwendet.

vernachlässigen und ignorieren:

Das Wort vernachlässigen wird verwendet, wenn eine Sache sehr geringe Auswirkungen hat und auf der sicheren Seite liegt. Ignorieren wird verwendet, wenn die Sache berücksichtigt werden muss, aber aus Gründen der (unzulässigen) Vereinfachung weggelassen wird.

Generisches Maskulinum:

Um die Lesbarkeit zu verbessern und Menschen mit neutralem, gemischtem und mehrfachem Geschlecht nicht zu diskriminieren, wird das generische Maskulinum verwendet.

Schlankheit:

Mit diesem Wort ist immer die bezogene Schlankheit gemeint.

## Sonstiges

Adjektive:

Adjektive wie groß, klein, rechts, links usw. sind immer relativ gemeint. Das Wort relativ vor jedem Adjektiv wird erspart.

Bezug:

Folgt auf einem Satz ein weiterer Satz, ohne dass ein Zeilenumbruch erfolgt, so bezieht sich der Satz auf dem vorherigen. Der Nebensatz oder Wortgruppe, der nur dazu dient, einen Bezug zum vorherigen Satz herzustellen, wird erspart.

> ; < :

Ein Ungleichheitszeichen beschreibt eine Ungleichung, die nach den Regeln der Mathematik umgeformt werden kann. Eine Ungleichung liefert einen Wahrheitswert und ist keine Forderung. Ist gefordert, dass ein Wert kleiner als ein anderer sein muss, dann wird bevorzugt die Funktion MIN verwendet. Somit muss keine zusätzliche Anweisung gegeben werden, wenn diese Forderung nicht erfüllt ist. Der Unterschied zwischen MIN und < ist z.B.

x= MIN( 7 ; 4 ) x= 4

x= 7 < 4 x= Falsch bzw. x = 0

x= 5+(4 < 8) x = 6 und nicht x = 9

:=

Diese Gleichung überschreibt einen Wert und kann nicht nach den Regeln der Mathematik umgeformt werden kann. z.B. bedeutet

x:= x + 7 mit x= 5

, dass x nun den Wert 12 hat.

x= x + 7 hingegen ist mathematisch gesehen eine falsche Aussage.

Bezug auf Literatur:

Wird Literatur genannt, so wurde eine Nummer in einer Klammer angegeben. Die genaue Bezeichnung für die Literatur befindet sich unten im Inhaltsverzeichnis. Bei Gleichungen wird am Zeilenende beschrieben, aus welcher Norm sie entnommen sind. Die Zahl hinter der Gleichung ist die Zahl aus der Norm. Es werden 4 Normen in der Diplomarbeit verwendet. Sie werden nicht mit ihrem vollen Namen verwendet, sondern in verkürzter Form. Dabei bedeutet:

Eurocode = [1] und [2]

Eurocode 1993-1-1 = [2]

Eurocode 1993-1-5 = [1]

DIN = [3] und [4] und [5]

DIN 18800-1 = [3]

DIN 18800-2 = [4]

DIN 18800-3 = [5]

Modell der wirksamen Breiten (ohne zusätzlich genannte Norm) = [1] und [4]

Modell der wirksamen Spannungen (ohne zusätzlich genannte Norm) = [1] und [5]

Die Zahl in der eckigen Klammer verweist auf die Literatur.

Für Tabellen und Diagramme werden die Bezeichnungen besonders stark abgekürzt.

## Das verwendete Zahlensystem

Die Zahlen, die in der Diplomarbeit verwendet werden haben neben dem Wert eine zusätzliche Bedeutung. Die zusätzliche Information hängt davon ab, wie die Zahlen dargestellt werden. Das verwendete Zahlensystem ist so, wie wenn man eine Excelzelle auf Standard formatiert. Dieses Zahlensystem wird hier Standardzahlensystem genannt.

Die Zahlen werden in 3 Gruppen eingeteilt, für die bestimmte Regeln gelten, bzw. erkennbar sein müssen. Es gibt ganze Zahlen, rationale Zahlen und reelle Zahlen. Die rationalen Zahlen unterteilen sich in gebrochene Zahlen und (endliche) Dezimalbrüche.

Das hier verwendete Zahlensystem ist für diese Diplomarbeit gut geeignet. Seine Stärken liegen auf Nachvollziehbarkeit und Verständlichkeit. Ein weiterer Vorteil des Standardzahlensystems ist, dass es kaum Rundungsfehler produziert. Am effektivsten ist dieses Zahlensystem, wenn wenig reelle Zahlen vorkommen.

Die Verständlichkeit beruht darauf, dass die Komplexizität einer Zahl mit jeder Rechenoperation wahrscheinlich zunimmt. Somit durchwandert eine Zahl diese Reihenfolge:

ganze Zahl (Eingabewerte) => gebrochene Zahl (Zwischenwerte) => reelle Zahl(Ergebnis)

Der umgekehrte Weg ist selten und benötigt besondere Zufälle. Diese Zufälle sind bei der Addition, dass das Ergebnis anstelle einiger großer Primfaktoren viele kleine bekommt, und bei der Division heben sich einige Primfaktoren auf. Bei Reellen Zahlen ist der Vorgang irreversibel und alle weiteren Ergebnisse sind reell. Durch Zufall können allerdings Zahlen entstehen, die leicht gerundet einem einfacheren Zahlentypen ähneln. Für neue Exceltabellen lassen sich leich testen, weil jeder Zahlentyp vorkommt und die Menge der Berechnungen in einem Wert ersichtlich ist.

Die einzig wahre und universell richtige Darstellung von Zahlen gibt es nicht. Es gibt alternative Zahlensysteme mit anderen Zielen als der Nachvollziehbarkeit des Rechenweges. Im Bauingenieurwesen wird häufig ein Zahlensystem für Messwerte verwendet. Dabei wird die Zahl auf eine bestimmt Anzahl an Nachkommastellen gerundet. Diese zeigen dem Leser mit jeder Zahl, welches das ungenaueste Messergebnis ist. Für Dokumente ohne Messwerte (wie z.B. Hausaufgaben, Belegarbeiten) sind solche Zahlensysteme völlig ungeeignet, weil Rechenwege nur mit größeren Problemen zurück verfolgt werden können. Wenn man die Messgenauigkeit nicht kennt, dann sollte man kein Zahlensystem für Messwerte verwenden.

### Rechnen mit ganzen Zahlen

Ganze Zahlen unterstützen keine Nachkommastellen und besitzen kein Komma. Ganze Zahlen sind z.B. 12; 600; 0; 1; 2387465; -1; -45. Hat die Zahl zusätzlich kein negatives Vorzeichen, so ist dies auch eine natürliche Zahl.

Zählbare Größen haben von Natur aus eine natürliche Zahl.

Ganze Zahlen besitzen folgende Eigenschaften:

* Primfaktoren
* gerade oder ungerade
* Vorzeichen
* Länge
* letzte Ziffer

Es müssen folgende Regeln für ganze Zahlen erkennbar sein:

* 1. Jede (ganze) Zahl lässt sich in Primfaktoren zerlegen. Z.B 63 = 3·3·7.  
     Zur Verkürzung des Textes wird mit dem Wort Zahl immer ein solcher Zahlentyp bezeichnet, von dem in der Überschrift die Rede ist.
  2. Das Produkt zweier Zahlen beinhaltet alle Primfaktoren der Faktoren.  
     Z.B. 24·36 = 864; (2·2·2·3)·(2·2·3·3)= 2·2·2·3·2·2·3·3.
  3. Wird eine Zahl durch eine teilerfremde Zahl dividiert, so ändert sich der Zahlentyp in eine gebrochene Zahl.
  4. Die Addition ändert die Primfaktoren.
  5. Ist die letzte Ziffer einer mindestens zweistelligen Zahl eine 2;4;5;6;8 oder 0, so ist dies keine Primzahl.
  6. Die Summe zweier gerader Zahlen ergibt eine gerade Zahl.
  7. Die Summe zweier ungerader Zahlen ergibt eine gerade Zahl.
  8. Die Summe eine geraden Zahl und einer ungeraden Zahl ergibt eine ungerade Zahl.
  9. Wird eine ungerade Zahl halbiert, so ändert sich der Zahlentyp in einen Dezimalbruch mit einer Nachkommastelle, die 5 ist. Z.B 15/2= 7,5.
  10. Wird eine nicht durch 5 teilbare Zahl durch 5 geteilt, so ändert sich der Zahlentyp in einen Dezimalbruch mit einer Nachkommastelle, die 2; 4; 6 oder 8 ist.
  11. Die Nullen vor jeder Zahl werden nie angezeigt. Bei Zahlen zwischen –1 und 1 wird genau eine 0 angezeigt. Nicht erlaubt sind: 0025; 0000345; 000; 01; aber 0.
  12. Eine Zahl durch sich selbst ergibt 1.
  13. Wenn in einer natürlichen Zahl jeder Primfaktor doppelt vorhanden ist und die Wurzel gezogen wird, dann entsteht wieder eine natürliche Zahl, ansonsten entsteht eine reelle Zahl (außer 0 und 1).

### Rechnen mit rationalen Zahlen

Rationale Zahlen besitzen ein Komma und es sind alle Ziffern der Zahl bekannt. Diese werden in Dezimalbrüche und gebrochene Zahlen unterteilt.

Dezimalbrüche haben folgende Eigenschaften:

* Primfaktoren
* gerade oder ungerade
* Vorzeichen
* Länge, Nachkommastellen, signifikante Stellen
* letzte Ziffer

Es gelten folgende Regeln für Dezimalbrüche:

* 1. Dezimalbrüche ohne Nachkommastellen sind ganze Zahlen. Z.B. 2,5· 3,2 ergibt wieder eine ganze Zahl. Rationale Zahlen haben immer Nachkommastellen.
  2. Bei einer Zahl (Dezimalbruch) wird nie eine 0 als letzte Ziffer angezeigt. Nicht erlaubt sind: 1,00; 0,50; 0,00; 153,000; 2,0.  
     Aus dieser Regel resultiert, dass eine Zahl durch sich selbst 1 ergibt und nicht 1,00.
  3. Es gelten sinngemäß die Regeln 1;2;4;5;11;12 für ganze Zahlen.
  4. Die Regeln 6 bis 8 für ganze Zahlen gelten nur, wenn die Anzahl der Nachkommastellen der Summanden gleich ist und die Summe der letzen Ziffern nicht 10 oder 0 ist. Z.B. 2,4+3,4= 5,8 aber: 5,62+(-1,52)= 4,1.
  5. Wird eine ungerade Zahl halbiert, so erhöht sich die Anzahl der Nachkommastellen um 1 und die letzte Ziffer ist 5. Z.B. 0,15/2= 0,075. Eine 5 wird nie weggerundet.
  6. Wird eine Zahl, deren letzte Ziffer 5 ist, verdoppelt, so sinkt die Anzahl der Nachkommastellen um 1. Das gleiche gilt bei Multiplikation mit einer geraden natürlichen Zahl.
  7. Wird eine Zahl deren letzte Ziffer nicht 5 ist durch 5 geteilt, so erhöht sich die Anzahl der Nachkommastellen um 1 und die letzte Ziffer ist 2;4;6 oder 8.
  8. Wird eine Zahl, deren letzte Ziffer 2;4;6 oder 8 ist, verfünffacht oder mit einer durch 5 teilbaren ganzen Zahl multipliziert, so sinkt die Anzahl der Nachkommastellen um 1.
  9. Können einige Regeln nicht eingehalten werden, weil die maximale Länge überschritten wird, so ändert sich der Zahlentyp in eine reelle Zahl.
  10. Wird zu einer Zahl eine ganze Zahl addiert, dann ändert sich keine Ziffer nach den Kommastellen. Z.B. 1,425+2 = 3,425.  
      Für eine Summe zweier Zahlen mit unterschiedlichen Nachkommastellen gilt dies sinngemäß. Z.B. 3,90625+ 1,6= 5,50625.
  11. **Es gilt Zahlentreue!** Eine Zahl wird an anderer Stelle in unveränderter Länge wiederverwendet. Es wird NIE gerundet! Wird auf Seite 17 die Zahl 1,425 errechnet, so taucht sie auf Seite 39 nie als 1,4 auf, sondern als 1,425. Dadurch ist die Zahl mit Suchfunktionen findbar. Ein Verweis, wo die Zahl herkommt ist nicht nötig.  
      Daraus resultieren folgende Regeln:  
      Bei Multiplikation mit 10x wird das Komma x Stellen nach rechts verschoben.   
      Bei der Division durch 10x wird das Komma um x Stellen nach links verschoben.  
      Entstandene Nullen als letzte Ziffer werden nicht angezeigt.  
       Z.B. 1337/ 100 = 13,37 und nicht 13,4.
  12. Wird bei einer Rechenoperation der Zahlentyp nicht auf reell geändert, so entstehen keine Rundungsfehler.
  13. Die Zahlendungen 25; 75; 125; 375; 625; 875 kennzeichnen lange Zahlen als Dezimalbruch. Diese entstehen häufig bei der Division durch eine Zahl, die viele Zweien als Primfaktoren enthalten. Z.B. 4,0625; 36,25.

Gebrochene Zahlen haben folgende Eigenschaften:

* Primfaktoren
* Vorzeichen
* Periode und deren Länge
* Nachkommastellen, signifikante Stellen

Führende Nullen werden nicht als signifikante Stellen gezählt. Achtel-Endungen (sowie die 25 und 75) und Perioden werden als eine signifikante Stelle gezählt. Beginnt eine Zahl mit einer 1 und einer weiteren Ziffer, so werden beide Ziffern als eine signifikante Stelle gezählt. Z.B. haben 17 & 0,05 eine und 4,625 & 7,333 zwei signifikante Stellen.

Es gelten folgende Regeln für gebrochene Zahlen:

1. Es gelten sinngemäß die Regeln 1;2;3;9;10;**Zahlentreue**;12 für Dezimalbrüche.
2. Die einstellige Periode wird kenntlich gemacht, in dem sie mindestens 3 mal wiederholt wird. Ist die Periodenziffer größer als 4, so darf die letzte Ziffer auch um 1 größer angezeigt werden. Z.B 4,333; 0,888; 0,889. Bei 0,1666; 0,1667; 0,8333 (egal wo das Komma ist), darf eine Ziffer weggelassen werden. Z.B. 0,0833.
3. Wird eine (gebrochene) Zahl mit einstelliger Periode mit 9 multipliziert, so verschwindet die Periode und der Zahlentyp ändert sich in einen Dezimalbruch (oder vielleicht in eine ganze Zahl). Z.B. 1,444·0,9= 1,3
4. Eine zweistellige oder dreistellige Periode muss mindestens 2 mal wiederholt werden. Z.B 7,2323.
5. Vielfache der Periode 09 bedeuten eine Division durch 11.
6. Vielfache der Periode 037 bedeuten eine Division durch 27 und Vielfache der Periode 027 bedeuten eine Division durch 37.
7. Die Periode 142857 stellt eine Division durch 7 dar und die 6 Ziffern werden einmal dargestellt. Z.B. 0,857142. Die maximale Länge wird allerdings schnell überschritten, sodass sich die Zahl in eine reelle Zahl ändert. Weiterhin wird die Zahl zu einer reellen Zahl gerundet, wenn diese von geringer Wichtigkeit ist.
8. Wird eine Zahl in Regel 3 bis 7 mit einer Zahl multipliziert, die die passenden Primfaktoren enthält, so ändert sich der Zahlentyp in einem Dezimalbruch. Z.B. 0,3703703·27= 10 (ganze Zahl).
9. Ist die Periode länger als 3 Ziffern, dann wird der Zahlentyp als reell eingestuft.

Rechenoperationen erhöhen wahrscheinlich die Komplexität einer Zahl. Das bedeutet, dass der Zahlentyp erhöht wird oder die signifikanten Stellen steigen. In diesem Absatz wird auf das Wort „wahrscheinlich“ in jedem Satz verzichtet. Reelle Zahlen sind am komplexesten und ganze Zahlen sind am einfachsten. Bei einer Addition (oder Subtraktion oder Multiplikation) hat das Ergebnis den höchsten Zahlentyp der beiden Summanden. Eine Division durch eine kurze Zahl erzeugt eine gebrochene Zahl und eine Division durch eine lange Zahl erzeugt eine reelle Zahl. Harte Formeln wie Sinus, Logarithmus, nicht ganzzahlige Potenzen und Wurzeln erzeugen reelle Zahlen. Reelle Zahlen sind nie selbstgewählt. Wird mit einer reellen Zahl gerechnet, so ist auch das Ergebnis reell.

### Rechnen mit reellen Zahlen

Reelle Zahlen sind der komplexeste Zahlentyp. Das Rechnen mit ihnen ist verlustbehaftet und es entstehen Rundungsfehler. Sie besitzen so viele Nachkommastellen, dass nicht alle bekannt sind.

Reelle Zahlen haben folgende Eigenschaften

* Einzigartig
* Länge, Nachkommastellen, signifikante Stellen
* Vorzeichen
* Letzte Ziffer (aber keine Primfaktoren)

Es gelten folgende Regeln für reelle Zahlen:

1. Es gelten sinngemäß die Regeln 11;12 für ganze Zahlen.
2. Es gelten sinngemäß die Regeln 2;10 und **Zahlentreue** für Dezimalbrüche.
3. In Excel und im Taschenrechner werden reelle Zahlen mit so vielen Stellen dargestellt bis die Zeile voll ist. Um Schreibarbeit in Worddokumenten zu sparen wird eine reelle Zahl mit mindestens 4 signifikanten Stellen dargestellt. Z.B. 367,3; 0,002348; 98,24. Kommen in der Umgebung fast keine rationalen Zahlen vor, dann werden sie mit 3 signifikanten Stellen dargestellt. Weitere Regeln erhöhen die Anzahl der Stellen.
4. Die Anzahl der Stellen wird um eins erhöht bei:  
   Die Zahl beginnt mit 1.  
   Die Zahl endet mit 5.  
   Die Zahl hat kein Komma.
5. Eine 1;3;7 oder 9 als letzte Ziffer zeigt, dass es sich bei der Zahl wahrscheinlich um eine reelle Zahl handelt. Regel 4 kann außer Kraft gesetzt werden.
6. Wichtige Zahlen haben mehr Nachkommastellen. Es gilt Zahlentreue!
7. Endet eine Zahl mit 0, dann werden bis zu 3 Stellen mehr angezeigt, bis sie nicht mehr mit 0 endet. Endet die Zahl mit 3 Nullen, dann ändert sich der Zahlentyp in einen Dezimalbruch.
8. Eine reelle Zahl ist so darzustellen, sodass sie nicht mit rationalen Zahlen verwechselt werden kann. Eine Periode darf nicht erkennbar sein und die Zahl darf nicht mit 25; 75; 125; 375; 625; 875 enden. Wiederholt sich die Periode 4 mal, so ändert sich der Zahlentyp in eine gebrochene Zahl.
9. Reelle Zahlen sind länger darzustellen, wenn die Ziffern sonst einen Dezimalbruch ergeben, der die Potenz einer kleinen Zahl zeigt.
10. Das Runden auf eine 1;3;7 oder 9 wird leicht bevorzugt.  
    Das Abrunden wird leicht bevorzugt.
11. Beispiele:  
    Zahl in Wirklichkeit -> Zahl in Text (Zahl in Umgebung mit wenig rationalen Zahlen)  
    25,232456 -> 25,23 (25,2)  
    25,252456 -> 25,253 (25,3)  
    25,632456 -> 25,63 (25,63 da 256= 2^8)  
    2523,2456 -> 2523 (2523)  
    2524,2456 -> 2524,3 (2524)  
    253,52456 -> 253,53 (253)  
    15,244456 -> 15,244 (15,24)  
    15,342456 -> 15,343 (15,3)  
    15,432456 -> 15,43 (15,43)  
    15,404456 -> 15,404 (15,404)  
    15,305456 -> 15,305 (15,3)  
    15,300456 -> 15,3004 (15,3)  
    15,300046 -> 15,3 Dezimalbruch (15,3 reell)  
    15,000456 -> 15,0004 reell (15 natürliche Zahl)  
    3,1249856 -> 3,12499 (3,12)  
    71,111056 -> 71,11 gebrochen (71,11 gebrochen)  
    6,5612456 -> 6,5612 da 6561= 38 (6,56)
12. Einige reelle Zahlen treten häufig auf. Einige Zahlen sind für folgende Bedeutung reserviert (das Komma kann an beliebiger Stelle sein):  
    1,732= 30,5  
    1,414= 20,5  
    0,866= sin(Pi/3)= 0,750,5  
    3,14= Pi (Komma nur nach der 3)
13. Wenn reelle Zahlen addiert werden, sollten sie die gleiche Anzahl an Nachkommastellen haben. Das gleiche gilt für reelle Arrays.
14. Die Regeln für gerade und ungerade Zahlen gelten nicht. Z.B. 2,534+ 7,123= 9,656 oder 9,657 oder 9,658.
15. Reelle Zahlen können keine Eingabewerte (außer Konstanten) sein. Beinhaltet ein Eingabefeld eine Reelle Zahl, so wurde diese stehs berechnet.

Messwerte sind von Natur aus reelle Zahlen, von denen aber nur wenig signifikante Stellen bekannt sind. Werden Messwerte verwendet, dann gibt es im Standardzahlensystem Probleme: vom Wesen her sind diese reell, verhalten sich aber wie Dezimalbrüche. Gleiche Probleme gibt es, wenn Zahlen aus einem anderen Zahlensystem importiert werden.

Z.B. 0,892,00= 0,79; nächster Rechenschritt; 0,79·100,00= 79,00. Die 79 verhält sich wie eine natürliche Zahl, ist aber reell. Obendrein widerspricht der Zahlentreue, dass Zahlen nicht mit 0 enden, da 79,00 als 79 weiter verwendet wird.

### Das Zahlensystem in Anwendung

Man hat folgenden Fall: Die Formeln fehlen, aber der Rechenweg muss verstanden werden. Dies tritt häufig auf, wenn die Berechnung im portablen Dokumentformat vorliegt, ein wichtiger Schmierzettel unter dem Schreibtisch auftaucht oder das Buch mit den Formeln liegt einfach zu weit weg.

Folgendes wurde gerechnet.

Tabelle Zahlen mit 2 Nachkommastellen

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | a | e | ge |
| N | 15,00 | 30,00 | 15,00 |
| A | 0,20 | 0,05 | 0,30 |
| L | 2,22 | 1,50 | 6,50 |
| f | 0,85 | 0,85 | 0,91 |
| gA | 3,00 | 1,50 | 4,50 |
| gL | 33,33 | 45,00 | 97,50 |
| K | 85,00 | 57,38 | 400,03 |
| Kges | 277,38 |  | 400,03 |

Alle Zahlen sind auf 2 Nachkommastellen begrenzt. Das mag der eine oder andere schick finden, aber für das Verständnis was gerechnet wurde, ist das nur wenig hilfreich. Bei weiteren Rechnungen ist Zahlentreue nicht zu erwarten.

Grundrechenarten lassen sich nur anhand der Größe der Zahl finden. Z.B. 15,00·0,20= 3,00.

So sehen die Werte aus, wenn man etwa 3 signifikante Stellen angibt.

Tabelle Zahlen mit 3 signifikanten Stellen

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | a | e | ge |
| N | 15 | 30 | 15 |
| A | 0,200 | 0,050 | 0,300 |
| L | 2,22 | 1,50 | 6,50 |
| f | 0,850 | 0,850 | 0,912 |
| gA | 3,00 | 1,50 | 4,50 |
| gL | 33,3 | 45,0 | 97,5 |
| K | 85,0 | 57,4 | 400 |
| Kges | 277 |  | 400 |

Bei der Anzahl N können Nachkommastellen auftreten. Bei konsequent angewendeten Messwertzahlensystemen ist Zahlentreue möglich. Zahlentreue ist für das seitenübergreifende Verständnis wichtig. Für dieses aus dem Kontext gerissene Beispiel bietet auch diese Zahlendarstellung keine zusätzlichen Hinweise, wie diese Zahlen errechnet wurden.

So sehen die Zahlen in Excel und in der Diplomarbeit aus.

Tabelle Zahlen im Standardzahlenformat

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Excel | a | e | ge |  | Dokument | a | e | ge |
| N | 15 | 30 | 15 |  | N | 15 | 30 | 15 |
| A | 0,2 | 0,05 | 0,3 |  | A | 0,2 | 0,05 | 0,3 |
| L | 2,2222222 | 1,5 | 6,5 |  | L | 2,222 | 1,5 | 6,5 |
| f | 0,85 | 0,85 | 0,911752 |  | f | 0,85 | 0,85 | 0,9117 |
| gA | 3 | 1,5 | 4,5 |  | gA | 3 | 1,5 | 4,5 |
| gL | 33,333333 | 45 | 97,5 |  | gL | 33,33 | 45 | 97,5 |
| K | 85 | 57,375 | 400,03119 |  | K | 85 | 57,375 | 400,03 |
| Kges | 277,375 |  | 400,03119 |  | Kges | 277,375 |  | 400,03 |

Dieses Zahlensystem liefert neben dem Wert noch Eigenschaften, die genutzt werden können, um den Rechenweg zu rekonstruieren.

Tabelle Eigenschaften der Zahlen

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Typ | a | e | ge |  | Letzte Ziffer | a | e | ge |
| N | natürlich | natürlich | natürlich |  | N | 5 | 0 | 5 |
| A | dezimal | dezimal | dezimal |  | A | 2 | 5 | 3 |
| L | gebrochen | dezimal | dezimal |  | L | (2) | 5 | 5 |
| f | dezimal | dezimal | reell |  | f | 5 | 5 | (2) |
| gA | natürlich | dezimal | dezimal |  | gA | 3 | 5 | 5 |
| gL | gebrochen | natürlich | dezimal |  | gL | (3) | 5 | 5 |
| K | natürlich | dezimal | reell |  | K | 5 | 5 | (9) |
| Kges | dezimal |  | reell |  | Kges | 5 |  | (9) |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Primfaktoren | a | e | ge |  | Län. Sig. Na. | a | e | ge |
| N | 3·5 | 2·3·5 | 3·5 |  | N | 2;-;0 | 2;-;0 | 2;-;0 |
| A | 2/10 | 5/100 | 3/10 |  | A | 2;1;1 | 3;1;2 | 2;1,1 |
| L | 10·2/9 | 3/2 | 13/2 |  | L | -;1;0 | 2;2;1 | 2;2;1 |
| f | 17·5/100 | 17·5/100 | keine |  | f | 3;2;2 | 3;2;2 | 6;6;6 |
| gA | 3 | 3/2 | 9/2 |  | gA | 1;-;0 | 2;2;1 | 2;2;1 |
| gL | 100/3 | 3·3·5 | 5·5·? |  | gL | -;1;0 | 2;-;0 | 3;2;1 |
| K | 17·5 | ?/8 | keine |  | K | 2;-;0 | 5;3;3 | 8;8;5 |
| Kges | ?/8 |  | keine |  | Kges | 6;4;3 |  | 8;8;5 |

Die gebrochenen Zahlen haben noch Eigenschaften zur Periode und deren Länge und die reellen Zahlen sind unverwechselbar einzigartig.

So stellt man den Rechenweg wieder her:

Es gibt 2 gebrochene Zahlen, die in einer Beziehung stehen können:

Eine gebrochene Zahl plus, minus oder mal einem kurzem Dezimalbruch oder ganze Zahl ergibt wahrscheinlich wieder eine gebrochene Zahl. Weiterhin entstehen gebrochene Zahlen bei einer Division.

Beide gebrochene haben eine einstellige Periode. Die Addition oder Subtraktion der beiden würde ein Ergebnis mit höherer Anzahl an signifikanten Stellen hervorbringen. Die Division hingegen erzeugt eine natürliche Zahl, die auch in der Tabelle vorhanden ist. Wahrscheinlich ist gL= L·N. Wie die 2,222 errechnet wird, lässt sich nicht erkennen. In den anderen beiden Spalten wird geprüft, ob ebenfalls gL= L·N gilt.

Durch zufälliges Probieren, was auch in anderen Zahlensystemen möglich ist, lässt sich herausfinden, dass Zeile gA = A·N. Da Rundungsfehler nur bei reellen Zahlen vorkommen, gibt es eine größere Sicherheit, dass auch gA = A·N stimmt.

Da 2 Zeilen bereits gleiche Formeln haben, könnten in weiteren Zeilen ebenfalls gleiche Formeln vorkommen.

Seltsam hingegen ist, dass in der Zeile f zwei Dezimalbrüche und eine reelle Zahl auftauchen. Reelle Zahlen sind nie selbst gewählt, sondern immer errechnet. Leichte Formeln wie die Grundrechenarten können aus kurzen Zahlen nur selten reelle Zahlen erzeugen. Für die Erzeugung einer reellen Zahl wird immer eine reelle Zahl als Eingangswert benötigt. Harte Formeln wie Sinus, Wurzel oder besonders lange Formeln erzeugen aus kurzen Zahlen fast immer reelle Zahlen. Weiß man, dass f mit einer harten Formel errechnet wird, so kann man schlussfolgern, dass nur der Wert in der letzten Spalte errechnet wurde und die anderen beiden geschätzt wurden.

Schaut man sich die Zeile für K an, so stellt man fest, dass K mit einer leichten Formel errechnet wird, denn die ersten beiden Zahlen sind Dezimalbrüche. Nimmt man an, dass eine leichte Formel dahinter steckt, so kann die reelle Zahl in der letzten Spalte eine reelle Zahl als Eingangswert haben. Es kommt f in Frage. Subtrahieren und Dividieren ergibt aus 2 Gründen wenig Sinn. Zum einen ist der Größenunterschied zu groß und zum anderen gibt es keine identischen Ziffernfolgen. K/f ergibt Dank der hohen Länge hingegen einen Dezimalbruch von 438,75. Das Produkt zweier Zahlen, die mit 5 enden, endet mit 25 oder 75. Mit Glück findet man, dass die 438,75 das Produkt der beiden Zellen darüber ist. Sollte man wegen mangelnder Länge keinen Dezimalbruch erhalten haben, so gibt K in Zeile e Hinweise zur Lösung. Die 57,375 hat nämlich eine Achtel-Endung. Diese kommt selten durch Addition zustande, aber häufig durch Multiplikation mit Zahlen, die mit 5 enden. Ebenfalls kann eine 375 durch Division durch gerade Zahlen entstehen. Gerade Zahlen gibt es in der Tabelle nur wenig, dafür viele, die mit 5 enden. Da es keine Beziehungen unter den Spalten gibt, werden die darüber liegenden Zahlen verwendet. Aufgrund der reellen Zahlen rechts daneben, wird die 57,375 durch f=0,85 dividiert. Es entsteht 67,5. Dieses Ergebnis ist kürzer und somit liegt man auf dem richtigen Weg. Diese Zahl enthält viele 3 und 5 als Primfaktoren. Es ist wahrscheinlich, dass die beiden darüber liegenden Werte miteinander multipliziert wurden, weil diese ebenfalls 3 und 5 als Primfaktoren enthalten. Die Probe mit den anderen Spalten zeigt, dass die Formel K= f·gL·gA richtig ist.

In der letzten Zeile fehlt ein Wert und einer ist kopiert. In der letzen Zeile und Spalte treten allgemein häufig besondere Formeln auf. In dieser Tabelle trifft dies für die letzte Spalte nicht zu, aber wegen des fehlenden Wertes für die letzte Zeile. Die 277,375 könnte die Summe der beiden Zahlen aus der Zeile K sein, zumal ein Summand die gleichen 4 letzen Ziffern hat. Leider fehlen bei der Summe 135. Mit Glück könnte man sehen, dass 135= 3·45 ist sodass die Formel lautet: Kges= Ka+ Ke+ gLe· gAa. Eine andere Möglichkeit ist, dass man sich erinnert, dass es für Kges die leichte Formel K= K= fa·La·Aa·a² +fe·Le·Ae·e²+ a·e·Le·Aa oder die harte Formel K= Lra·N·(gAb+gAa) +…… mit Na1= Na·e(Lra-Lrb)/Lad gibt. Die harte Formel scheidet aus 2 Gründen aus: Zum einen kommt dort b anstelle von e vor und zum anderen erzeugt eine E-Funktion immer eine reelle Zahl.

# Problem, Aufgabenstellung und Ziel der Diplomarbeit

Im Stahlbau werden immer schlankere und dünnere Träger hergestellt. Die Festigkeiten steigen, der Stahlverbrauch sinkt und Kosten werden eingespart. Schlanke Träger haben jedoch Stabilitätspro-bleme. Diese sind Knicken, Biegedrillknicken und Beulen. Knicken lässt sich mit gespreizten Gitterträgern verhindern. Für das Biegedrillknicken wird der Druckgurt an einigen Punkten gehalten und um zu verhindern, dass ein Träger beult, werden Steifen eingebaut. Viele Träger werden aus dünnen Blechen gefaltet oder geschweißt, die wegen der hohen Festigkeit so dünn sind, dass sie ausbeulen. Für die Bemessung dieser wirtschaftlichen Träger gibt es die Normen DIN und Eurocode.

Die aktuelle Normenreihe der DIN 18800 ist nicht mehr auf dem neuesten Stand. Neben dieser Norm gibt es den modernen Eurocode, der sich jedoch nicht richtig durchsetzen konnte.

Aufgabe und Ziel der Diplomarbeit ist es beide Normen zu vergleichen und auf Stahlverbrauch und Rechenaufwand zu untersuchen. Zuerst werden die Formeln des Eurocodes und der DIN zusammengetragen und zu einem allgemeinen Nachweisschema zusammengefasst. Danach werden diese Formeln genauer untersucht oder hergeleitet. Der Einfluss vieler Parameter wie Steghöhe oder Schlankheit auf die Formeln beider Normen wird analysiert und der dahinterstehende Funktionstyp sichtbar gemacht.

Danach werden 4 Möglichkeiten durchgerechnet. Das sind ein einfaches Beulfeld, ein Zweifeld-träger, ein Zweifeldträger mit vielen Lasten und eine Stütze. Die Rechenbeispiele ermöglichen dem Leser die Normen leichter anzuwenden. Am Ende jedes Rechenbeispiels werden Geometrie und Belastung variiert und zu einem Ergebnis zusammengefasst.

Ziel des ersten Rechenbeispiels ist es den Arbeitsaufwand nach beiden Formen für triviale Beulfelder ohne Längssteifen zu untersuchen.

Danach wird eine Formel für die semiplastische Tragfähigkeit hergeleitet, da sie für die nächsten Rechenbeispiele benötigt wird.

Das zweite Rechenbeispiel dient dazu mehr Verständnis bei der richtigen Anwendung der Normen zu geben. Der Träger ist mit einer Längssteife ausgesteift.

Das dritte Rechenbeispiel bietet einen allgemeineren Lösungsweg. Es wirkt eine Einzellast, eine Streckenlast und eine Druckkraft auf einem doppelt versteiften Zweifeldträger.

Im vierten Rechenbeispiel wird eine druckbeanspruchte Kastenstütze untersucht.

Zu jedem Rechenbeispiel gibt es eine Zusammenfassung, in der die Nachweise zusammengefasst werden. Stahlverbrauch, Rechenaufwand, Abwägung zwischen beiden und Belastungsvariation werden untersucht. Zusätzlich werden einige Besonderheiten zu den Steifen genauer analysiert.

# Tipps, Tricks und Tools

## Warum wiegt die Diplomarbeit weniger als ein Megabyte?

Text benötigt fast keinen Speicherplatz, während Bilder hingegen stark ins Gewicht fallen. Weiterhin werden keine Fotos verwendet. Diese benötigen den meisten Speicherplatz. Für einfache Vektorgrafiken wurde das Windowsmetafile (WMF) verwendet. Dieses wiegt unkomprimiert etwa 10kB. Da Word bei der Anzeige mit Rendern etc. spart, kann man flüssig über das Bild scrollen, ohne dass es ruckelt.

Die Vektorgrafiken (WMF) aus Autocad sind nicht perfekt und mit Ballast beladen, dennoch wiegen diese gegenüber WMFs aus Word und Excel besonders wenig. Der Ballast besteht aus einer großen unnützen Palette (1000Byte) und bei jedem Text werden die ganzen Texteigenschaften neudefiniert (250Byte). Diesen Ballast ab zu werfen spart jedoch nichts ein, da gleiche Informationen im Worddocxument gezippt werden. Um ein hochwertiges WMF zu erhalten geht man folgendermaßen vor. Verwendet man eine Autocadschrift wie Simplex, so beinhaltet das WMF viele Polylinien aus vielen Segmenten. Weiterhin verwandelt Autocat runde Objekte wie Kreise in Polylinien und Flächenfüllungen in einzelne Dreiecke. Das Probem mit dem Text lässt sich beheben, indem man eine Windowsschrift verwendet. Bei dem Text muss folgendes eingehalten werden:" Breitenfaktor = 1, Text nicht 3D gedreht, Text nicht teilweise außerhalb des Bildschirms". Ansonsten zerfällt der Text in viele einzelne Dreiecke. WMF kennt nur Polylinien. Daher ist es sinnvoll in Autocad Linien zu verbinden, da jede weitere Linie nur 4 Byte braucht. Druckt man das WMF von Word aus aus, so sieht die Grafik normal aus. Druckt man diese in ein PDF und dann aus, so sind die Linien sehr blass. Stellt man in Autocad Linienstärken an, dann hat das WMF zwar dicke Linien, aber die Linien sind lauter kleine Dreiecke. WMF besitzt aber selbst nativ Linienstärken. Voreingestellt ist ein Füller mit der Linienstärke 0. Diesen Füller kann man mit dem Hexeditor überarbeiten. Dazu sucht man fa02 0000 **00**00 (Hexadezimal) und ersetzt die fett markierten Nullen durch einen Wert. Meist ist 04 richtig. Dies ist ein Ratespiel, da die Liniendicke von der Bildgröße in Autocad und Word abhängt. Es sind mehrere verschiedene Linienstärken möglich. Wegen der Neuheit dieser Möglichkeit wurde davon kein gebrauch gemacht und teilweise Bitmaps bevorzugt.

Für Bitmaps wurde häufig PNG verwendet. Dieses Dateiformat speichert die Bilder verlustfrei und ist für Bitmaps mit wenigen Farben sehr gut geeignet. Diese sind z.B. Diagramme, Zeichnungen und Skizzen. Speichert man eine Skizze als JPG, so sieht diese hässlich aus und wiegt obendrein auch noch das Zehnfache. Speichert man ein Foto nicht als JPG sondern als PNG, so sinkt zwar nicht die Qualität, aber die Dateigröße fällt stark ins Gewicht. JPG reduziert den Speicherbedarf um das zehn bis zwanzigfache gegenüber einer unkomprimierten Bitmap, egal ob Foto oder wenigfarbige Skizze. PNG hingegen senkt dank Vorfilter die Dateigröße bei Fotos um bis zu 50%, ohne Vorfilter ist noch weniger zu erwarten. Zeichnungen hingegen werden um etwa 98% leichter.  
JPG und PNG bieten noch weitere Möglichkeiten zur Speicherreduktion. Für Graustufenfotos können beim JPG ohne Farben gespeichert werden. Beim PNG gibt es die Möglichkeit die Skizze mit 16 Farben zu speichern. Dabei können die 16 Farben frei gewählt werden. Dies wurde in der Diplomarbeit häufig genutzt. Und so geht man vor:

Mit Irfanview öffnet man eine PNG und reduziert die Farbtiefe (Bild – Farbtiefe reduzieren) auf 16 Farben. Leider gibt es da kein reines Weiß und Schwarz mehr. Dann bearbeitet man die Farbpalette (Bild - Palette). Man ändert dunkelweiß (252;252;254) in weiß (255;255;255) und hellschwarz in schwarz (0;0;0) und vielleicht rosarot in knalliges rot (255;0;0). Weiterhin kann man dort seine 16 Farben wählen. Nach dem Speichern öffnet man nun das Bild mit Paint. Paint ist das einzige Programm, das palettentreu ist. Fügt man nun ein Bild mit 16777216 Farben in diese PNG ein, so wählt Paint für jeden Pixel die passendste Farbe aus der Palette. Screenshots können so sehr schnell speichersparend abgespeichert werden. Viele andere Programme erhöhen die Farbtiefe wieder auf 16777216, sodass bei Irfanview das Spielchen mit dem Dunkelweiß von Neuem beginnt. Eine PNG mit 16 Farben wiegt weniger als die Hälfte gegenüber derselben PNG mit 16777216 Farben. Das Speichern mit Paint oder Irfanview erzeugt gegenüber einem teuren Programm schwerere Bilder.  
Bilder mit 2 Farben können auch als solche gespeichert werden, sodass das Bild noch leichter wird. Doch für 2 Farben gibt es das TIF mit der CCITT Komprimierung, das die Dateigröße gegenüber dem PNG noch weiter reduziert. TIF wurde nicht verwendet, da Paint und Irfanview die starke Komprimierung nicht unterstützen.

Der geringe Speicherbedarf beim PNG hat auch seine Gefahren. Eine 200kB große PNG kann im Arbeitsspeicher 20MB wiegen und so Word zum Ruckeln bringen. Bei riesigen Fotos mit mehreren Megapixels passiert mit Word das gleiche. Ein 6MB Foto benötigt meist 60MB im Arbeitsspeicher und bei mehreren Fotos ist das Bearbeiten und Scrollen unerträglich.

Durch Bilder mit geringer Auflösung als PNG mit 16 Farben, WMF Grafiken und Gleichungen als EQ-Feld ist die Diplomarbeit nicht schwerer als ein Megabyte geworden. Und es ist sogar noch Platz für 30kB Ostereier.

## Wie gebe ich Lambdaquer in Word ein

In Wikipedia ist das ganz einfach: \overline{\lambda}. In Word und Excel hingegen scheitern die meisten Studenten und Ingenieure an diesem Problem. Eine Lösung ist der sperrige Formeleditor, bei dem man durch langes Klicken sicher zum Ziel kommt. Der Formeleditor hat viele Nachteile gegenüber der bequemen Eingabe bei Wikipedia. Beim Doppelkick auf die Formel ruckelt es. Dann muss man in jedes Feld klicken und treffen, um einen einzigen Buchstabe ein zu geben. Tiefstellen und Hochstellen benötigen auch einige Treffer. Ein weiteres Problem ist, dass nicht jedes Word den richtigen Formeleditor hat. Ein entscheidender Nachteil ist, dass man den Code für die Formeln nicht sieht, während Wikipedia transparent ist. Die lange Bearbeitungszeit schreckt ab schöne Formeln zu erstellen, sodass die meisten Formeln elementar in einer Zeile hingeschrieben werden.  
Doch so viel Mühe muss nicht sein. In jedem Word gibt es auch die Möglichkeit wie in Wikipedia Formeln zu erstellen. Diese sehen zwar nicht so prunkvoll aus, sind aber kürzer im Code. Dazu drückt man Strg F9 um ein Feld zu erstellen. Es erscheinen 2 Klammern. In diese tippt man EQ. Dahinter kann man den Code für die Formel eintippen. \F(;) für Bruch \r(;) für Wurzel und \b() für Klammer \o(;) für überschreiben und einige weitere Befehle. Mit Shift F9 klappt man das Feld auf und zu. Die EQ-Felder haben in der Diplomarbeit eine Woche Zeit gespart.

EQ \r(;\F(1;2)+5·\b(\F(3;4))) ergibt somit

Und so lautet die Formel in Wikipedia:

:<math> \sqrt{\frac{1}{2}+5\cdot \left(\frac{3}{4}\right)}</math>

Für griechische Buchstaben kann man sich Tastenkombinationen zulegen. Man sollte darauf achten, dass es auch wirklich griechische Buchstaben sind und nicht lateinische, die wie griechische aussehen. Die Schriftart Symbol lässt lateinische wie griechische aussehen, aber beim Bewegen von Text kann die Schriftart verloren gehen und somit sind alle griechischen Buchstaben wieder lateinisch. Dazu geht man Einfügen – Symbol und wählt oben bei Schriftart „(normaler Text)“. Die griechischen Buchstaben, die man da findet, sind echt. Wer Arial verwendet bekommt einen griechischen Buchstaben in Arial und nicht einen mit Serifen. Nachdem die wichtigsten Buchstaben eine Tastenkombination haben, geht das Eintippen sogar schneller als in Wikipedia. Für das Hoch- und Tiefstellen gibt es in Word bereits eine Tastenkombination und zwar Strg # und Strg +. Zweimal gerückt entfernt es die Hochtiefstellung.

\overline{\lambda} lässt sich so in Word eingeben: EQ \o(λ;¯) oder den Strich noch um ein Pixel höher setzen EQ \o(λ;\s\up1(¯)). Manchmal geht es auch ohne EQ-Feld, indem man λ und das Unicodezeichen verwendet, das sich über den vorherigen Buchstabe schiebt. Meistens ist der Strich aber nicht zentrisch über den Buchstabe.

## Tools und Makros

Da EQ-Formeln einen Code beinhalten, so kann dieser auch von Makros bearbeitet werden. Die Makros wurden nach der Diplomarbeit geschrieben, um die EQ-Formeln schneller in Wikipedia zu schieben. Wären die Makros schon während der Diplomarbeit vorhanden, dann hätte eine weitere Woche gespart werden können.

Es wird zwischen 4 Arten unterschieden, wie Formeln dargestellt werden können.

Elementar:

Als Multiplikationszeichen wird der Stern \* verwendet. Hoch- oder tiefgestellte Zeichen sind nicht hoch oder tiefgestellt, sondern haben ein ^ oder \_ davor. Die Wurzel wird mit ( )^0,5 dargestellt und Bruche haben den senkrechten Bruchstrich /. Elementar dargestellte Formeln haben meist viele Klammern. Griechische Buchstaben und Sonderzeichen werden unterstützt. Die Formel ist eine Zeile hoch. Word und Excel verstehen elementare Formeln.

z.B. (1/2+5\*(3/4))^0,5

Schick:

Anstelle von \* wird · verwendet und es gibt hoch und tiefgestellte Zeichen. Verschiedene Schriftarten sind möglich. Für den Bruch gibt es weiterhin den senkrechten Bruchstrich /. Wurzel wird mit ( )0,5 dargestellt. Die Formel ist eine Zeile hoch.

z.B. (1/2+5·(3/4))0,5

EQ-Feld

Brüche werden mit dem horizontalen Strich getrennt und die Wurzel umschließt mit dem Wurzelzeichen die Zahlen. Kammern können über mehrere Zeilen sein. Die Formel kann mehrere Zeilen hoch sein und benötigt weniger Klammern.

z.B. EQ \r(;\F(1;2)+5·\b(\F(3;4)))

Wikipedia

Diese Formeln sehen gegenüber EQ-Formeln wesentlich punkvoller aus. Der Code ist länger und ist vollständig mit der Tastatur eingebbar. Griechische Buchstaben werden durch lange Zeichenketten dargestellt. Hoch und Tiefstellen geht mit ^ und \_.

z.B. :<math> \sqrt{\frac{1}{2}+5\cdot \left(\frac{3}{4}\right)}</math>

Der elementare Formeltyp lässt sich am schnellsten eingeben und benötigt kein Codewissen. Genau hier setzen die Makros an. Es gibt 6 Funktionen, die das Formellevel herauf setzen oder senken. Diese werden 2 Prozeduren geeint. Die eine erhöht das Level und die andere senkt es. Der Prozedur wird ein Tastenkürzel zugewiesen. Die Makros unterstützen Brüche, Wurzeln, Klammern und Potenzen. Nicht enthalten sind Integrale, Überschreiben, Überstreichen, große Summen, große Quadrate, Semikolon, Backslash und ein nachfolgendes Mal oder Bruchstrich nach einem Bruchstrich. Damit werden 90% aller Formeln in dieser Diplomarbeit erfasst.

So gibt man eine elementare Formel ein, drückt auf die Taste und schon hat man eine besser aussehende Formel.

In Word gibt es weiterhin ein Berechnungsfeld. Dazu drückt man Strg F9 und beginnt dieses nicht mit EQ sondern mit = . Mit Shift F9 klappt man das Feld auf und zu. Aber zuerst muss man F9 drücken, um es zu aktualisieren, weil sonst nichts angezeigt wird. Mit F9 rechnet Word aus, was in dem Feld drin steht. Z.B. 2+5 = 7.  
Ein Makro benutzt 3 der 6 Funktionen, um das Formellevel aus Elementar zu senken. Anschließend wird ein = davor gesetzt und in ein Berechnungsfeld umgewandelt. Auf diese Weise lässt sich auch ausrechnen, was man in den Formeln geschrieben hat. Der Taschenrechner wird erspart. Dem Makro lässt sich ein Tastenkürzel zuweisen.

So gibt man eine elementare Formel ein, drückt auf die Taste und schon hat man eine besser aussehende Formel und rechts daneben auch noch das Ergebnis.

Zeit wird auf zweifache Weise gespart: Auf langes Klickern im Formeleditor wird verzichtet und das gleiche in den Taschenrechner eintippen bleibt auch erspart.

Das letzte Makro dient eher dem Spaß als den Nutzen. Dies ist ein Formelwürfel, der zufällig riesige Formeln generiert. Zu künstlerischen Zwecken können sie verwendet werden.

Folgende Formel kann beispielsweise gewürfelt werden:

:<math> 2+\frac{I+\frac{8gN\_{\Beta n}\sqrt{\frac{\Chi \Nu o}{h}(l6)+x\Kappa k}+\frac{Bk}{\sqrt{d}}-SG\sqrt{DRj}++\frac{\Eta P (\cdot C(gY+\phi kB)\Psi )\Epsilon M\kappa f()\Nu s\cdot \lambda v}{sI}-D-LA]{,}\_{gk}\sqrt{\_{H^{}ut}}+\sqrt{Lz}-\sqrt{b}-}{\Nu -sfv^L\sqrt{To}+\Phi \cdot \Beta v\sqrt{VVv\_{F\Theta v}}+\frac{\Zeta \cdot \Theta b}{g^{9r}\_SW}+\frac{LQ8t}{jC}-\frac{78n}{wd}(D)l-\frac{\Epsilon q}{xSC}-Q\kappa ehR\sqrt{D7r}}+\frac{qf}{\sqrt{a}}-\sqrt{\frac{\sqrt{De}-\frac{s}{b}-}{H\sqrt{\Eta k\eta yhn\lambda \cdot \Chi \left(\frac{\theta o}{b}-\frac{^{KYe}}{b}-iZp\right)^{0{,}5}+\upsilon 14\left(\frac{Yp}{i{,}s\Xi r}\right)^{0{,}5}+v}}}}{ \frac{\frac{\frac{-d-\frac{Wnc{,}h}{\sqrt{qCHOn}}-}{q+8q}^{Wi}}{\sqrt[d]{Dw2}}\kappa +\sqrt{\frac{X\delta \cdot \sqrt{J}-\frac{n\Tau am}{e\phi 4I}-r\rho \_{CyO3]\omicron }+\frac{5q}{a}(C-Dw\cdot I^\Lambda )C\omicron m\left(\frac{5J\_{Hf}}{l}-\frac{V{,}l}{d}\sqrt{\sqrt[u]{i}Me}+\Omicron \rho \right)]-\frac{Ke}{qJ}\_(-^{[n}\cdot \sqrt[a]{c{,}}s5K)L\sqrt{HC^{\Gamma 4c}\cdot G\cdot C7-\sqrt[v]{4\_{QbP6z}}e}}{\sqrt{}-\frac{\theta x}{q\Gamma Wq}+\frac{\_{9\eta }\cdot \chi l}{xi}-p+pi+\sqrt{\Phi }-\frac{\sqrt[w]{5}Ka}{c}-F\cdot D\sqrt{Sk}+\frac{Su}{w}-\frac{Sfc}{e}\sqrt{Af-\Xi n}+aZO\sqrt{\theta \_{CVEis}}+\frac{YQb}{a}}}}{ \frac{\frac{D5\cdot rd}{i}\sqrt{G2^{rEBb}+\frac{Dd}{up}}+^{5Iy}{}+\frac{a}{iJ}+\frac{PE}{\sqrt{Aj}+\frac{\cdot Oin}{\sqrt{o3}}}-(\Zeta TC-M)S}-\Omicron \left(C-\frac{hs}{p}-P\right)\cdot \sqrt{h-\sqrt{NK2}}-\frac{\sqrt{O\Xi }-h\cdot \Epsilon P()\sqrt{Va}-x-\frac{7nynx}{i}-\frac{E\_{\iota p}}{s^S}}{-\frac{\zeta r}{lH}-\sqrt{6}-\frac{W\nu r}{c5}-\frac{\cdot K\theta t}{wY}}+d9+\frac{Rhi+\frac{Z^{fq}}{j G}(D)k-Y\sqrt{\frac{s53k}{q}-4{,}G^{wv7e}}+f+\sqrt{\eta \_t}-\frac{zs}{\sqrt{d\kappa }}-9ln-}{CAV3\cdot p\phi \sqrt{\frac{mli}{k}-\frac{4o}{ws[}(Up)^{0{,}5}+r}+-\frac{Kr}{lL}-\_{wCp\Gamma }-}}}</math>

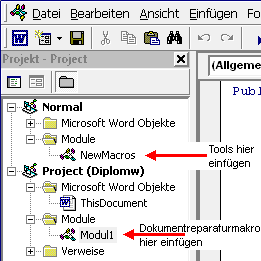
Da die Makros von einem Anfänger Programmiert sind, sind diese dementsprechend langsam. Weiterhin können Fehler auftreten oder Patente versehentlich verletzt wurden sein. Bei Fehlern oder Patente bitte Code umschreiben. Wordabstürze kamen bei 500 gewürfelten Formeln nicht vor. Da es verwirrend ist, wenn nach einem / ein \* oder / kommt, wurde dieses auch nicht in das Makro eingebaut. Statt 5/8/6 soll man schreiben 5/(8\*6) und statt 5/8\*6 soll man schreiben 5\*6/8.

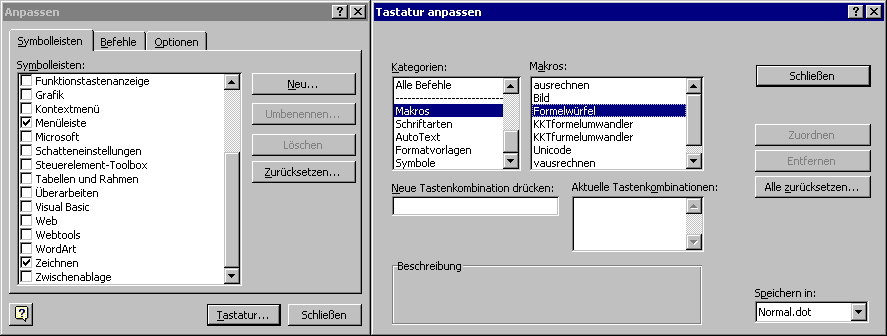
### Der Code

So wandelt man das Bild in ein Worddocxument um.

Das Bild wird als Windowsbitmap BMP gespeichert und dann mit einem Hexeditor geöffnet. Am Anfang und am Ende der Datei müssen Zeichen gelöscht werden. Am Anfang steht „Worddocxument beginnt hier“ und am Ende „Worddocxument endet hier“. Alle Zeichen inklusive des Textes davor bzw. dahinter werden entfernt. Die Dateiendung nennt man in docx um, um sie mit Word zu öffnen.

So bekommt man die Makros ins eigene Word:

Es gibt ein kleines Makro zur Reparatur der Dokumentstruktur von http://www.kastenmaier.de/vba/vba-word/202-dokumentenstruktur-reparieren . Dieses macht bei Worddokumenten mit mehr als 100 Seiten möglich, dass weiterhin ein Inhaltsverzeichnis aus Überschriften erstellt werden kann. Dieses Makro kommt ins Worddokument und nicht in Word. Dazu markiert und kopiert man von „Public Sub Reparatur()“ bis „End Sub“. Dann drückt man Alt F11 um den VBA-Editor zu öffnen. Oben links doppelklickt man auf Modul 1. Rechts ist ein weißer Bereich, in den man den Text einfügt.  
Die eigentlichen Tools (die anderen 39 Seiten) werden unter NewMacros eingefügt. Dann geht man auf Extras – Anpassen und klickt unten auf Tastatur. Da scrollt man runter und klickt auf Makros. Nun kann man den Makros Tastenkürzel zuweisen. KKTformelumwandler erhöht das Formellevel. KKTfurmelumwandler senkt das Formellevel. Ausrechnen rechnet eine Formel aus und vAusrechnen rechnet eine Formel aus und schreibt die Formel links neben das Ergebnis.



**Public Sub Reparatur()**

On Error GoTo NoDocumentOpen

If Len(ActiveDocument.Name) = 0 Then GoTo NoDocumentOpen

' Bildschirmaktualisierung ausschalten

Application.ScreenUpdating = False

' Gesamten Text im Dokument markieren

Selection.WholeStory

' Gliederungsebene auf Textkörper ändern

Selection.ParagraphFormat.OutlineLevel = wdOutlineLevelBodyText

NoDocumentOpen:

' Bildschirmaktualisierung einschalten

Application.ScreenUpdating = True

End Sub

Option Explicit

Function Klammer(ByVal a As String) As Integer

If a = "(" Then

Klammer = 1

ElseIf a = ")" Then

Klammer = -1

ElseIf a = "" Then

Klammer = 17000

Else

Klammer = 0

End If

End Function

Function Klammer2(ByVal a As String) As Integer

If a = "{" Then

Klammer2 = 1

ElseIf a = "}" Then

Klammer2 = -1

ElseIf a = "" Then

Klammer2 = 17000

Else

Klammer2 = 0

End If

End Function

Function Steuerzeichen(ByVal a As String) As Integer

Select Case a

Case "+", "-", "\*", "·", "/", ")", "(", "^", "\_", "=", ChrW(8729), ChrW(8211)

Steuerzeichen = 1

Case ""

Steuerzeichen = 17000

Case Else

Steuerzeichen = 0

End Select

End Function

Function IstZahl(ByVal a As String) As Integer

Select Case a

Case "0", "1", "2", "3", "4", "5", "6", "7", "8", "9", ","

IstZahl = 1

Case ""

IstZahl = 17000

Case Else

IstZahl = 0

End Select

End Function

Function Typ() As Integer

Dim Länge, aktuellZeichen, c, d, e As Integer

Dim Formel, Tz As String

If Selection.Fields.Count = 1 Then

Formel = Selection.Fields(1).Code

Typ = 0 'Elementar (Berechnungsfeld)

For c = 1 To 3

Tz = Mid(Formel, c, 3)

If Tz = "EQ " Then

Typ = 2 'EQ Feld

End If

Next

Exit Function

End If

Formel = Selection

Länge = Len(Formel)

For c = 1 To 3

Tz = Mid(Formel, c, 8)

If Tz = ":<math> " Then

Typ = 3 'Wikipedia

Exit Function

End If

Tz = Mid(Tz, 1, 3)

If Tz = "EQ " Then

Typ = 2 'EQ Feld

Exit Function

End If

Next

d = 0 'elementare Zeichen

e = 0 'chicke Zeichen

For aktuellZeichen = Länge To 1 Step -1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 1)

Select Case Tz

Case "^", "\_", "\*"

d = d + 1

Case "²", "³", "·", ChrW(8729)

e = e + 1

End Select

Next

If Selection.Font.Superscript = False Then

d = d + 0

Else

e = e + 1

End If

If d = 0 And e = 0 Then Typ = -1 'elementar = chick

If d = 0 And e <> 0 Then Typ = 1 'chick

If d <> 0 And e = 0 Then Typ = 0 'elementar

If d <> 0 And e <> 0 Then Typ = 10 'elementarchick

End Function

Function Starten() As String

Dim Länge, aktuellZeichen, Klammersumme, Formeltyp, c, d, e As Integer

Dim Formel, Tz As String

If Selection.Fields.Count = 1 Then

Formel = Selection.Fields(1).Code

Else

Formel = Selection

Länge = Len(Formel)

If Länge = 1 Then 'markiert bis zum ende

Selection.EndKey Unit:=wdLine, Extend:=wdExtend

Selection.MoveLeft Unit:=wdCharacter, Count:=1, Extend:=wdExtend

Formel = Selection

Länge = Len(Formel)

End If

If Länge = 1 Then ' markiert bei Fehlschlag bis zum Tab oder =

Selection.HomeKey Unit:=wdLine, Extend:=wdExtend

Formel = Selection

Länge = Len(Formel)

d = 0

For e = Länge To 1 Step -1

Tz = Mid(Formel, e, 1)

If Asc(Tz) = 9 Or Asc(Tz) = 61 Then Exit For

d = d + 1

Next

Selection.Collapse

Selection.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=Länge - d

Selection.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=d, Extend:=wdExtend

End If

End If

Tz = Right(Formel, 1) 'prüft, ob rechts ein Absatz ist

c = Asc(Tz)

If c = 11 Or c = 13 Then

Selection.MoveLeft Unit:=wdCharacter, Count:=1, Extend:=wdExtend

'Tz = Formel

Formel = Selection

'Länge = Len(Formel)

If Länge - Len(Formel) = -1 Then

Länge = Len(Formel)

Selection.Collapse

Selection.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=1

Selection.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=Länge - 2, Extend:=wdExtend

'c = MsgBox("Absatz markiert", 17, "Warnung")

'If c = 2 Then Exit Function

End If

End If

Tz = Left(Formel, 1) 'prüft, ob links ein Absatz ist

c = Asc(Tz)

If c = 11 Or c = 13 Then

Selection.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=1, Extend:=wdExtend

'Tz = Formel

Formel = Selection

'Länge = Len(Formel)

If Länge - Len(Formel) = -1 Then

Länge = Len(Formel)

Selection.Collapse

Selection.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=1

Selection.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=Länge - 2, Extend:=wdExtend

'c = MsgBox("Absatz markiert", 17, "Warnung")

'If c = 2 Then Exit Function

End If

End If

'Sicherung gegen Klammern

Klammersumme = 0

Länge = Len(Formel)

For aktuellZeichen = 1 To Länge

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 1)

Klammersumme = Klammersumme + Klammer(Tz) + Klammer2(Tz)

If Klammersumme < 0 Then Exit For

Next

If Klammersumme <> 0 Then

c = MsgBox("Es sind " & Klammersumme & " Klammern zuviel", vbCritical, "Warnung")

Starten = " "

Exit Function

End If

Starten = Formel

End Function

**Sub ausrechnen()**

Dim Länge, aktuellZeichen, Klammersumme, Formeltyp, c, d, e As Integer

Dim Formel, Tz As String

Application.ScreenUpdating = False

Formel = Starten()

If Formel = " " Then Exit Sub

Formeltyp = Typ()

'Reversetranslatase und RNApolymerase können eine (1) in Klammern haben

'Dadurch erzeugen sie ein EQ-Feld ohne Feld und sind damit schneller

'senkt den Formeltyp auf elementar

Select Case Formeltyp

Case 3

d = Reversetranslatase(1) + Reversetransskriptase() + DNAse()

Case 2

d = Reversetransskriptase() + DNAse()

Case 1, 10

d = DNAse()

Case 0, -1

d = 0

End Select

Selection.Fields.Add Range:=Selection.Range, Type:=wdFieldEmpty, \_

PreserveFormatting:=False

Selection.TypeText Text:="= "

Selection.Fields.ToggleShowCodes

Selection.Fields.Update

Application.ScreenUpdating = True

End Sub

**Sub vausrechnen()**

Dim Länge, aktuellZeichen, Klammersumme, Formeltyp, c, d, e As Integer

Dim Formel, Tz As String

Application.ScreenUpdating = False

Formel = Starten()

If Formel = " " Then Exit Sub

Formeltyp = Typ()

'senkt den Formeltyp auf elementar

Select Case Formeltyp

Case 3

d = Reversetranslatase(1) + Reversetransskriptase() + DNAse()

Case 2

d = Reversetransskriptase() + DNAse()

Case 1, 10

d = DNAse()

Case 0, -1

d = 0

End Select

Formel = Selection

Länge = Len(Formel)

Selection.Fields.Add Range:=Selection.Range, Type:=wdFieldEmpty, \_

PreserveFormatting:=False

Selection.TypeText Text:="= "

Selection.Fields.ToggleShowCodes

Selection.Fields.Update

Selection.TypeText (Formel) & "=" & Chr(9)

Selection.MoveLeft Unit:=wdCharacter, Count:=2

Selection.MoveLeft Unit:=wdCharacter, Count:=Länge, Extend:=wdExtend

'stellt wahrscheinlich das EQ-Feld wieder her

c = 0

For aktuellZeichen = Länge - 2 To 1 Step -1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 1)

If Tz = "/" Then

c = 1

Exit For

End If

Next

If c = 0 Then

For aktuellZeichen = Länge - 3 To 1 Step -1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 3)

If Tz = "0,5" Or Tz = "^1/" Then

c = 1

Exit For

End If

Next

End If

If c = 1 Then

d = DNApolymerase() + RNApolymerase(0)

Else

d = DNApolymerase()

End If

Application.ScreenUpdating = True

End Sub

**Sub KKTformelumwandler()**

'erhöht den Formeltyp

Dim Länge, aktuellZeichen, Klammersumme, Formeltyp, c, d, e As Integer

Dim Formel, Tz As String

Application.ScreenUpdating = False

Formel = Starten()

If Formel = " " Then Exit Sub

Formeltyp = Typ()

Länge = Len(Formel)

Select Case Formeltyp

Case -1, 10

d = DNApolymerase() + RNApolymerase(0)

Case 1

d = RNApolymerase(0)

Case 2

d = Ribosom()

Case 3

d = Reversetranslatase(1) + Reversetransskriptase() + DNAse()

Case 0

Formel = Selection

c = 0

For aktuellZeichen = Länge - 2 To 1 Step -1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 1)

If Tz = "/" Then

c = 1

Exit For

End If

Next

If c = 0 Then

For aktuellZeichen = Länge - 3 To 1 Step -1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 3)

If Tz = "0,5" Or Tz = "^1/" Then

c = 1

Exit For

End If

Next

End If

If c = 1 Then

d = DNApolymerase() + RNApolymerase(0)

Else

d = DNApolymerase()

End If

End Select

Application.ScreenUpdating = True

End Sub

**Sub KKTfurmelumwandler()**

'senkt den Formeltyp

Dim Länge, aktuellZeichen, Klammersumme, Formeltyp, c, d, e As Integer

Dim Formel, Tz As String

Application.ScreenUpdating = False

Formel = Starten()

If Formel = " " Then Exit Sub

Formeltyp = Typ()

Select Case Formeltyp

Case 3

d = Reversetranslatase(0)

Case 2

d = Reversetransskriptase()

Case 1, 10

d = DNAse()

Case 0, -1

d = DNApolymerase() + RNApolymerase(1) + Ribosom()

End Select

Application.ScreenUpdating = True

End Sub

Function DNApolymerase() As Integer

'Elementar zu chick

Dim Länge, Verkürzung, Endzeichen, aktuellZeichen, Klammersumme, c, d As Integer

Dim Zeichen, Formel, Tz As String

DNApolymerase = 1

'Tauscht ^2 und ^3 gegen ² und ³ aus

Formel = Selection

Länge = Len(Formel)

For aktuellZeichen = Länge - 1 To 2 Step -1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 1)

If Tz = "^" Then

Zeichen = Mid(Formel, aktuellZeichen + 2, 1)

If IstZahl(Zeichen) = 0 Then

If Selection.Characters(aktuellZeichen + 1) = "2" Then

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "²"

Selection.Characters(aktuellZeichen + 1) = ""

ElseIf Selection.Characters(aktuellZeichen + 1) = "3" Then

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "³"

Selection.Characters(aktuellZeichen + 1) = ""

End If

End If

End If

Next

' Ersetzt \* durch ·

Formel = Selection

Länge = Len(Formel)

aktuellZeichen = 1

For aktuellZeichen = Länge - 1 To 2 Step -1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 1)

If Tz = "\*" Then

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "·"

End If

Next

'stellt hochtief

aktuellZeichen = 1

For aktuellZeichen = Länge - 1 To 2 Step -1

Verkürzung = 0

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 1)

If Tz = "^" Then

d = 1

ElseIf Tz = "\_" Then

d = -1

Else

d = 0

End If

If d <> 0 Then

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen + 1, 1)

If Tz = " " Then

Selection.Characters(aktuellZeichen + 1) = ""

Formel = Selection

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen + 1, 1)

End If

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "" '+1 im string

If Tz = "(" Then

Klammersumme = 1

Selection.Characters(aktuellZeichen) = ""

While Klammersumme > 0

If d = 1 Then

Selection.Characters(aktuellZeichen).Font.Superscript = True

ElseIf d = -1 Then

Selection.Characters(aktuellZeichen).Font.Subscript = True

End If

aktuellZeichen = aktuellZeichen + 1

Verkürzung = Verkürzung + 1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen + 2, 1)

Klammersumme = Klammersumme + Klammer(Tz)

If Tz = "^" Then

Selection.Characters(aktuellZeichen).InsertBefore Tz

d = 0

ElseIf Tz = "\_" Then

Selection.Characters(aktuellZeichen).InsertBefore Tz

d = 0

End If

Wend

Selection.Characters(aktuellZeichen) = ""

aktuellZeichen = aktuellZeichen - Verkürzung

Else 'Tz <> "("

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen + 1, 1)

c = Steuerzeichen(Tz)

If Tz = "²" Or Tz = "³" Then c = 1

While c = 0

If d = 1 Then

Selection.Characters(aktuellZeichen).Font.Superscript = True

Else

Selection.Characters(aktuellZeichen).Font.Subscript = True

End If

aktuellZeichen = aktuellZeichen + 1

Verkürzung = Verkürzung + 1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen + 1, 1)

c = Steuerzeichen(Tz)

If Tz = "²" Or Tz = "³" Then c = 1

If Tz = "" Then

c = 1

End If

Wend

aktuellZeichen = aktuellZeichen - Verkürzung

End If

End If

Next

End Function

Function DNAse() As Integer

'Chick zu elementar

Dim Länge, aktuellZeichen As Integer

Dim c, d, Endzeichen As Integer

Dim Zeichen, Formel, Tz As String

DNAse = 1

d = Selection.Fields.Count

If d = 1 Then

Selection.Fields.ToggleShowCodes

Selection.Fields(1).Code.Select

Länge = Selection.Characters.Count

With Selection

.Cut

.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=1

.TypeBackspace

.TypeBackspace

.Paste

.MoveLeft Unit:=wdCharacter, Count:=Länge - 2, Extend:=wdExtend

End With

Formel = Selection

Länge = Länge - 2

Tz = Mid(Formel, Länge, 1)

If Tz = " " Then

Selection.Characters(Länge) = ""

End If

Tz = Mid(Formel, 1, 1)

If Tz = "Q" Then

Selection.MoveLeft Unit:=wdCharacter, Count:=1, Extend:=wdExtend

End If

End If

Formel = Selection

Länge = Len(Formel)

For c = 1 To 3

Tz = Mid(Formel, c, 3)

If Tz = "EQ " Then

d = 1 'EQ Feld ohne Feld und es werden {} statt () verwendet

End If

Next

' Ersetzt · durch \*

aktuellZeichen = 2

For aktuellZeichen = 2 To Länge - 1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 1)

If Tz = "·" Or Tz = ChrW(8729) Then

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\*"

End If

Next

'Ersetzt ²³ durch ^2^3

For aktuellZeichen = Länge To 1 Step -1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 1)

If Tz = "²" Then

Selection.Characters(aktuellZeichen).InsertBefore ("^2")

Selection.Characters(aktuellZeichen + 2) = ""

ElseIf Tz = "³" Then

Selection.Characters(aktuellZeichen).InsertBefore ("^3")

Selection.Characters(aktuellZeichen + 2) = ""

End If

Next

'Entstellt hoch

Formel = Selection

Länge = Len(Formel)

For aktuellZeichen = Länge To 1 Step -1

If Selection.Characters(aktuellZeichen).Font.Superscript = True Then

Endzeichen = aktuellZeichen

c = 0

While Selection.Characters(aktuellZeichen).Font.Superscript = True

c = c + Steuerzeichen(Selection.Characters(aktuellZeichen))

Selection.Characters(aktuellZeichen).Font.Superscript = False

aktuellZeichen = aktuellZeichen - 1

Wend

If d = 1 Then

If Endzeichen - aktuellZeichen = 1 Then

Selection.Characters(aktuellZeichen).InsertAfter ("^")

Else

Tz = Mid(Formel, Endzeichen, 1)

Selection.Characters(Endzeichen).InsertBefore ("}")

Selection.Characters(Endzeichen).InsertBefore (Tz)

Selection.Characters(Endzeichen + 2) = ""

Selection.Characters(aktuellZeichen).InsertAfter ("^{")

End If

Else

If c > 0 Then

Tz = Mid(Formel, Endzeichen, 1)

Selection.Characters(Endzeichen).InsertBefore (")")

Selection.Characters(Endzeichen).InsertBefore (Tz)

Selection.Characters(Endzeichen + 2) = ""

Selection.Characters(aktuellZeichen).InsertAfter ("^(")

Else

Selection.Characters(aktuellZeichen).InsertAfter ("^")

End If

End If

End If

Next

'Entstellt tief

Formel = Selection

Länge = Len(Formel)

For aktuellZeichen = Länge To 1 Step -1

If Selection.Characters(aktuellZeichen).Font.Subscript = True Then

Endzeichen = aktuellZeichen

c = 0

While Selection.Characters(aktuellZeichen).Font.Subscript = True

c = c + Steuerzeichen(Selection.Characters(aktuellZeichen))

Selection.Characters(aktuellZeichen).Font.Subscript = False

aktuellZeichen = aktuellZeichen - 1

Wend

If d = 1 Then

If Endzeichen - aktuellZeichen = 1 Then

Selection.Characters(aktuellZeichen).InsertAfter ("\_")

Else

Tz = Mid(Formel, Endzeichen, 1)

Selection.Characters(Endzeichen).InsertBefore ("}")

Selection.Characters(Endzeichen).InsertBefore (Tz)

Selection.Characters(Endzeichen + 2) = ""

Selection.Characters(aktuellZeichen).InsertAfter ("\_{")

End If

Else

If c > 0 Then

Tz = Mid(Formel, Endzeichen, 1)

Selection.Characters(Endzeichen).InsertBefore (")")

Selection.Characters(Endzeichen).InsertBefore (Tz)

Selection.Characters(Endzeichen + 2) = ""

Selection.Characters(aktuellZeichen).InsertAfter ("\_(")

Else

Selection.Characters(aktuellZeichen).InsertAfter ("\_")

End If

End If

End If

Next

End Function

Function RNApolymerase(ByVal Hemmung As Integer) As Integer

'Chick zu EQ

Dim Länge, Widerherstellen, Verkürzung, aktuellZeichen, aktuellZeichen2, Klammersumme As Integer

Dim c, d, e, Endzeichen, Azeichen, Tausch As Integer

Dim Zeichen, Formel, Tz As String

RNApolymerase = 1

'bearbeitet Quadratwurzeln

Länge = Len(Selection)

Formel = Selection

aktuellZeichen = Länge

aktuellZeichen2 = Länge - 4

For aktuellZeichen = Länge To 3 Step -1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 1)

If Tz = "5" Then

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen - 1, 1)

If Tz = "," Then

If Selection.Characters(aktuellZeichen - 2).Font.Superscript = True Then

If Selection.Characters(aktuellZeichen - 2) = "0" Then

If aktuellZeichen = Länge Then

e = 1

ElseIf Selection.Characters(aktuellZeichen + 1).Font.Superscript = False Then

e = 1

Else

e = 0

End If

If e = 1 Then

If Selection.Characters(aktuellZeichen - 3).Font.Superscript = True Then

If Selection.Characters(aktuellZeichen - 3) = "^" Then

Selection.Characters(aktuellZeichen - 3) = ""

aktuellZeichen = aktuellZeichen - 1

End If

End If

End If

If e = 1 Then

Selection.Characters(aktuellZeichen - 2) = ""

Formel = Selection

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen - 3, 1)

If Tz = ")" Then

Selection.Characters(aktuellZeichen - 2) = ""

Selection.Characters(aktuellZeichen - 2) = ""

Klammersumme = -1

aktuellZeichen2 = aktuellZeichen - 4

While Klammersumme <> 0

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen2, 1)

Klammersumme = Klammersumme + Klammer(Tz)

aktuellZeichen2 = aktuellZeichen2 - 1

Wend

If aktuellZeichen2 < 2 Then

Widerherstellen = Len(Selection) + 3

Selection.Characters(aktuellZeichen2 + 1) = "\r(;"

If Len(Selection) = 1 Then

Selection.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=Widerherstellen, Extend:=wdExtend

End If

Else

If Selection.Characters(aktuellZeichen2 - 1) = "\" Then

Widerherstellen = Len(Selection) + 4

Selection.Characters(aktuellZeichen2 - 1).InsertBefore ("\r(;")

If Len(Selection) = 1 Then

Selection.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=Widerherstellen, Extend:=wdExtend

End If

Selection.Characters(aktuellZeichen).InsertAfter (")")

aktuellZeichen = aktuellZeichen + 2

Else

Selection.Characters(aktuellZeichen2 + 1) = "\r(;"

End If

End If

Else

c = 0

aktuellZeichen2 = aktuellZeichen - 3

Selection.Characters(aktuellZeichen - 2) = ")"

Selection.Characters(aktuellZeichen - 1) = ""

Selection.Characters(aktuellZeichen - 2).Font.Superscript = False

While c = 0

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen2, 1)

c = Steuerzeichen(Tz)

aktuellZeichen2 = aktuellZeichen2 - 1

If aktuellZeichen2 = 0 Then

c = 1

End If

Wend

If aktuellZeichen2 = 0 Then

Selection.Characters(1).InsertBefore ("\r(;")

Else

Selection.Characters(aktuellZeichen2 + 1).InsertAfter ("\r(;")

End If

End If

End If

End If

End If

End If

End If

If aktuellZeichen2 = 0 Then

Exit For

End If

Next

'bearbeitet Wurzeln

Länge = Len(Selection)

Formel = Selection

aktuellZeichen = Länge - 2

For aktuellZeichen = Länge - 2 To 2 Step -1

c = 0

Tausch = 0

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 1)

If Tz = "1" Then

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen + 1, 1)

If Tz = "/" Then

If Selection.Characters(aktuellZeichen).Font.Superscript = True Then

If Selection.Characters(aktuellZeichen - 1).Font.Superscript = False Then

While c = 0

If Länge < aktuellZeichen + Tausch + 2 Then

c = 1

ElseIf Selection.Characters(aktuellZeichen + Tausch + 2).Font.Superscript = False Then

c = 1

Else

c = 0

End If

Tausch = Tausch + 1

Wend

Tausch = Tausch - 1

Selection.Characters(aktuellZeichen) = ""

Selection.Characters(aktuellZeichen) = ")"

Selection.Characters(aktuellZeichen).Font.Superscript = False

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen - 1, 1)

If Tz = ")" Then

Selection.Characters(aktuellZeichen) = ""

Klammersumme = -1

aktuellZeichen2 = aktuellZeichen - 2

While Klammersumme <> 0

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen2, 1)

Klammersumme = Klammersumme + Klammer(Tz)

aktuellZeichen2 = aktuellZeichen2 - 1

Wend

If aktuellZeichen2 < 2 Then

Widerherstellen = Len(Selection) + 2

Selection.Characters(aktuellZeichen2 + 1) = "\r("

If Len(Selection) = 1 Then

Selection.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=Widerherstellen, Extend:=wdExtend

End If

Else

If Selection.Characters(aktuellZeichen2 - 1) = "\" Then

aktuellZeichen2 = aktuellZeichen2 - 2

Widerherstellen = Len(Selection) + 3

Selection.Characters(aktuellZeichen2 + 1) = "\r(\"

If Len(Selection) = 1 Then

Selection.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=Widerherstellen, Extend:=wdExtend

End If

Selection.Characters(aktuellZeichen + 2).InsertAfter (")")

aktuellZeichen = aktuellZeichen + 2

Else

Selection.Characters(aktuellZeichen2 + 1) = "\r("

End If

End If

aktuellZeichen = aktuellZeichen + 2

d = 1

For d = 1 To Tausch

Selection.Characters(aktuellZeichen2 + 3).InsertAfter (Selection.Characters(aktuellZeichen + Tausch - 1))

Selection.Characters(aktuellZeichen + Tausch) = ""

Next

Selection.Characters(aktuellZeichen2 + 3 + Tausch).InsertAfter (";")

Else

aktuellZeichen2 = aktuellZeichen - 2

c = 0

If aktuellZeichen2 <> 0 Then

While c = 0

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen2, 1)

c = Steuerzeichen(Tz)

If Tz = ";" Then

c = 1

End If

aktuellZeichen2 = aktuellZeichen2 - 1

If aktuellZeichen2 = 0 Then

c = 1

End If

Wend

End If

Widerherstellen = Len(Selection) + 2

If aktuellZeichen2 = 0 Then

Selection.Characters(1).InsertBefore ("\r(")

aktuellZeichen2 = aktuellZeichen2 - 1

Else

Selection.Characters(aktuellZeichen2 + 1).InsertAfter ("\r(")

End If

aktuellZeichen = aktuellZeichen + 3

If Len(Selection) = 1 Then

Selection.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=Widerherstellen, Extend:=wdExtend

End If

d = 1

For d = 1 To Tausch

Selection.Characters(aktuellZeichen2 + 4).InsertAfter (Selection.Characters(aktuellZeichen + Tausch))

Selection.Characters(aktuellZeichen + Tausch + 1) = ""

Next

Selection.Characters(aktuellZeichen2 + 4 + Tausch).InsertAfter (";")

End If

End If

Formel = Selection

End If

End If

End If

Next

'Wandelt Brüche um

Länge = Len(Selection)

aktuellZeichen = Länge - 1

For aktuellZeichen = Länge - 1 To 2 Step -1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 1)

If Tz = "/" Then

If Selection.Characters(aktuellZeichen + 1) = " " Then

Selection.Characters(aktuellZeichen + 1) = ""

Länge = Länge - 1

End If

If Selection.Characters(aktuellZeichen - 1) = " " Then

Selection.Characters(aktuellZeichen - 1) = ""

aktuellZeichen = aktuellZeichen - 1

Länge = Länge - 1

End If

Formel = Selection

'bearbeitet die rechte Seite

'345/54334-123 -> 0) 345/54334)-123

'345/54334 -> 0) 345/54334)

'345/5433^34 -> 0) 345/5433^34)

'345/(3+5) -> -0 345/3+5)

'243/(4\*6) -> -0 243/4\*6)

'345/(3+5)^4 -> 0) 345/(3+5)^4)

'354/\r(;23) -> 0) 354/\r(;23))

'354/\r(;23)^56 -> 0) 354/\r(;23)56^)

Verkürzung = 0

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen + 1, 1)

If Tz = "-" Then

aktuellZeichen = aktuellZeichen + 1

Verkürzung = 1 'berücksichtigt nevatives Vorzeichen

End If

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen + 1, 1)

If Tz = "(" Then

e = 1

ElseIf Tz = "\" Then 'geändert

e = 2 'e entscheidet, wo klammern gesetzt werden

Else

e = 0

End If 'aktuellzeichen = / oder -

If e <> 0 Then

If e = 2 Then

Endzeichen = aktuellZeichen + 3

Else

Endzeichen = aktuellZeichen + 1

End If

Klammersumme = 1

While Klammersumme <> 0

Endzeichen = Endzeichen + 1

Tz = Mid(Formel, Endzeichen, 1)

Klammersumme = Klammersumme + Klammer(Tz)

Wend

c = 0

d = 0 'd= hochtiefstellung

If Endzeichen < Länge Then

While c = 0

Endzeichen = Endzeichen + 1

If Endzeichen > Länge Then

c = 1

ElseIf Selection.Characters(Endzeichen).Font.Superscript = True Then

c = 0

d = 1

ElseIf Selection.Characters(Endzeichen).Font.Subscript = True Then

c = 0

d = -1

ElseIf Selection.Characters(Endzeichen) = "²" Then

c = 0

d = 2

ElseIf Selection.Characters(Endzeichen) = "³" Then

c = 0

d = 2

Else

c = 1

End If

Wend

End If

Endzeichen = Endzeichen - 1

If d <> 0 Or e = 2 Then

Selection.Characters(Endzeichen - 1).InsertAfter ("))")

Selection.Characters(Endzeichen) = Selection.Characters(Endzeichen + 2)

Selection.Characters(Endzeichen + 2) = ""

If d = 1 Then

Selection.Characters(Endzeichen).Font.Superscript = True

ElseIf d = -1 Then

Selection.Characters(Endzeichen).Font.Subscript = True

ElseIf d = 2 Then

Selection.Characters(Endzeichen).Font.Subscript = False

Selection.Characters(Endzeichen).Font.Superscript = False

End If

Selection.Characters(Endzeichen + 1).Font.Subscript = False

Selection.Characters(Endzeichen + 1).Font.Superscript = False

Else

Selection.Characters(aktuellZeichen + 1) = ""

End If

Else

Endzeichen = aktuellZeichen

c = 0

While c = 0

Endzeichen = Endzeichen + 1

If Endzeichen > Länge Then

c = 1

Else

Tz = Mid(Formel, Endzeichen, 1)

c = Steuerzeichen(Tz)

End If

Wend

If Endzeichen > Länge - 1 Then

Endzeichen = Endzeichen - 1

Else

If Selection.Characters(Endzeichen) = "(" And Selection.Characters(Endzeichen - 2) = "\" Then

Endzeichen = Endzeichen - 3

Else

Endzeichen = Endzeichen - 1

End If

End If

If Endzeichen = Länge Then

If Selection.Characters(Endzeichen).Font.Subscript = True Then

With Selection

.Characters(Endzeichen - 1).InsertAfter ("))")

.Characters(Endzeichen) = Selection.Characters(Endzeichen + 2)

.Characters(Endzeichen).Font.Subscript = True

.Characters(Endzeichen + 1).Font.Subscript = False

.Characters(Endzeichen + 1).Font.Superscript = False

.Characters(Endzeichen + 2) = ""

End With

ElseIf Selection.Characters(Endzeichen).Font.Superscript = True Then

With Selection

.Characters(Endzeichen - 1).InsertAfter ("))")

.Characters(Endzeichen) = Selection.Characters(Endzeichen + 2)

.Characters(Endzeichen).Font.Superscript = True

.Characters(Endzeichen + 1).Font.Superscript = False

.Characters(Endzeichen + 1).Font.Subscript = False

.Characters(Endzeichen + 2) = ""

End With

Else

With Selection

.Characters(Endzeichen - 1).InsertAfter ("))")

.Characters(Endzeichen) = Selection.Characters(Endzeichen + 2)

.Characters(Endzeichen + 2) = ""

.Characters(Endzeichen).Font.Superscript = False

.Characters(Endzeichen).Font.Subscript = False

.Characters(Endzeichen + 1).Font.Superscript = False

.Characters(Endzeichen + 1).Font.Subscript = False

End With

End If

Else

Selection.Characters(Endzeichen).InsertAfter (")")

Selection.Characters(Endzeichen + 1).Font.Subscript = False

Selection.Characters(Endzeichen + 1).Font.Superscript = False

End If

End If 'aktuellzeichen wird wieder /

aktuellZeichen = aktuellZeichen - Verkürzung

'bearbeitet die linke Seite und berücksichtigt folgende Fälle

'345/dfg (0 \F(345;dfg)

'2+354/wer (0 2+\F(354;wer)

'(2+345)/rzt 0- \F(2+345;rzt)

'3+(2+345)/rzt 0- 3+\F(2+345;rzt)

'24^3/46 (0 \F(24^3;46)

'(3+23)^54/234 (0 \F((3+23)^54;234)

'\r(;354)/234 (0 \F(\r(;354);234)

'\r(;354)^0,23/234 (0 \F(\r(;354)^0,23;234)

'\o(L;\s\up4(\_))/4365 (0 \F(\o(L;\s\up4(\_));4365)

'\o(L;\s\up4(\_))\_as/4365 (0 \F(\o(L;\s\up4(\_))\_as;4365)

'\s\up4(\_)/4365 (0 \F(\s\up4(\_);4365)

'4\*6/45 (0 \F(4\*6;45)

'2+(3+8)\*5/123 (0 2+\F((3+8)\*5;123)

'2+5\*(3+8)/21 (0 2+\F(5\*(3+8);21)

'(2+5)\*(7+s)/afd (0 \F((2+5)\*(7+s);afd) extra

'4\*64/asd (0 \F(4\*64;asd)

'\r(;354)\*sfd/234 (0 \F(\r(;354)\*sfd;234)

'3sd(345+sfd)/234 (0 \F(3sd(345+sfd);234) irreversibel für Reversetranskriptase

'4/34\*465/vbn (0 \F(\F(4;34)\*465;vbn)

'4+3\*(4/(3+34)) (0 4+3\*(\F(4;3+34)) extra

'(345/465)^(1/234) (0 \r(234;\F(345;465)) extra

Selection.Characters(aktuellZeichen) = ";"

Formel = Selection

c = 0

d = 0

e = 0

Azeichen = aktuellZeichen

Klammersumme = 0

While c = 0

Azeichen = Azeichen - 1

Tz = Mid(Formel, Azeichen, 1)

Klammersumme = Klammersumme + Klammer(Tz)

If Klammer(Tz) <> 0 And Klammersumme = 0 Then

d = d + 1 'Prüft, ob zwischen den Klammern weitere Klammern enthalten sind

End If

If Azeichen = 1 Then

c = 1 'berücksichtigt selbstständig negative Vorzeichen am Anfang

If Klammersumme = 1 Then Azeichen = Azeichen + 1

Else

If Tz = "+" And Klammersumme = 0 Then

c = 1

Azeichen = Azeichen + 1

End If

If (Tz = ";" Or Tz = "=") And Klammersumme = 0 Then

c = 1 'Berücksichtigt, ob der Bruch sich z.B. in einer Wurzel befindet

Azeichen = Azeichen + 1

End If

If (Tz = "-" Or Tz = ChrW(8211)) And Klammersumme = 0 Then

c = 1

Azeichen = Azeichen + 1

End If

If Klammersumme = 1 Then

c = 1

Azeichen = Azeichen + 1

End If

End If 'Azeichen = beginn des Bruches

Wend

If Selection.Characters(Azeichen) = "(" And d < 2 And Selection.Characters(aktuellZeichen - 1) = ")" Then

Selection.Characters(aktuellZeichen - 1) = ""

If Azeichen = 1 Then

Länge = Len(Selection)

Selection.Characters(1).InsertBefore ("\F")

If Len(Selection) = 1 Then

Selection.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=Länge, Extend:=wdExtend

End If

Else

Selection.Characters(Azeichen).InsertBefore ("\F")

End If

Else

If Azeichen = 1 Then

Länge = Len(Selection)

Selection.Characters(1).InsertBefore ("\F(")

If Len(Selection) = 1 Then

Selection.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=Länge, Extend:=wdExtend

End If

Else

Selection.Characters(Azeichen).InsertBefore ("\F(")

End If

End If

Formel = Selection

Länge = Len(Formel)

End If ' gehört zu If Tz = "/" Then

Next

'erkennt große klammern

Länge = Len(Selection)

Formel = Selection

aktuellZeichen = Länge - 2

c = 0

d = 0

e = 0

For aktuellZeichen = Länge - 2 To 1 Step -1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 1)

If Tz = "(" Then

Azeichen = aktuellZeichen - 2

If aktuellZeichen < 3 Then

d = 1

ElseIf Selection.Characters(Azeichen) = "\" Then

d = 0

Else

e = 0

While e = 0

If Steuerzeichen(Selection.Characters(Azeichen + 1)) = 1 Then

e = 1

d = 1

ElseIf Selection.Characters(Azeichen + 1) = "\" Then

e = 1

d = 0

End If

If Azeichen < 1 Then

e = 1

d = 1

End If

Azeichen = Azeichen - 1

Wend

End If

If d = 1 Then

d = 0

Endzeichen = aktuellZeichen + 1

Klammersumme = 1

While Klammersumme <> 0

Tz = Mid(Formel, Endzeichen, 1)

Klammersumme = Klammersumme + Klammer(Tz)

Endzeichen = Endzeichen + 1

Wend

Endzeichen = Endzeichen - 1

e = aktuellZeichen

For e = aktuellZeichen To Endzeichen

Tz = Mid(Formel, e, 1)

If Tz = "\" Then

d = 1

End If

Next

End If

If d = 1 Then

If Azeichen < 0 Then

Länge = Len(Selection)

Selection.Characters(aktuellZeichen).InsertBefore ("\b")

If Len(Selection) = 1 Then

Selection.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=Länge, Extend:=wdExtend

End If

Else

Selection.Characters(aktuellZeichen).InsertBefore ("\b")

End If

End If

End If

Next

Länge = Len(Selection) + 3

Selection.Characters(1).InsertBefore ("EQ ")

If Len(Selection) = 1 Then

Selection.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=Länge, Extend:=wdExtend

End If

If Hemmung = 1 Then

Else

Selection.Fields.Add Range:=Selection.Range, Type:=wdFieldEmpty, \_

PreserveFormatting:=False

Selection.Fields.Update

Selection.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=1, Extend:=wdExtend

End If

'Selection.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=2

'Selection.EndKey Unit:=wdLine, Extend:=wdExtend

'Selection.MoveLeft Unit:=wdCharacter, Count:=1, Extend:=wdExtend

End Function

Function Reversetransskriptase() As Integer

'EQ zu Chick

Dim Länge, aktuellZeichen, Klammersumme, Tausch As Integer

Dim c, d, e, Endzeichen, Azeichen As Integer

Dim Zeichen, Formel, Tz As String

Reversetransskriptase = 1

c = Selection.Fields.Count

If c = 1 Then

Selection.Fields.ToggleShowCodes

Selection.Fields(1).Code.Select

Länge = Selection.Characters.Count

With Selection

.Cut

.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=1

.TypeBackspace

.TypeBackspace

.Paste

.MoveLeft Unit:=wdCharacter, Count:=Länge - 2, Extend:=wdExtend

End With

Formel = Selection

Länge = Länge - 2

Tz = Mid(Formel, Länge, 1)

If Tz = " " Then

Selection.Characters(Länge) = ""

End If

Tz = Mid(Formel, 1, 1)

If Tz = "Q" Then

Selection.MoveLeft Unit:=wdCharacter, Count:=1, Extend:=wdExtend

End If

End If

'Selection.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=2

'Selection.EndKey Unit:=wdLine, Extend:=wdExtend

'Selection.MoveLeft Unit:=wdCharacter, Count:=1, Extend:=wdExtend

If Selection.Characters(1) = " " Then

If Selection.Characters(2) = " " Then

Selection.Characters(2) = ""

End If

End If

Formel = Selection

'\B entfernen

Länge = Len(Formel)

For aktuellZeichen = Länge - 3 To 4 Step -1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 1)

If Tz = "B" Or Tz = "b" Then

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen - 1, 1)

If Tz = "\" Then

Selection.Characters(aktuellZeichen) = ""

Selection.Characters(aktuellZeichen - 1) = ""

End If

End If

Next

'\F umwandeln

Formel = Selection

Länge = Len(Formel)

For aktuellZeichen = Länge - 3 To 4 Step -1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 1)

If Tz = "F" Or Tz = "f" Then

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen - 1, 1)

If Tz = "\" Then

Formel = Selection

Länge = Len(Formel)

Endzeichen = aktuellZeichen + 1

Klammersumme = 1

While Klammersumme <> 0 'aktuellzeichen = F

Endzeichen = Endzeichen + 1 'Endzeichen = letzte Klammer)

Tz = Mid(Formel, Endzeichen, 1)

Klammersumme = Klammersumme + Klammer(Tz)

If Selection.Characters(Endzeichen) = ";" And Klammersumme = 1 Then

Azeichen = Endzeichen 'Azeichen = ;

End If

Wend

'entfernt Leerzeichen

If Selection.Characters(Azeichen + 1) = " " Then

Selection.Characters(Azeichen + 1) = ""

Endzeichen = Endzeichen - 1

Formel = Selection

End If

If Selection.Characters(Azeichen - 1) = " " Then

Selection.Characters(Azeichen - 1) = ""

Endzeichen = Endzeichen - 1

Azeichen = Azeichen - 1

Formel = Selection

End If

'bearbeitet die rechte Seite

e = 0

For c = Azeichen + 2 To Endzeichen

Tz = Mid(Formel, c, 1)

Select Case Tz 'Selection.Characters(c)

Case "+", "-", "\*", "·", "/", ChrW(8729)

e = 0

Exit For

Case Else

e = 1

End Select

Next

If e = 1 Then

Selection.Characters(Endzeichen) = ""

Else

Selection.Characters(Azeichen).InsertAfter ("(")

End If

Selection.Characters(Azeichen) = "/"

'Bearbeitet die linke Seite

e = 0 '+3 berücksichtigt negative Vorzeichen

For c = aktuellZeichen + 3 To Azeichen - 1

Tz = Mid(Formel, c, 1)

Select Case Tz 'Selection.Characters(c)

Case "+", "-"

e = 1

Exit For

Case Else

e = 0 ' Klammer entfernen

End Select

Next

If e = 1 Then

If Selection.Characters(aktuellZeichen + 2) = "(" Then

e = 0

ElseIf Selection.Characters(aktuellZeichen + 2) = "-" And Selection.Characters(aktuellZeichen + 3) = "(" Then

e = 0

Else

e = 1 'Klammer hinzufügen

End If

End If

If e = 1 Then

With Selection.Characters(Azeichen)

.InsertBefore (")")

.Font.Superscript = False

.Font.Superscript = False

End With

Else

Selection.Characters(aktuellZeichen + 1) = ""

End If

Selection.Characters(aktuellZeichen) = ""

Selection.Characters(aktuellZeichen - 1) = ""

End If

End If

Next

'\R umwandeln

Formel = Selection

Länge = Len(Formel)

For aktuellZeichen = Länge - 3 To 4 Step -1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 1)

If Tz = "R" Or Tz = "r" Then

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen - 1, 1)

If Tz = "\" Then

Endzeichen = aktuellZeichen + 1

Klammersumme = 1

While Klammersumme <> 0 'aktuellzeichen = R

Endzeichen = Endzeichen + 1 'Endzeichen = letzte Klammer)

Tz = Mid(Formel, Endzeichen, 1)

Klammersumme = Klammersumme + Klammer(Tz)

If Tz = ";" And Klammersumme = 1 Then

Azeichen = Endzeichen 'Azeichen = ;

End If

Wend

'entfernt Leerzeichen

If Selection.Characters(Azeichen + 1) = " " Then

Selection.Characters(Azeichen + 1) = ""

Endzeichen = Endzeichen - 1

Formel = Selection

End If

If Selection.Characters(Azeichen - 1) = " " Then

Selection.Characters(Azeichen - 1) = ""

Endzeichen = Endzeichen - 1

Azeichen = Azeichen - 1

Formel = Selection

End If

e = 0

Tausch = 0

For c = Azeichen + 1 To Endzeichen

Tz = Mid(Formel, c, 1)

Select Case Tz

Case "+", "-", "\*", "·", "/", ChrW(8729), ChrW(8211)

e = 1 '1= Klammer hinzufügen

Exit For

Case Else

If Selection.Characters(c).Font.Superscript = True Or Selection.Characters(c).Font.Subscript = True Then

If Selection.Characters(aktuellZeichen).Font.Superscript = True Then

e = 0

Selection.Characters(Endzeichen).InsertBefore ("^")

Endzeichen = Endzeichen + 1

Else

e = 1

End If

Exit For

Else

e = 0

End If

End Select

Next

If aktuellZeichen = Azeichen - 2 Then

If e = 1 Then

' Berücksichtigt folgende Fälle

'EQ \r(;123) ->-- 123^0,5

'EQ \r(;123+4\*(234)-123) ->00 (123+4\*(234)-123)^0,5

'EQ \r(;\s\up1(4)) ->-- \s\up1(4)^0,5

'EQ \r(;-354) ->00 (-354)^0,5

'EQ \r(;(354-34)^0,4) ->00 ((354-34)^0,4)^0,5

'EQ \r(;(354-34)\_0,4) ->00 ((354-34)\_0,4)^0,5

With Selection

.Characters(Endzeichen).InsertBefore (")0,5")

.Characters(Endzeichen + 4) = ""

.Characters(Endzeichen).Font.Superscript = False

.Characters(Endzeichen).Font.Subscript = False

.Characters(Endzeichen + 1).Font.Superscript = True

.Characters(Endzeichen + 2).Font.Superscript = True

.Characters(Endzeichen + 3).Font.Superscript = True

.Characters(aktuellZeichen) = ""

.Characters(aktuellZeichen + 1) = ""

.Characters(aktuellZeichen - 1) = ""

End With

Else

With Selection

.Characters(Endzeichen).InsertBefore ("0,5")

.Characters(Endzeichen + 3) = ""

.Characters(Endzeichen).Font.Superscript = True

.Characters(Endzeichen + 1).Font.Superscript = True

.Characters(Endzeichen + 2).Font.Superscript = True

.Characters(aktuellZeichen) = ""

.Characters(aktuellZeichen) = ""

.Characters(aktuellZeichen) = ""

.Characters(aktuellZeichen - 1) = ""

End With

End If

Else

Tausch = Azeichen - aktuellZeichen - 2

c = 0

For d = 1 To Tausch

If Steuerzeichen(Selection.Characters(aktuellZeichen + 1 + d)) = 1 Then

If Klammer(Selection.Characters(aktuellZeichen + 1 + d)) = 0 Then

c = 1 'erzeugt eine Klammer; irreversibel für RNA-Polymerase

End If

End If

Next

If c = 1 Then

Selection.Characters(Azeichen).InsertBefore (")")

Selection.Characters(aktuellZeichen + 1).InsertAfter ("(")

Tausch = Tausch + 2

Endzeichen = Endzeichen + 2

Azeichen = Azeichen + 2

End If

For d = 1 To Tausch

With Selection

.Characters(Endzeichen).InsertBefore (Selection.Characters(aktuellZeichen + 2))

.Characters(Endzeichen).Font.Superscript = True

.Characters(aktuellZeichen + 2) = ""

End With

Next

Selection.Characters(Endzeichen) = ""

If e = 1 Then

With Selection

.Characters(Endzeichen - Tausch) = "1/" & Selection.Characters(Endzeichen - Tausch)

.Characters(Endzeichen - Tausch - 1).InsertAfter (")")

.Characters(Endzeichen - Tausch).Font.Superscript = False

.Characters(Endzeichen - Tausch).Font.Subscript = False

.Characters(aktuellZeichen) = ""

.Characters(aktuellZeichen + 1) = ""

.Characters(aktuellZeichen - 1) = ""

End With

Else

With Selection

.Characters(Endzeichen - Tausch).InsertBefore "1/" '& Selection.Characters(Endzeichen - Tausch)

.Characters(Endzeichen - Tausch).Font.Superscript = True

.Characters(Endzeichen - Tausch + 1).Font.Superscript = True

.Characters(aktuellZeichen) = ""

.Characters(aktuellZeichen) = ""

.Characters(aktuellZeichen) = ""

.Characters(aktuellZeichen - 1) = ""

End With

End If

End If

End If

End If

Next

For c = 1 To 3 'ganz zum schluss

If Selection.Characters(c) = "E" Or Selection.Characters(c) = "e" Then

If Selection.Characters(c + 1) = "Q" Or Selection.Characters(c + 1) = "q" Then

If Selection.Characters(c + 2) = " " Then

If c = 1 Then

Länge = Len(Selection) - 3

End If

Selection.Characters(c + 2).Delete

Selection.Characters(c + 1).Delete

Selection.Characters(c).Delete

If Len(Selection) = 1 Then

Selection.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=Länge, Extend:=wdExtend

End If

Exit For

End If

End If

End If

Next

End Function

Function Ribosom() As Integer

'EQ zu Wikipedia

Dim Länge, aktuellZeichen, Klammersumme, Tausch As Integer

Dim c, d, e, Endzeichen, Azeichen As Integer

Dim Zeichen, Formel, Tz, Schriftart, Schriftart2 As String

Ribosom = 1

c = DNAse()

Formel = Selection

Länge = Len(Formel)

Tz = Mid(Formel, Länge, 1) & "</math>"

Selection.Characters(Länge).InsertBefore (Tz)

Selection.Characters(Länge + 8) = ""

Tz = Mid(Formel, 1, 1)

If Tz = " " Then

Selection.Characters(1) = ":<math>"

d = 1

Tz = Mid(Formel, 2, 1)

Else

Selection.Characters(1).InsertBefore (":<math>")

d = 0

End If

Länge = Länge - d + 14

If Len(Selection) = 1 Then

Selection.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=Länge, Extend:=wdExtend

End If

If Tz = "e" Or Tz = "E" Then

Selection.Characters(8) = ""

Selection.Characters(8) = ""

Else

Tz = Mid(Formel, 3, 1)

If Tz = "e" Or Tz = "E" Then

Selection.Characters(9) = ""

Selection.Characters(9) = ""

End If

End If

'große Klammern

Formel = Selection

Länge = Len(Formel)

For aktuellZeichen = Länge - 7 To 8 Step -1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 3)

If Tz = "\b(" Or Tz = "\B(" Then

Klammersumme = 1

Endzeichen = aktuellZeichen + 3

While Klammersumme <> 0

Tz = Mid(Formel, Endzeichen, 1)

Klammersumme = Klammersumme + Klammer(Tz)

Endzeichen = Endzeichen + 1

Wend

Selection.Characters(Endzeichen - 1).InsertBefore ("\right")

Selection.Characters(aktuellZeichen + 1) = "left"

Formel = Selection

End If

Next

'Brüche

Länge = Len(Formel)

For aktuellZeichen = Länge - 7 To 8 Step -1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 3)

If Tz = "\f(" Or Tz = "\F(" Then

Klammersumme = 1

Endzeichen = aktuellZeichen + 3

While Klammersumme <> 0

Tz = Mid(Formel, Endzeichen, 1)

Klammersumme = Klammersumme + Klammer(Tz)

If Tz = ";" And Klammersumme = 1 Then

Azeichen = Endzeichen

End If

Endzeichen = Endzeichen + 1

Wend

'aktuellZeichen= \ Azeichen= ; Endzeichen-1 =)

Selection.Characters(Endzeichen - 1) = "}"

Selection.Characters(Azeichen) = "}{"

Selection.Characters(aktuellZeichen + 2) = "frac{"

Selection.Characters(aktuellZeichen + 1) = ""

Formel = Selection

End If

Next

'Wurzeln

Länge = Len(Formel)

For aktuellZeichen = Länge - 7 To 8 Step -1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 3)

If Tz = "\r(" Or Tz = "\R(" Then

Klammersumme = 1

Endzeichen = aktuellZeichen + 3

While Klammersumme <> 0

Tz = Mid(Formel, Endzeichen, 1)

Klammersumme = Klammersumme + Klammer(Tz)

If Tz = ";" And Klammersumme = 1 Then

Azeichen = Endzeichen

End If

Endzeichen = Endzeichen + 1

Wend

'aktuellZeichen= \ Azeichen= ; Endzeichen-1 =)

If Azeichen = aktuellZeichen + 3 Then

Selection.Characters(Endzeichen - 1) = "}"

Selection.Characters(aktuellZeichen + 3) = ""

Selection.Characters(aktuellZeichen + 1) = "s"

Selection.Characters(aktuellZeichen + 2) = "qrt{"

Else

Selection.Characters(Endzeichen - 1) = "}"

Selection.Characters(Azeichen) = "]{"

Selection.Characters(aktuellZeichen + 1) = "s"

Selection.Characters(aktuellZeichen + 2) = "qrt["

End If

Formel = Selection

End If

Next

'Sonderzeichen Unicode

Länge = Len(Formel)

For aktuellZeichen = Länge - 7 To 8 Step -1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 1)

Select Case AscW(Tz)

Case 42

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\cdot "

Case 44

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "{,}"

Case 183

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\cdot "

Case 186

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "^\circ "

Case 196

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\ddot{A}"

Case 214

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\ddot{O}"

Case 216

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\varnothing "

Case 220

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\ddot{U}"

Case 228

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\ddot{a}"

Case 246

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\ddot{o}"

Case 248

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\varnothing "

Case 252

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\ddot{u}"

Case 913

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Alpha "

Case 914

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Beta "

Case 915

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Gamma "

Case 916

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Delta "

Case 917

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Epsilon "

Case 918

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Zeta "

Case 919

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Eta "

Case 920

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Theta "

Case 921

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Iota "

Case 922

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Kappa "

Case 923

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Lambda "

Case 924

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Mu "

Case 925

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Nu "

Case 926

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Omicron "

Case 927

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Xi "

Case 928

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Pi "

Case 929

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Rho "

Case 931

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Sigma "

Case 932

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Tau "

Case 933

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Upsilon "

Case 934

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Phi "

Case 935

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Chi "

Case 936

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Psi "

Case 937

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Omega "

Case 945

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\alpha "

Case 946

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\beta "

Case 947

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\gamma "

Case 948

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\delta "

Case 949

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\epsilon "

Case 950

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\zeta "

Case 951

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\eta "

Case 952

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\theta "

Case 953

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\iota "

Case 954

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\kappa "

Case 955

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\lambda "

Case 956

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\mu "

Case 957

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\nu "

Case 958

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\xi "

Case 959

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\omicron "

Case 960

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\pi "

Case 961

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\rho "

Case 962

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\varsigma "

Case 963

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\sigma "

Case 964

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\tau "

Case 965

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\upsilon "

Case 966

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\phi "

Case 967

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\chi "

Case 968

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Psi "

Case 969

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\omega "

Case 8729

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\cdot "

Case 8734

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\infty "

Case 8776

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\approx "

'Case 8800

'Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\ungleich "

Case 8804

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\le "

Case 8805

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\ge "

End Select

Next

'Schriftart Symbol

Schriftart = Selection.Font.Name

Formel = Selection

Länge = Len(Formel)

d = 0

If Schriftart = "" Then

d = 1

Schriftart = Selection.Characters(Länge).Font.Name

If Schriftart = "Symbol" Then

Schriftart = Selection.Characters(1).Font.Name

If Schriftart = "Symbol" Then

For c = 2 To Länge - 1

Schriftart = Selection.Characters(c).Font.Name

If Schriftart <> "Symbol" Then Exit For

Next

End If

End If

End If

If d = 1 Or Schriftart = "Symbol" Then 'verhindert Bremse

For aktuellZeichen = Länge To 1 Step -1

If Selection.Characters(aktuellZeichen).Font.Name = "Symbol" Then

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 1)

e = AscW(Tz)

e = e Mod 256

If e < 0 Then e = e + 256

If e < 64 Then

Selection.Characters(aktuellZeichen) = Chr(e)

End If

Selection.Characters(aktuellZeichen).Font.Name = Schriftart

Select Case e

Case 65

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Alpha "

Case 66

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Beta "

Case 67

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Chi "

Case 68

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Delta "

Case 69

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Epsilon "

Case 70

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Phi "

Case 71

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Gamma "

Case 72

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Eta "

Case 73

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Iota "

Case 74

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\vartheta "

Case 75

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Kappa "

Case 76

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Lambda "

Case 77

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Mu "

Case 78

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Nu "

Case 79

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Omicron "

Case 80

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Pi "

Case 81

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Theta "

Case 82

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Rho "

Case 83

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Sigma "

Case 84

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Tau "

Case 85

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Upsilon "

Case 86

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\varsigma "

Case 87

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Omega "

Case 88

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Xi "

Case 89

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Psi "

Case 90

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Zeta "

Case 97

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\alpha "

Case 98

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\beta "

Case 99

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\chi "

Case 100

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\delta "

Case 101

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\epsilon "

Case 102

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\phi "

Case 103

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\gamma "

Case 104

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\eta "

Case 105

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\iota "

Case 106

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\kappa "

Case 107

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\lambda "

Case 108

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\mu "

Case 109

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\nu "

Case 110

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\omicron "

Case 111

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\pi "

Case 112

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\theta "

Case 113

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\rho "

Case 114

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\sigma "

Case 115

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\tau "

Case 116

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\upsilon "

Case 117

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\varpi "

Case 118

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\omega "

Case 119

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\xi "

Case 120

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\psi "

Case 121

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\zeta "

Case 163

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\le "

Case 165

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\infty "

Case 176

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "^\circ "

Case 177

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\pm "

Case 179

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\ge "

'Case 185

'Selection.Characters(aktuellZeichen) = "ungleich "

Case 187

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\approx "

Case 198

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\varnothing "

Case 213

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Pi "

Case 229

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "\Sigma "

End Select

End If

Next

End If

'bearbeitet Lambdaquer

Formel = Selection

Länge = Len(Formel)

For aktuellZeichen = Länge - 20 To 8 Step -1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 3)

If Tz = "\o(" Then

c = 0

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen + 3, 11)

If Tz = "\lambda ;¯)" Or Tz = "¯;\lambda )" Then c = 1: d = 0

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen + 3, 19)

If Tz = "\lambda ;\s\up1(¯))" Or Tz = "\s\up1(¯);\lambda )" Then c = 1: d = 1

If c = 1 Then

With Selection

.Characters(aktuellZeichen + 2) = "v"

.Characters(aktuellZeichen + 3) = "e"

.Characters(aktuellZeichen + 4) = "r"

.Characters(aktuellZeichen + 5) = "l"

.Characters(aktuellZeichen + 6) = "i"

.Characters(aktuellZeichen + 7) = "n"

.Characters(aktuellZeichen + 8) = "e"

.Characters(aktuellZeichen + 9) = "{"

.Characters(aktuellZeichen + 10) = "\"

.Characters(aktuellZeichen + 11) = "l"

.Characters(aktuellZeichen + 12) = "a"

End With

If d = 0 Then

Selection.Characters(aktuellZeichen + 13) = "mbda }"

Else

With Selection

.Characters(aktuellZeichen + 13) = "m"

.Characters(aktuellZeichen + 14) = "b"

.Characters(aktuellZeichen + 15) = "d"

.Characters(aktuellZeichen + 16) = "a"

.Characters(aktuellZeichen + 17) = " "

.Characters(aktuellZeichen + 18) = "}"

.Characters(aktuellZeichen + 19) = ""

.Characters(aktuellZeichen + 19) = ""

.Characters(aktuellZeichen + 19) = ""

End With

End If

End If

End If

Next

End Function

Function Reversetranslatase(ByVal Hemmung As Integer) As Integer

'Wikipedia zu EQ

Dim Länge, aktuellZeichen, Klammersumme, Tausch As Integer

Dim c, d, e, Endzeichen, Verkürzung, Azeichen As Integer

Dim Zeichen, Formel, Tz, Tt, Symbol, Schriftart, Schriftart2 As String

Reversetranslatase = 1

Formel = Selection

Länge = Len(Formel)

For aktuellZeichen = Länge - 9 To 7 Step -1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 1)

If Tz = "\" Then

c = 1

Endzeichen = 1

While c = 1

Tt = Mid(Formel, aktuellZeichen + Endzeichen, 1)

If Tt <> "" Then

d = Asc(Tt)

Else

d = 63

End If

If (d > 64 And d < 91) Or (d > 96 And d < 123) Then

c = 1

Endzeichen = Endzeichen + 1

ElseIf d = 123 Then

Endzeichen = Endzeichen + 3

c = 0

Else

c = 0

End If

Wend

Tt = Mid(Formel, aktuellZeichen + 1, Endzeichen - 1)

e = 1

Select Case Tt

Case "cdot"

Symbol = ChrW(183)

Case "circ"

Symbol = ChrW(186)

aktuellZeichen = aktuellZeichen - 1

Case "ddot{A}"

Symbol = ChrW(196)

Case "ddot{O}"

Symbol = ChrW(214)

Case "ddot{U}"

Symbol = ChrW(220)

Case "ddot{a}"

Symbol = ChrW(228)

Case "ddot{o}"

Symbol = ChrW(246)

Case "varnothing"

Symbol = ChrW(248)

Case "ddot{u}"

Symbol = ChrW(252)

Case "Alpha"

Symbol = ChrW(913)

Case "Beta"

Symbol = ChrW(914)

Case "Gamma"

Symbol = ChrW(915)

Case "Delta"

Symbol = ChrW(916)

Case "Epsilon"

Symbol = ChrW(917)

Case "Zeta"

Symbol = ChrW(918)

Case "Eta"

Symbol = ChrW(919)

Case "Theta"

Symbol = ChrW(920)

Case "Iota"

Symbol = ChrW(921)

Case "Kappa"

Symbol = ChrW(922)

Case "Lambda"

Symbol = ChrW(923)

Case "Mu"

Symbol = ChrW(924)

Case "Nu"

Symbol = ChrW(925)

Case "Omicron"

Symbol = ChrW(926)

Case "Xi"

Symbol = ChrW(927)

Case "Pi"

Symbol = ChrW(928)

Case "Rho"

Symbol = ChrW(929)

Case "Sigma"

Symbol = ChrW(931)

Case "Tau"

Symbol = ChrW(932)

Case "Upsilon"

Symbol = ChrW(933)

Case "Phi"

Symbol = ChrW(934)

Case "Chi"

Symbol = ChrW(935)

Case "Psi"

Symbol = ChrW(936)

Case "Omega"

Symbol = ChrW(937)

Case "alpha"

Symbol = ChrW(945)

Case "beta"

Symbol = ChrW(946)

Case "gamma"

Symbol = ChrW(947)

Case "delta"

Symbol = ChrW(948)

Case "epsilon"

Symbol = ChrW(949)

Case "zeta"

Symbol = ChrW(950)

Case "eta"

Symbol = ChrW(951)

Case "theta"

Symbol = ChrW(952)

Case "iota"

Symbol = ChrW(953)

Case "kappa"

Symbol = ChrW(954)

Case "lambda"

Symbol = ChrW(955)

Case "mu"

Symbol = ChrW(956)

Case "nu"

Symbol = ChrW(957)

Case "xi"

Symbol = ChrW(958)

Case "omicron"

Symbol = ChrW(959)

Case "pi"

Symbol = ChrW(960)

Case "rho"

Symbol = ChrW(961)

Case "varsigma"

Symbol = ChrW(962)

Case "sigma"

Symbol = ChrW(963)

Case "tau"

Symbol = ChrW(964)

Case "upsilon"

Symbol = ChrW(965)

Case "phi"

Symbol = ChrW(966)

Case "chi"

Symbol = ChrW(967)

Case "Psi"

Symbol = ChrW(968)

Case "omega"

Symbol = ChrW(969)

Case "infty"

Symbol = ChrW(8734)

Case "approx"

Symbol = ChrW(8776)

Case "ungleich"

Symbol = ChrW(8800)

Case "le"

Symbol = ChrW(8804)

Case "ge"

Symbol = ChrW(8805)

Case Else

e = 0

End Select

If e = 1 Then

If d = 32 Then

Formel = Mid(Formel, 1, aktuellZeichen - 1) & Symbol & Mid(Formel, aktuellZeichen + Endzeichen + 1)

Else

Formel = Mid(Formel, 1, aktuellZeichen - 1) & Symbol & Mid(Formel, aktuellZeichen + Endzeichen)

End If

End If

End If

Next

'Komma

Länge = Len(Formel)

For aktuellZeichen = Länge - 9 To 7 Step -1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 3)

If Tz = "{,}" Then

Formel = Mid(Formel, 1, aktuellZeichen - 1) & "," & Mid(Formel, aktuellZeichen + 3)

End If

Next

'overline

Länge = Len(Formel)

For aktuellZeichen = Länge - 17 To 7 Step -1 '77

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 10)

If Tz = "\overline{" Then

Tt = Mid(Formel, aktuellZeichen + 11, 1)

If Tt = "}" Then

Mid(Formel, aktuellZeichen + 2, 8) = "(\s\up1("

Mid(Formel, aktuellZeichen + 11, 1) = ")"

Formel = Mid(Formel, 1, aktuellZeichen + 9) & "¯);" & Mid(Formel, aktuellZeichen + 10)

End If

End If

Next

'bearbeitet Wurzeln

Länge = Len(Formel)

For aktuellZeichen = Länge - 14 To 7 Step -1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 5)

If Tz = "\sqrt" Then

Formel = Mid(Formel, 1, aktuellZeichen) & "r(" & Mid(Formel, aktuellZeichen + 5)

Endzeichen = aktuellZeichen + 3

Tz = Mid(Formel, Endzeichen, 1)

If Tz = "[" Then

Formel = Mid(Formel, 1, Endzeichen - 1) & Mid(Formel, Endzeichen + 1)

While Tz <> "]"

Endzeichen = Endzeichen + 1

Tz = Mid(Formel, Endzeichen, 1)

If Tz = "" Then Tz = "]"

Wend

Formel = Mid(Formel, 1, Endzeichen - 1) & Mid(Formel, Endzeichen + 1)

Tz = Mid(Formel, Endzeichen, 1)

End If

If Tz = "{" Then

Mid(Formel, Endzeichen, 1) = ";"

Klammersumme = 1

While Klammersumme > 0

Endzeichen = Endzeichen + 1

Tz = Mid(Formel, Endzeichen, 1)

Klammersumme = Klammersumme + Klammer2(Tz)

Wend

Mid(Formel, Endzeichen, 1) = ")"

End If

End If

Next

'Brüche

Länge = Len(Formel)

For aktuellZeichen = Länge - 17 To 7 Step -1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 5)

If Tz = "\frac" Then

Mid(Formel, aktuellZeichen + 5, 1) = "("

Formel = Mid(Formel, 1, aktuellZeichen + 1) & Mid(Formel, aktuellZeichen + 5)

Klammersumme = 1

Endzeichen = aktuellZeichen + 2

While Klammersumme > 0

Endzeichen = Endzeichen + 1

Klammersumme = Klammersumme + Klammer2(Mid(Formel, Endzeichen, 1))

Wend

Formel = Mid(Formel, 1, Endzeichen - 1) & ";" & Mid(Formel, Endzeichen + 2)

Klammersumme = 1

While Klammersumme > 0

Endzeichen = Endzeichen + 1

Klammersumme = Klammersumme + Klammer2(Mid(Formel, Endzeichen, 1))

Wend

Mid(Formel, Endzeichen, 1) = ")"

End If

Next

'große Klammern

Länge = Len(Formel)

For aktuellZeichen = Länge - 13 To 7 Step -1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 6)

If Tz = "\right" Then

Formel = Mid(Formel, 1, aktuellZeichen - 1) & Mid(Formel, aktuellZeichen + 6)

End If

If Tz = "\left(" Then

Formel = Mid(Formel, 1, aktuellZeichen - 1) & "\b" & Mid(Formel, aktuellZeichen + 5)

End If

Next

'^2 ^3

Länge = Len(Formel)

For aktuellZeichen = Länge - 8 To 8 Step -1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 1)

If Tz = "^" Then

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen + 1, 1)

If Tz = "2" Then

Formel = Mid(Formel, 1, aktuellZeichen - 1) & "²" & Mid(Formel, aktuellZeichen + 2)

ElseIf Tz = "3" Then

Formel = Mid(Formel, 1, aktuellZeichen - 1) & "³" & Mid(Formel, aktuellZeichen + 2)

End If

End If

Next

Länge = Len(Formel)

Formel = "EQ " & Mid(Formel, 9, Länge - 15)

Länge = Länge - 12

Selection.TypeText Formel

Selection.MoveLeft Unit:=wdCharacter, Count:=Länge, Extend:=wdExtend

'stellt hochtief von DNApolymerase mit {} statt ()

aktuellZeichen = 1

For aktuellZeichen = Länge To 5 Step -1

Verkürzung = 0

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 1)

If Tz = "^" Then

d = 1

ElseIf Tz = "\_" Then

d = -1

Else

d = 0

End If

If d <> 0 Then

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen + 1, 1)

If Tz = " " Then

Selection.Characters(aktuellZeichen + 1) = ""

Formel = Selection

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen + 1, 1)

End If

Selection.Characters(aktuellZeichen) = "" '+1 im string

If Tz = "{" Then

Klammersumme = 1

Selection.Characters(aktuellZeichen) = ""

While Klammersumme > 0

If d = 1 Then

Selection.Characters(aktuellZeichen).Font.Superscript = True

ElseIf d = -1 Then

Selection.Characters(aktuellZeichen).Font.Subscript = True

End If

aktuellZeichen = aktuellZeichen + 1

Verkürzung = Verkürzung + 1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen + 2, 1)

Klammersumme = Klammersumme + Klammer2(Tz)

If Tz = "^" Then

Selection.Characters(aktuellZeichen).InsertBefore Tz

d = 0

ElseIf Tz = "\_" Then

Selection.Characters(aktuellZeichen).InsertBefore Tz

d = 0

End If

Wend

Selection.Characters(aktuellZeichen) = ""

aktuellZeichen = aktuellZeichen - Verkürzung

Else 'Tz <> "{"

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen + 1, 1)

c = Steuerzeichen(Tz)

While c = 0

If d = 1 Then

Selection.Characters(aktuellZeichen).Font.Superscript = True

Else

Selection.Characters(aktuellZeichen).Font.Subscript = True

End If

aktuellZeichen = aktuellZeichen + 1

Verkürzung = Verkürzung + 1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen + 1, 1)

c = Steuerzeichen(Tz)

If Tz = "" Or Tz = ";" Then

c = 1

End If

Wend

aktuellZeichen = aktuellZeichen - Verkürzung

End If

End If

Next

If Hemmung = 1 Then

Else

Selection.Fields.Add Range:=Selection.Range, Type:=wdFieldEmpty, \_

PreserveFormatting:=False

Selection.Fields.Update

Selection.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=1, Extend:=wdExtend

End If

End Function

**Sub Formelwürfel()**

Dim a, b, c, d, e, durch, Steuer As Integer

Dim Klammersumme, Zusatzlänge, Länge, aktuellZeichen As Integer

Dim X, Y, Formel, Tz As String

Dim Ort(3), Position(255) As Integer

Application.ScreenUpdating = False

For d = 1 To 20 'Anzahl der Formeln

Selection.TypeText ("2")

Zusatzlänge = 0

durch = 0

c = 200 'Komplexitzität der Formel

Klammersumme = 0

For b = 1 To c

a = Int((122 - 32 + 1) \* Rnd + 32)

X = Chr(a)

If Steuer = 0 Then

For e = 1 To 4

If Steuerzeichen(X) = 0 Then

a = Int((122 - 32 + 1) \* Rnd + 32)

X = Chr(a)

End If

If X = "!" Or X = "§" Or X = "%" Then

Exit For

End If

If X = "+" Or X = "j" Or X = "#" Or X = "&" Or X = "$" Then

X = "/"

Exit For

End If

Next

Else

If a < 60 Then

a = a + 20

X = Chr(a)

Steuer = 0

End If

End If

If a = 41 And Klammersumme = 0 Then

a = 40

End If

If a > 65 And a < 122 Then

If Int(4 \* Rnd) = 3 Then

a = a + 848

End If

End If

X = ChrW(a)

If b = 1 And (X = "^" Or X = "\_") Then

X = "1"

End If

If X = "(" Then

Klammersumme = Klammersumme + 1

ElseIf X = ")" Then

Klammersumme = Klammersumme - 1

End If

If X = "!" Or X = "§" Or X = "%" Or X = "." Or X = "@" Then

If Klammersumme > 0 Then

X = Chr(Int((122 - 98) \* Rnd + 97)) & ")^0,5+"

Zusatzlänge = Zusatzlänge + 6

Klammersumme = Klammersumme - 1

Else

X = "^0,5-"

Zusatzlänge = Zusatzlänge + 4

End If

ElseIf X = ":" Or X = ";" Then

Selection.MoveLeft Unit:=wdCharacter, Count:=1

If Steuerzeichen(Selection.Characters(1)) = 0 Then

X = "^(1/" & Chr(Int((122 - 98) \* Rnd + 97)) & ")"

Zusatzlänge = Zusatzlänge + 5

Else

X = "\*"

End If

Selection.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=1

ElseIf X = "\" Then

X = "+"

ElseIf X = "j" Or X = "#" Or X = "&" Or X = "$" Then

X = "/"

ElseIf X = "=" Then

If Klammersumme = 0 Then

X = "("

Klammersumme = Klammersumme + 1

Else

X = ")"

Klammersumme = Klammersumme - 1

End If

End If

If X = "/" Or X = "\*" Then

If durch = 1 Then

X = "-"

End If

If X = "/" And durch = 0 Then

durch = 1

End If

End If

If X = "+" Or X = "-" Then

durch = 0

End If

If b = c Then

If X = "^" Or X = "\_" Then

X = "j"

End If

End If

If X = "/" Then

X = Chr(Int((122 - 98) \* Rnd + 97)) & X & Chr(Int((122 - 98) \* Rnd + 97))

Zusatzlänge = Zusatzlänge + 2

End If

Selection.TypeText (X)

X = Left(X, 1)

Steuer = Steuerzeichen(X)

Next

If Klammersumme > 0 Then

For b = 1 To Klammersumme

Selection.TypeText (")")

Next

End If

Selection.MoveLeft Unit:=wdCharacter, Count:=c + Zusatzlänge + Klammersumme + 1, Extend:=wdExtend

'Selection.Copy

'Länge = Len(Selection)

'Selection.MoveDown Unit:=wdLine, Count:=1

'Selection.Paste

'Selection.MoveLeft Unit:=wdCharacter, Count:=Länge, Extend:=wdExtend

a = DNApolymerase()

a = RNApolymerase(1)

'Selection.Copy

'Länge = Len(Selection)

'Selection.MoveDown Unit:=wdLine, Count:=1

'Selection.Paste

'Selection.MoveLeft Unit:=wdCharacter, Count:=Länge, Extend:=wdExtend

'baut große Objekte herum

For c = 1 To 5 'Anzahl der großen Objekte

Formel = Selection

Länge = Len(Formel)

X = ""

Klammersumme = 0

aktuellZeichen = 3

e = 0

While aktuellZeichen < Länge

aktuellZeichen = aktuellZeichen + 1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 1)

If Tz = "\" Then

aktuellZeichen = aktuellZeichen + 2

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 1)

End If

If Tz = "(" Then

Klammersumme = 1

aktuellZeichen = aktuellZeichen + 1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 1)

While Klammersumme > 0

Klammersumme = Klammersumme + Klammer(Tz)

aktuellZeichen = aktuellZeichen + 1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 1)

If Tz = "(" And Klammersumme = 0 Then

Klammersumme = 1

aktuellZeichen = aktuellZeichen + 1

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 1)

'e = e + 1

'Position(e) = aktuellZeichen

'X = X & Tz

End If

If Tz = "\" And Klammersumme = 0 Then

Klammersumme = 1

aktuellZeichen = aktuellZeichen + 3

Tz = Mid(Formel, aktuellZeichen, 1)

'e = e + 1

'Position(e) = aktuellZeichen

'X = X & Tz

End If

Wend

End If

e = e + 1

Position(e) = aktuellZeichen

X = X & Tz

Wend

e = Len(X)

a = Int(Rnd() \* 4 + 1)

If c = 1 Then a = 4

Ort(1) = Int(Rnd() \* (e + 1) + 1)

Ort(2) = Int(Rnd() \* (e + 1) + 1)

If Ort(1) = Ort(2) Then Ort(2) = Ort(1) + 1

If Ort(2) < Ort(1) Then

Ort(0) = Ort(1) ' Ort 1 ist kleiner

Ort(1) = Ort(2)

Ort(2) = Ort(0)

End If

If Ort(2) > e Then

Position(Ort(2)) = Länge

Ort(1) = Ort(1) - 1

If Ort(1) = 0 Then Ort(1) = 1

End If

If Ort(2) - Ort(1) = 1 Then

If Position(Ort(2)) - Position(Ort(1)) = 1 Then

If Ort(1) > 2 Then Ort(1) = Ort(1) \ 2 + 1

End If

End If

If a = 3 Or a = 4 Then

Ort(3) = (Ort(2) + Ort(1)) \ 2

If Ort(3) = Ort(1) Then a = 2

If Ort(2) = Ort(3) Then a = 1

If Ort(2) - e = 2 Then

a = 1

End If

End If

X = X

If a = 1 Then 'Ort 2 = Ende, Ort 1 = Anfang und Ort 3 = Mitte

Selection.Characters(Position(Ort(2))).InsertBefore (")")

Selection.Characters(Position(Ort(2))).Font.Color = wdColorSkyBlue

Selection.Characters(Position(Ort(1))).InsertAfter ("\B(") 'a

Selection.Characters(Position(Ort(1))).Font.Color = wdColorSkyBlue

End If

If a = 2 Then

Selection.Characters(Position(Ort(2))).InsertBefore (")")

Selection.Characters(Position(Ort(2))).Font.Color = wdColorSkyBlue

Selection.Characters(Position(Ort(1))).InsertAfter ("\r(;") 'a

Selection.Characters(Position(Ort(1))).Font.Color = wdColorSkyBlue

End If

If a = 3 Or a = 4 Then

Selection.Characters(Position(Ort(2))).InsertBefore (")")

Selection.Characters(Position(Ort(2))).Font.Color = wdColorSkyBlue

If Selection.Characters(Position(Ort(3))) = "+" Then

Selection.Characters(Position(Ort(3))) = ";"

Selection.Characters(Position(Ort(3))).Font.Color = wdColorSkyBlue

Else

Selection.Characters(Position(Ort(3))).InsertAfter (";") 'a

Selection.Characters(Position(Ort(3)) + 1).Font.Color = wdColorSkyBlue

End If

Selection.Characters(Position(Ort(1))).InsertAfter ("\F(") 'a

Selection.Characters(Position(Ort(1)) + 1).Font.Color = wdColorSkyBlue

End If

Next

Selection.Fields.Add Range:=Selection.Range, Type:=wdFieldEmpty, \_

PreserveFormatting:=False

Selection.Fields.Update

Selection.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=1, Extend:=wdExtend

If Selection = "Fehler" Then

d = d + 1

End If

Selection.MoveDown Unit:=wdLine, Count:=1

Selection.TypeParagraph

Selection.MoveUp Unit:=wdLine, Count:=1

Next

Application.ScreenUpdating = True

End Sub

Sub Zeicheneinkreisen()

Dim Zeichenwert, Länge, c, d, e As Integer

Dim Zeichen As String

'c = 11 Or c = 13

Zeichen = Selection

d = Asc(Zeichen)

If d = 11 Or d = 13 Then

Selection.MoveLeft Unit:=wdCharacter, Count:=1, Extend:=wdExtend

End If

Zeichen = Selection

d = Asc(Zeichen)

If d = 11 Or d = 13 Then

Selection.MoveLeft Unit:=wdCharacter, Count:=1, Extend:=wdExtend

End If

Zeichen = Selection

Länge = Len(Zeichen)

Zeichenwert = Asc(Zeichen)

c = 0

If (Zeichenwert > 48 And Zeichenwert < 58) And Länge = 1 Then

Zeichenwert = Zeichenwert + 9263

c = 1

End If

If (Zeichenwert > 64 And Zeichenwert < 91) And Länge = 1 Then

Zeichenwert = Zeichenwert + 9333

c = 1

End If

If (Zeichenwert > 96 And Zeichenwert < 123) And Länge = 1 Then

Zeichenwert = Zeichenwert + 9327

c = 1

End If

If Länge = 2 Then

Select Case Zeichen

Case "10"

Zeichenwert = 9321

c = 1

Case "11"

Zeichenwert = 9322

c = 1

Case "12"

Zeichenwert = 9323

c = 1

Case "13"

Zeichenwert = 9324

c = 1

Case "14"

Zeichenwert = 9325

c = 1

Case "15"

Zeichenwert = 9326

c = 1

Case "16"

Zeichenwert = 9327

c = 1

Case "17"

Zeichenwert = 9328

c = 1

Case "18"

Zeichenwert = 9329

c = 1

Case "19"

Zeichenwert = 9330

c = 1

Case "20"

Zeichenwert = 9331

c = 1

End Select

End If

If c = 1 Then

Selection.TypeText ChrW(Zeichenwert)

End If

End Sub

# Platten – & Schubbeulen nach beiden Normen & beide Modelle

## Allgemeiner Lösungsweg

Der Lösungsweg unterteilt sich in 7 Abschnitte. Die Überschriften orientieren sich danach.

Abschnitt 1enthält die Geometrie und Schnittgrößen, berechnet effektive Flanschbreiten.

Abschnitt 2 berechnet die Bruttoquerschnittswerte. Die Flansche haben effektive Breiten.

Abschnitt 3 berechnet den Abminderungsfaktor für Beulen.

Abschnitt 4 führt den Nachweis für Beulen.

Abschnitt 5 führt den Querschnittsnachweis.

Abschnitt 6 behandelt lokales Beulen aus einer Einzellast.

Abschnitt 7 führt den Interaktionsnachweis.

Bei den Rechenbeispielen werden alle 4 Möglichkeiten durchgerechnet:

Beulen nach dem Eurocode 1993-1-5 Kapitel 4-7 + Modell der wirksamen Breiten

Beulen nach dem Eurocode 1993-1-5 Kapitel 10 + Modell der wirksamen Spannungen

Beulen nach der DIN 18800-2 + Modell der wirksamen Breiten

Beulen nach der DIN 18800-3 + Modell der wirksamen Spannungen

Der Abschnitt 1 ist überall gleich. Die Abschnitte 2-7 unterscheiden sich in den Normen, dafür aber kaum in den Modellen. In den 4 Rechenwegen kommt daher einiges vor, das in einem anderen Rechenweg schon einmal ausgerechnet wurde. Um den Platz für die doppelte Berechnung zu sparen, wird einfach auf dem Abschnitt verwiesen.

## Modell der wirksamen Breiten nach dem Eurocode 1993-1-5

Der Eurocode ist so aufgebaut, dass man die Werte in die Formeln einsetzen kann, ohne dabei auf die Einheiten zu achten. Dazu muss man allerdings SI-Einheiten ohne SI-Präfixe verwenden. In der Diplomarbeit werden die gleichen Einheiten wie im Eurocode verwendet, aber mit unterschiedlichen Präfixen.

Tabelle 5 Maßeinheiten in der Diplomarbeit

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Eurocode | Präfix | Einheit |  | Diplomarbeit | Präfix | Einheit |
| Länge | – | Meter |  | Länge | – | Meter |
| Fläche | – | m² |  | Fläche | – | m² |
| Kraft | – | Newton |  | Kraft | Kilo | Newton |
| Moment | – | Nm |  | Moment | Kilo | Nm |
| Spannung | – | N/m² |  | Spannung | Mega | N/m² |

Längen und Flächen werden häufig ohne Präfix angegeben, da diese fast in allen Formeln vorkommen. Für Kräfte und Momente werden zusätzlich Präfixe verwendet. Dadurch wird ein Kompromiss zwischen handlichen Größen und Rechenvereinfachung geschaffen.

### Geometrie

image10.wmfSchnittgrößen und Geometrie.

Bedeutung der Formelzeichen

bf1= Flanschbreite des unteren Flansches

bf2= Flanschbreite des oberen Flansches

tf1= Flanschdicke des unteren Flansches

tf2= Flanschdicke des oberen Flansches

σ1= Spannung im unteren Flansch

σ2= Spannung im oberen Flansch

hw= Steghöhe

tw= Stegdicke

bsl= Steifensteghöhe

hsl= Steifenflanschbreite

tsl= Steifenstegdicke

tsl2= Steifenflanschdicke

hw1= Lage der unteren Steife

hw2= Lage der oberen Steife

σsl1= Spannung in der unteren Steife

σsl2= Spannung in der oberen Steife

S= Spannungsnulllinie

hs= Schwerpunkt des gesamten Trägers

Grafik 7 allgemeine Formelzeichen für alle Rechenbeispiele

**Teilsicherheitsbeiwerte**

Die Teilsicherheitsbeiwerte γM0 für Tragfähigkeit und γM1 für Stabilität sind im Stahlbau des Eurocodes gleich 1. Dadurch, dass diese Teilsicherheitsbeiwerte keine beeinflussende Rolle spielen, werden sie in einigen Fällen weggelassen. Das Nationale Anwendungsdokument kann andere Teilsicherheitsbeiwerte festlegen.

γM0= 1

γM1= 1

**Schubverzerrung**

Schubverzerrung tritt auf, wenn die Flansche lang und schmal sind, während der Träger kurz ist. Dabei kann sich die volle Spannung nur über den Steg aufbauen, während die Flanschenden unvollständig ausgelastet werden. Von unendlich breiten Flanschen trägt nur ein endlicher Teil mit. Dies wird durch eine mittragende Breite berücksichtigt. Nicht mittragende Breiten können nicht beulen. Zugbeanspruchte Querschnittsteile können auch durch Schubverzerrung geschwächt werden.

für b0 < Le/50 darf der Einfluss vernachlässigt werden.

Le= Abstand der Momentennullpunkt

b0= halbe Flanschbreite

mittragende Breite

beff= ß∙b0 Eurocode 1993-1-5 Gleichung 3.1

ß= f(k) Eurocode 1993-1-5 Tabelle 3.1

k= mit α0=

effektive Querschnittsfläche

Aeff= MAX (Ac,eff ∙ ßk; Ac,eff ∙ ß)

Die Worte effektiv, wirksam und mittragend haben diese Bedeutung:

mittragend = berücksichtigt Schubverzerrung

wirksam = berücksichtigt Plattenbeulen

effektiv = mittragend + wirksam

**wirksame Flanschbreiten**

kσ= 0,43

= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.3

ρ=

bf:= bf ∙ρ

Sind die c/t Werte fast eingehalten, so ist ρ fast 1.

Für Längssteifen an Flanschen sind zusätzliche Formelapparate aus zu werten.

### Bruttoquerschnittswerte

Für die weitere Berechnung werden Fläche, Flächenmoment zweiten Grades, Schwerpunkt und Spannungsnulllinie benötigt.

### Abminderungsfaktor ρc

Für Einzelblechfelder ohne Längssteifen gilt:

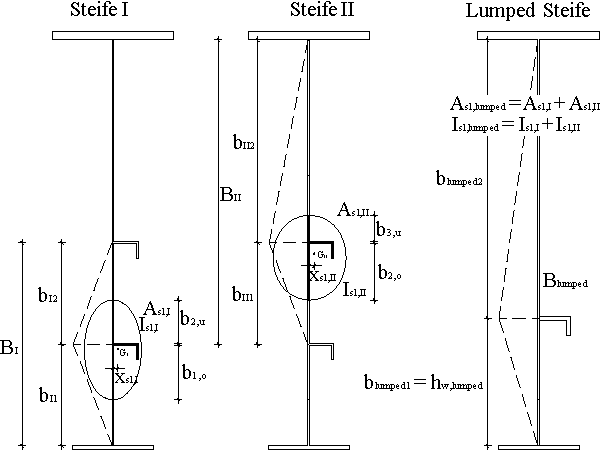
Ac,eff= Ac∙ρ Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.1

ρ = Gleichung 4.2

= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.3

kσ= f(ψ) Eurocode 1993-1-5 Tabelle 4.1

Statt der effektiven Fläche wird eine effektive Breite berechnet. Zuerst wird der druckbeanspruchte Teil in Bruttobreiten aufgeteilt und dann mit ρ in effektive Breiten umgerechnet.

Sind Längssteifen vorhanden, so müssen 3 Fälle untersucht werden:

Das Ausbeulen der unteren Steife.

Das Ausbeulen der oberen Steife.

Das Ausbeulen der gemeinsamen Steife.

Man nimmt die kleinste kritische Beulspannung.

Für Beulen und Knicken mit Längssteifen gibt es im Eurocode Anhang A viele umfangreiche Formeln zur Ermittlung des Beulwertes.

Bild 1 drei Möglichkeiten des Ausbeulens

**Interaktion zwischen Beulen und Knicken**

plattenartiges Verhalten

σE= 190000∙(tw/hw)²

σcr,p= kσ∙σE

knickstabähnliches Verhalten

σcr,c= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.8

=

Es gibt hier 2 verschiedene Schlankheiten. Eine für das Knicken und die andere für das Beulen.

k= 0,5∙(1 + α∙( – 0,2) + )

α= 0,21 für Einzelfelder

χc=

ξ= und 0 < ξ < 1

ρc = (ρ – χc)∙ ξ∙(2 – ξ) + χc Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.13

### Wirksame Breiten

Der Steg wird auf zweifache Weise geschwächt.

Das Einzelfeldbeulen verursacht die wirksamen Breiten.

Das Teilfeldbeulen schwächt die Stegdicke mit ρc. Es entsteht eine wirksame Dicke.

Aus den wirksamen Breiten werden die wirksamen Querschnittswerte A, I, hs, S, Wo, Wu errechnet.

η1= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.14

Bei dem Nachweis muss berücksichtigt werden, dass die Normalkraft durch den verschobenen Schwerpunkt ein zusätzliches Moment erzeugt.

Der Nachweis muss nicht direkt über dem Auflager geführt werden, sondern darf ein Stück daneben geführt werden.

### Schubbeulen

**Beitrag des Steges**

kτ= Wenn(a/hw >1; 5,34;4) + Wenn(a/hw <1; 5,34; 4)∙(hw/a)² + Zusatzterm für Längssteifen. Eurocode 1993-1-5 Gleichung A.5

= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 5.6

χw= f() Eurocode 1993-1-5 Tabelle 5.1

Vb,w,Rd= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 5.2

**Beitrag des Flansches**

Mf,Rd= (hw + bf1/2 + bf2/2)∙fy∙ MIN(bf1∙tf1;bf2∙tf2)

Wirkt zusätzlich eine Normalkraft, so ist Mf,Rd mit einem Faktor zu reduzieren.

Faktor= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 5.9

Vbf,Rd= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 5.8

Gesamttragfähigkeit

Vb,Rd= MIN Eurocode 1993-1-5 Gleichung 5.1

Nachweis

η3= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 5.10

### Lokales Beulen aus einer Einzellast

Dieser Nachweis ist ein großer Formelapparat und völlig unabhängig vom Rest der Berechnung.

Beulwert kf

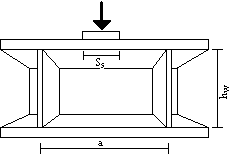
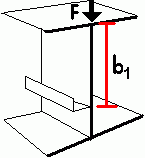
Skizze:

Bild 2 Formelzeichen für Maße

kf= 6 + 2∙ + ∙ Eurocode 1993-1-5 Gleichung 6.6

Der dritte Term gilt für Längssteifen und ist nur gültig, wenn gilt:

 0,05 < und < 0,3

b1= Abstand der Steife zur Last

γs= MIN Eurocode 1993-1-5 Gleichung 6.7

FRd= fyd∙ Leff∙ tw Eurocode 1993-1-5 Gleichung 6.1

Leff= χf∙ Ly Eurocode 1993-1-5 Gleichung 6.2

Fcr= 0,9∙kf∙E∙tw³/hw Eurocode 1993-1-5 Gleichung 6.5

= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 6.4

χF= 0,5/ Eurocode 1993-1-5 Gleichung 6.3

m1= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 6.8

bf= Flansch

m2= Wenn(< 0,5; 0; 0,02∙hw²/tf²) Eurocode 1993-1-5 Gleichung 6.9

ly= MIN(a; ss + 2∙tf∙(1 + )) Eurocode 1993-1-5 Gleichung 6.10

Nachweis

η2= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 6.14

### Interaktion

Die Interaktionsformeln sind sehr einfach aufgebaut.

Die Interaktion zwischen Biegung und Einzellast lautet einfach:

η2 + 0,8∙η1 < 1,4

Da dieser Nachweis von der allgemeinen Form abweicht, wird folgender Nachweis daraus gemacht:

< 1

Die Interaktion zwischen Biegung und Querkraft lautet:

= MAX

< 1

Eine Interaktion zwischen allen 3 Werten gibt es nicht.

## Modell der wirksamen Spannungen nach dem DIN 18800-3

### Geometrie

Schubverzerrung gibt es nicht.

kσ= 0,43

= = Herleitung unter IV.6.4

κp= DIN 18800-3 Tabelle 1

bf:= bf ∙ κp

Sind die b/t Werte fast eingehalten, so ist κp fast 1. Auch hier gehen die Formeln nahtlos ineinander über.

### Bruttoquerschnittswerte

Für die weitere Berechnung werden Fläche, Flächenmoment zweiten Grades, Schwerpunkt und Spannungsnulllinie benötigt.

### Abminderungsfaktor κpx

kσ= f(ψ) DIN 18800-**2** Tabelle 26

= =

Diese Schlankheit wird auch für das Knickstabverhalten verwendet.

κp= MIN(1,25; 1,25 – 0,25∙ψ)∙ DIN 18800-3 Tabelle 1

**Interaktion zwischen Beulen und Knicken**

k= 0,5∙(1 + 0,34∙( – 0,2) + )

κk=

= kσ∙α²∙ DIN 18800-3 Gleichung 23

Λ= + 0,5 und 2< Λ <4 DIN 18800-3 Gleichung 22

ρ= und 0 < ρ < 1 DIN 18800-3 Gleichung 21

κpx= (1 – ρ²)∙κ + ρ²∙κk  DIN 18800-3 Gleichung 24

### Nachweis

Da die DIN ausgesteifte Felder nicht behandelt, wird nach dem Eurocode vorgegangen. Zuerst wurden wirksame Breiten ausgerechnet, dann aus κpx eine wirksame Dicke errechnet und diese in DIN 18800-2 weiterverarbeitet. In DIN 18800-3 wird nur κpx benötigt.

σd=

σP,Rd= κpx∙fyd DIN 18800-3 Gleichung 11

< 1 DIN 18800-3 Gleichung 9

### Schubbeulen

kτ= WENN(a/hw >1; 5,34;4) + WENN(a/hw <1; 5,34; 4)∙(hw/a)²

σE= 189800∙(tw/hw)²

τpi= kτ∙σE

=

κτ=

κτ= für Längssteifen und > 1,38

τEd=

τP,Rd= DIN 18800-3 Gleichung 12

**Nachweis**

< 1 DIN 18800-3 Gleichung 10

### Lokales Beulen aus einer Einzellast

c= ss + 2∙bf

image14.wmf α= ß=

σy,pi= kσy∙σe∙a/c

kσy= f(α;ß) aus Diagramm

σy= F/(c∙tw)

Dann wird auf Beulen und Knicken unter- sucht und das Ergebnis ist κpy. Im Buch „Kranbahnen“, 3. Auflage, von Seeßelberg [10] wird σyki= 1,88∙σe vorgeschlagen; herleiten lässt sich aber nur σyki= 1∙σe . Auch der Eurocode gibt in Gleichung 4.8 und Gleichung A.1 an, dass σyki= σe (a und b müssen vertauscht werden, wegen der y-Richtung). Die um das 1,88fach erhöhte Knicklast reduziert aber die Tragfähigkeit.

Diagramm 1 zur Ermittlung des Beulwertes

Für das knickstabähnliche Verhalten wird die Beulschlankheit wiederverwertet.

σp,rd= fyd∙ κpy

Nachweis

< 1

Neben dem Diagramm gibt es auch im Buch „Kranbahnen“ [10] , 3. Auflage, auch eine Tabelle. Zwischen diesen Zahlen muss interpoliert werden. Eine lineare Interpolation bringt für α<1 schlechte Ergebnisse.

Tabelle 6 Beulwerte für α und ß

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ß↓ α→ | 0,5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 | 10 | 20 | 30 |
| 0 | 12,5 | 3,23 | 1,17 | 0,73 | 0,52 | 0,34 | 0,25 | 0,2 | 0,1 | 0,01 |
| 0,1 | 13 | 3,27 | 1,21 | 0,79 | 0,59 | 0,47 | 0,4 | 0,35 | 0,24 | 0,19 |
| 0,2 | 13,5 | 3,35 | 1,27 | 0,86 | 0,68 | 0,6 | 0,54 | 0,51 | 0,42 | 0,37 |
| 0,4 | 15 | 3,67 | 1,45 | 1,06 | 0,91 | 0,84 | 0,8 | 0,77 | 0,7 | 0,67 |
| 0,6 | 17 | 4,22 | 1,72 | 1,33 | 1,19 | 1,12 | 1,09 | 1,06 | 1 | 0,98 |
| 1 | 21 | 6,08 | 2,55 | 2,03 | 1,93 | 1,81 | 1,77 | 1,72 | 1,68 | 1,65 |

Für die Doppelinterpolation wird eine Gleichung benötigt, die erst einmal hergeleitet werden muss:

Tabelle 7 Zielwert zwischen 4 bekannte Werte

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | x1 | x | x2 |
| y1 | zlo |  | zro |
| y |  | Ziel |  |
| y2 | zlu |  | zru |

Die Interpolationsformel für 2 Zahlen lautet

zo= zlo + (zro – zlo)∙ für oben

zu= zlu + (zru – zlu)∙ für unten

Tabelle 8 Zwischenwerte

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | x1 | x | x2 |
| y1 | zlo | zo | zro |
| y |  | Z |  |
| y2 | zlu | zu | zru |

Zwischen zo und zu muss auch noch interpoliert werden.

z= zo + (zu – zo)∙ für oben

Alternativ kann auch zl und zr ausgerechnet werden und dann z interpoliert werden. Auf den Beweis, dass in beiden Fällen das Gleiche herauskommt, wird verzichtet.

Setzt man zo und zu in die Gleichung ein, so entsteht:

z= zlo + (zro – zlo)∙ + (zlu + (zru – zlu)∙ – zlo + (zro – zlo)∙)∙

Diese lange Gleichung lässt sich vereinfachen, sodass mit dieser z interpoliert werden kann.

z= zlo + (zro – zlo)∙ +

### Interaktion

< 1 DIN 18800-3 Gleichung 14

e1= 1 + κx4 DIN 18800-3 Gleichung 15

e2= 1 + κy4 DIN 18800-3 Gleichung 16

e3= 1 + κx∙ κy∙ κτ2 DIN 18800-3 Gleichung 17

V= (κx∙ κy)6 DIN 18800-3 Gleichung 18

## Modell der wirksamen Spannungen nach dem Eurocode 1993-1-5

Abschnitt 1; 2 und 3 sind mit dem Eurocode nach dem Modell der wirksamen Breiten identisch. Am Ende kommt der Abminderungsfaktor ρc heraus. Dieser reduziert die aufnehmbaren Spannun- gen. Mit diesen wird der Nachweis geführt. Diese Spannungen sind laut Eurocode im Schwerpunkt des Druckflansches zu begrenzen. Da der Flansch aber höhere Spannungen aufnehmen kann, wird der Spannungsnachweis am Stegende geführt.

Der Querkraftnachweis wird genauso geführt, bis χw erreicht ist. Einen Beitrag des Flansches gibt es nicht. Mit χw wird die aufnehmbare Spannung reduziert und der Nachweis geführt.

Der Nachweis für Lokales Beulen aus einer Einzellast wird wie der Nachweis der DIN geführt, um σy zu erhalten. Allerdings werden hier die Eurocodeformeln verwendet und es gibt 2 Schlankheitsgrade. Einen für Beulen und einen für Knickstabverhalten.

und

mit σcr,c = σcr,p=

Aus allen 3 Auslastungen wird dann der Interaktionsnachweis geführt.

< 1 Gleichung 10.5

Diese Formel beschreibt jedoch nicht die Auslastung, da 1² =1. Deshalb wird die Wurzel gezogen.

< 1

## Modell der wirksamen Breiten nach der DIN 18800-2

Abschnitt 1; 2 und 5 sind mit der DIN nach dem Modell der wirksamen Spannungen identisch.

In Abschnitt 3 sind die Eurocode Formeln zur Berechnung der wirksamen Breite durch diese Formeln aus zu wechseln:

hergeleitete Formel 1

ρ= DIN 18800-2 Tabelle 27

k1= – 0,04∙ψ² + 0,12ψ + 0,42 (oben)

k2= + 0,04∙ψ² – 0,12ψ + 0,58 (unten)

b´12= ρ∙b∙k12

Am Ende erhält man die Abminderungsfaktoren κpx und κτ.

κpx reduziert die Stegdicke. Mit κτ wird die Stegdicke nach folgender Formel noch einmal reduziert:

τP,Rd= DIN 18800-3 Gleichung 12

t:= t∙

Ist τP,Rd= τEd, so wird der gesamte Steg aufgebraucht. Imaginäre Stegdicken werden in den Rechen-beispielen auf 0 gesetzt, damit für den schubüberlasteten Träger noch vergleichend der Nachweis für Biegung und Normalkraft geführt werden kann. In der Praxis würde man hier abbrechen und andere Werte nehmen. Dieses Lehrbuch führt die Berechnung aber weiter.

Die DIN 18800-2 fordert, dass der Schubeinfluss für dünnwandige Querschnitte vernachlässigbar sein muss. Ist dies nicht der Fall, so muss er berücksichtigt werden, ohne dass eine Formel dazu angegeben ist. Die hier angegebene Formel beschreibt die plastische Querkrafttragfähigkeit. Der Normalspannungsnachweis wird aber elastisch geführt.

Eine Interaktion zwischen Querkraft und Normalkraft muss nicht mehr berücksichtigt werden, weil sie schon in dem Faktor enthalten ist.

Es gibt keine Möglichkeit lokales Beulen aus einer Einzellast nachzuweisen. Somit gibt es auch keinen Interaktionsnachweis.

## Untersuchung der Formeln

### Überführung des Eurocodewichtungsfaktors zur DIN

Beim Plattenbeulen sind DIN und Eurocode sehr ähnlich. Beim knickstabähnlichen Verhalten kommen DIN und Eurocode zu unterschiedlichen Ergebnissen. Die Formeln für die Interaktion sind inhaltlich die Gleichen, aber sie sehen völlig anders aus. Die Wichtungsfaktoren ρ oder ξ sind entgegengesetzt definiert. ρ= 1 – ξ.

κpx= (1 – ρ²)∙κ + ρ²∙κk  DIN 18800-3 Gleichung 24

ρc = (ρ – χc)∙ ξ∙(2 – ξ) + χc Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.13

Um die Gleichungen vergleichen zu können, werden die Eurocodezeichen in DIN-Zeichen konvertiert.

ρc= κpx Interaktion

χc= κk knickstabähnliches Verhalten

ρ= κ Beulen

ξ= ρ Wichtungsfaktor

κpx= (1 – ρ²)∙κ + ρ²∙κk

κpx= (κ – κk)∙ ρ∙(2 – ρ) + κk

Diese beiden Gleichungen lassen sich noch nicht in die jeweilige andere umwandeln. Der Grund ist, dass DIN und Eurocode entgegengesetzter Meinung sind, was Beulen und Knicken ist. Was im Wichtungsfaktor in der DIN reines Beulen ist, ist im Eurocode reines Knicken. Deshalb muss Folgendes vorgenommen werden:

ρ:= 1 – ρ

Setzt man in die Eurocodegleichung ein, so erhält man:

κpx= (κ – κk)∙ (1 – ρ)∙(2 – 1 + ρ) + κk | zusammenfassen

κpx= (κ – κk)∙ ( 1 – ρ )∙(1 + ρ) + κk | Binomische Formel

κpx= (κ – κk)∙ (1² – ρ² ) + κk | Klammer auflösen

κpx= κ ∙1 – κ∙ ρ² – κk∙1 + κk∙ρ² + κk | zusammenfassen κk entfällt

κpx= κ – κ∙ ρ² + κk∙ρ² | κ ausklammern

κpx= κ∙(1 – ρ²) + κk∙ρ² | sortieren

κpx= (1 – ρ²)∙κ + ρ²∙κk

Damit kann gezeigt werden, dass DIN und Eurocode auf unterschiedlichem Weg zum gleichen Ziel führen.

### Wirksame Breiten

Was das Thema wirksame Breiten angeht, haben DIN 18800 Teil 2 und Eurocode völlig verschiedene Formeln. Beide haben einen Abminderungsfaktor, der die Bruttobreite zu einer wirksamen Breite reduziert.

Der Abminderungsfaktor nach der DIN ist: Gleichung 81 18800-2

Die Gleichung ist laut DIN nur gültig für > 0,673. Für kleinere Werte ist κ = 1.

Der Abminderungsfaktor nach dem Eurocode ist: ρ= Gleichung 4.2 Eurocode

Für ψ= 1 lässt sich die eine Gleichung in die andere überführen. Dazu müssen Zähler und Nenner der DIN-Gleichung mit lambda.PNG multipliziert werden und dann ergibt

0,055∙(3 + 1)= 0,22.

Die DIN 18800-2 bietet aber auch eine Formel, in der ψ vorkommt. Sie ist in Tabelle 27 enthalten.

Sie lautet:

ρ=

image16.wmfFür ψ= 1 lässt sich die Formel in Gleichung 81 überführen. Der zweite Summand (0,16 + 0,06∙ψ) ist mit dem Eurocode 0,055∙(3 + ψ) gerundet identisch.

Zusätzlich zum Eurocode ist die 1 durch (0,97 + 0,03∙ψ) ersetzt. Dadurch sinkt die mitwirkende Breite gegenüber dem Eurocode, je niedriger das Spannungsverhältnis ψ ist. Bei

Biegung tragen daher 6% weniger mit als im Eurocode.

Bild 3 wirksame Breiten

Die Bruttobreiten im Eurocode berechnen sich auf diese Weise:

binf= (oben) Eurocode 1993-1-5 Bild A1

bsup= (unten) Eurocode 1993-1-5 Bild A1

Oben ist dort, wo die Druckspannung größer ist.

In der DIN 18800-2 sind sie in dieser Formel enthalten:

b´= ρ∙b∙k

Entfernt man ρ, so erhält man b´= b∙k. k ist aus der Tabelle zu entnehmen.

k1= – 0,04∙ψ² + 0,12ψ + 0,42 (oben)

k2= + 0,04∙ψ² – 0,12ψ + 0,58 (unten)

Für ψ= 1 liefern DIN und Eurocode 0,5. Außerdem gilt trivialer Weise in beiden Normen:

b= binf + bsup

Für ψ= 0 unterscheiden sich beide Normen in 0,02. Beim Eurocode kann ψ nicht unter 0 sinken, da nur druckbeanspruchte Querschnittsteile abgemindert werden. In der Diplomarbeit wird dies auch für die DIN übernommen.

In der DIN gehören zu den Steifen die wirksamen Breiten. Im Eurocode sind es die Bruttobreiten. Damit liegt die DIN auf der unsicheren Seite, da die Steifenfläche später in den Nenner eingeht.

### Negative wirksame Breiten in der DIN

Die DIN 18800 Teil 2 enthält umfangreiche Formeln für die wirksame Breite. Die DIN 18800 Teil 3 enthält eine einfache Gleichung dafür. Mit dieser Gleichung (4) ist es für die wirksamen Breiten möglich auf negative Werte zu kommen.

Die Gleichung lautet:

b´i,k= 0,605∙t∙λa∙ DIN 18800-3 Gleichung 4

Die vorhandene Breite bik steht im Nenner. Wird bik klein, so wird der Nenner groß. Eins minus eine große Zahl ergibt eine negative Zahl. Wie lassen sich die negativen Zahlen erklären? Die DIN macht zur Formel keine Einschränkungen, außer dass die wirksame Breite nicht größer sein darf, als die vorhandene. Diese Bedingung wird bei negativen Breiten nicht verletzt.

Dazu wird die Gleichung nach Herrn Habermanns [9] Skript hergeleitet.

σe= [kN/cm²]

σxpi= kσx∙σe

Es wird eine gleichmäßige Druckspannung angenommen. Dadurch ist kσx= 4.

σxpi= 4∙σe

=

λa= π∙

λp= π∙ = π∙ einsetzen

λp = π∙= 1,6523∙

κx= wird durch λp/λa ersetzt.

κx= λa wird ausgeklammert.

κx=

b´ik= κx∙ bik

b´ik = ∙ bik λp wird eingesetzt.

b´ik = bik kürzen und zusammenfassen.

b´ik= 0,6052∙t ∙ λa∙

Schaut man sich die Gleichung in der DIN an, so sieht man, dass die vorhandene Breite einmal im Nenner steht. Eine kleine Breite im Nenner bewirkt, dass der Quotient groß wird. Dieser negative Summand kann so groß werden, sodass er den anderen Summanden 1 übersteigt. Dadurch kommt eine negative Zahl heraus. Die Ursache liegt im Term κx.

Diagramm 2 ohne Breitenbegrenzung Diagramm 3 mit Breitenbegrenzung

Die Gleichung κx= ist im Diagramm angegeben. Auf der x-Achse ist aufgetragen

image17_8.wmfund auf der y-Achse κk. Im rechten Diagramm ist aufgetragen, wie es sich auswirkt, wenn die wirksame Breite auf die vorhandene Breite beschränkt wird. Das Problem negativer Breiten ist nicht gelöst.

Jetzt kommt die Lösung. Die Gleichung ist erst ab 0,6732 gültig.

b´ik= κx∙ bik

bei < 0,6732 ist κx= 1 und somit b´ik=bik

Die 0,6732 ist die Lösung einer quadratischen Gleichung

> = 0,6732

λp > λa∙ 0,6732

λa und λp werden durch ihre Formeln ersetzt.

1,6523∙ > π∙ ∙0,6732

bik> π∙

Nach dem Zusammenfassen muss die vorhandene Breite diese Mindestgröße haben:

bik>

Ist die Mindestgröße unterschritten, so ist die volle Breite anzusetzen.

Die Formel für die Mindestbreite wird in den Rechenbeispielen nicht verwendet. Stattdessen wird eine Formel aus der DIN 18800-2 verwendet, weil diese das Randspannungsverhältnis berücksichtigt.

### Herleitung der λ-Berechnungsformeln

Im Eurocode gibt es eine handliche Formel zur Berechnung von , während man in der DIN einen Formelapparat auswerten muss. Dies ist in der DIN jedoch nicht notwendig, sodass der Formelapparat zu einer Formel zusammengefasst werden kann.

Zuerst werden die Gleichungen des Eurocodes hergeleitet:

Allgemein gilt:

= mit λa= π∙ und λp= π∙

= = E und π kürzen

Dann entsteht diese bekannte Formel:

σe= [N/mm²] σe wird in eingesetzt.

Im Eurocode gibt es ε

ε=

ε²=

fyk= fyk wird in eingesetzt.

Die Wurzel wird gezogen.

Der Term gilt für Schubspannung. Für Normalspannung muss er weggelassen werden.

Damit entstehen diese Gleichungen in dem Eurocode:

Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.3

Eurocode 1993-1-5 Gleichung 5.6

Um diese Gleichungen auch in der DIN benutzen zu können, muss die richtige Streckgrenze eingearbeitet werden. ε wird als Hilfsgröße eingeführt.

ε=

Damit gilt:

für Normalkraft Hergeleitete Formel 1

für Querkraft Hergeleitete Formel 2

Diese hergeleiteten Formeln werden in den Rechenbeispielen verwendet, da die Sache mit dem richtigem σe und dem zugehörigem Formelapparat sehr umständlich ist.

### Wirkungsweise von η und Flanschbonus

Beim Schubbeulen mobilisiert der Eurocode deutlich mehr Tragfähigkeit als die DIN. Bei gedrungenen Querschnitten gibt es den Faktor η, der die Tragfähigkeit um bis zu 20% steigert. η ist auch im Abminderungsfaktor enthalten. Zusätzlich trägt ein nicht vollständig ausgelasteter Flansch mit.

Es gelten:

Vb,Rd= MIN Eurocode 1993-1-5 Gleichung 5.1

Vb,w,Rd= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 5.2

Vergleicht man die beiden Terme und so stellt man fest, dass sie sich nur durch χ und η unterschieden. Für < 0,833/η gilt:

χw= η

Das bedeutet, dass gedrungene Stege 20% mehr Tragfähigkeit haben. Bringt der Flansch noch Tragfähigkeit hinzu, so steigert sie sich nicht, da die Spannung begrenzt. Ist > 0,833/η, so kann der Flansch einen Teil der durch χw verlorenen Tragfähigkeit wiederherstellen.

### Einfluss der Schlankheit auf die wirksame Breite

Der Einfluss der Schlankheit lässt sich direkt aus der Formel ablesen

beff= hw∙ ρ

ρ = Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.2

Dies ist eine gebrochenrationale Funktion des Typs

f(x)= mit – 0,22< a < 0

Im Diagramm ist die Kurvenschar dieser Funktion abgebildet von ψ=1 bis ψ= – 3.

Diagramm 4 Abminderungsfaktor in Abhängigkeit von der Schlankheit. Kurvenscharparameter ist ψ.

Die Schlankheit ist ebenfalls vom Randspannungsverhältnis ψ abhängig. Allerdings können die anderen Parameter, von denen abhängig ist, so gewählt werden, dass unabhängig von ψ ist.

Für ψ = – 3 ist ρ umgekehrt proportional zu .

Die Formel in der DIN unterscheidet sich nur im Randspannungsverhältnis.

ρ= DIN 18800-2 Tabelle 27

Dies ist eine gebrochenrationale Funktion des Typs:

f(x)=

Das Thema Randspannungsverhältnis wird später noch genauer untersucht.

ψ wirkt auf zweifache Weise günstig.

Zum einen mindert es die Schlankheit und zum anderen erhöht es den Abminderungsfaktor ρ und somit die wirksame Breite.

Der Einfluss der Stegdicke und ε auf die wirksame Breite wird nicht gesondert untersucht, da die Schlankheit umgekehrt proportional zur Stegdicke und ε ist.

### Einfluss der Steghöhe auf die wirksame Breite

In diesem Abschnitt wird hergeleitet, wie viel wirksame Breite von einem Beulfeld übrig bleibt.

**Eurocode**

Im Eurocode gelten diese Formeln:

beff= hw∙ ρ

ρ = Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.2

= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.3

kσ= f(ψ) Eurocode 1993-1-5 Tabelle 4.1

Daraus soll eine Funktion der wirksamen Breite in Anhängigkeit von der Steghöhe werden.

beff= f(hw)

ρ = Die Gleichung wird umgeformt

ρ = wird eingesetzt

ρ = – beff= hw∙ ρ

beff= – Hergeleitete Formel 3

Für einen unendlich hohen Steg ergibt sich die maximal wirksame Breite.

lim beff=

hw  ∞

image19.wmfFür reine Druckspannung ψ=1 vereinfacht sich die Formel auf:

beff= tw∙ 56,86∙ ε –

Für reine Biegung ψ= – 1 entsteht diese Formel:

beff= tw∙ 139,009∙ ε –

Beide Gleichungen sind eine Funktion (Hyperbel) des Typs

f(x)=

Bild 4

**DIN**

In der DIN gelten diese Formeln:

ρ= DIN 18800-2 Tabelle 27

Hergeleitete Formel 1

Daraus soll eine Funktion der wirksamen Breite in Anhängigkeit von der Steghöhe werden.

beff= f(hw) Zuerst wird ρ umgeformt

ρ= wird eingesetzt

ρ=

beff=

Hergeleitete Formel 4

Für einen unendlich hohen Steg ergibt sich die maximal wirksame Breite.

lim beff= tw∙28,1218∙ε∙

hw  ∞

Für reine Druckspannung ψ=1 vereinfacht sich die Formel auf

beff= tw∙ 56,24∙ ε –

Diese Gleichung stimmt mit dem Eurocode exakt überein. Die Zahlen sehen etwas anders aus, weil ε anders definiert ist.

Eurocode ε= DIN ε=

Für reine Biegung ψ= – 1 entsteht diese Gleichung

beff= tw∙ 129,23∙ ε –

Der Typ ist der gleiche, nur die Konstanten sind anders.

### Einfluss des Randspannungsverhältnis ψ auf die wirksame Breite

Es werden die langen hergeleiteten Formeln aus dem vorherigen Abschnitt verwendet.

kσ ist vom Randspannungsverhältnis abhängig. kσ ist von – 3 bis 1 definiert.

kσ= f(ψ) und besteht aus 3 Teilen.

kσ= für 1> ψ > 0 Typ: Hyperbel

kσ= 7,81 – 6,29ψ + 9,78ψ² für 0> ψ > – 1 Typ: Parabel

kσ= 5,98 – 11,96ψ + 5,98ψ² für – 1> ψ > – 3 Typ: Parabel

kσ= 5,98∙ (1 – ψ)² für – 1> ψ > – 3 alternative Schreibweise

So sehen die 3 Funktionen aus.

Diagramm 5 Beulwertfunktionen in Abhängigkeit vom Randspannungsverhältnis.

Flickt man alle 3 Funktionen zusammen, so erhält man kσ in Abhängigkeit des Randspannungsverhältnisses.

Diagramm 6 Beulwert in Abhängigkeit vom Randspannungsverhältnis

Kurvendiskussion

Die Funktion hat keine Nullstelle, keine Extrempunke, keine Wendepunkte, keine Polstellen und keine Asymptote und ist monoton fallend und ist immer größer als 4. Ein Wurzelziehen ist daher problemlos möglich.

Die wirksame Breite nach dem Eurocode

beff= – Hergeleitete Formel 3

kσ kann nur als f(ψ) in die Funktion eingesetzt werden. Der Term (3 + ψ) wird Null bei ψ= – 3, sonst ist er immer positiv. Die wirksame Breite lässt sich daher nicht einfach auf einen elementaren Funktionstyp zurückführen. Die Funktion hat den Typ:

f(ψ)= a∙ – (ψ + b)∙ f(ψ)

image20.wmf

Die Funktion besteht aus 2 Summanden. Der negative Summand besitzt ein lineares Glied, das eine Nullstelle besitzt. Er wird bei kleinen Schlankheiten groß. Wird eine zu kleine Schlankheit gewählt, so wird die Summe negativ.

Bild 5 ∙ – (ψ + b)∙ f(ψ)

Für – 1 > ψ > – 3 vereinfacht sich das Ganze zu:

=

Hier gibt es ein Problem:

(1 – ψ)²= (ψ – 1)²

Welche Wurzel ist die richtige?

Aus dem Diagramm von wird die Steigung abgelesen und diese muss mit dem Ergebnis der Wurzel übereinstimmen. Die Steigung ist negativ.

kσ= 2,4454∙ (1 – ψ)

Dieser Term kann nun in die große Gleichung eingesetzt werden.

beff= tw∙28,43∙ε∙2,4454∙(1 – ψ) –

beff= tw∙69,37∙ε∙(1 – ψ) –

Damit ist eine kubische Funktion mit dominierendem Linearsummand entstanden. Der lineare Summand dominiert umso mehr, je schlanker das Beulfeld ist.

f(ψ)= a∙(1 – ψ) – b∙(3 + ψ)∙(1 – ψ)²

Der kubische Anteil besitzt 3 Nullstellen und zwar bei ψ= – 3; ψ= 1 und ψ= 1. Die doppelte Nullstelle bedeutet, dass der kubische Anteil dort keine Steigung hat, also ein Minimum.

Und so sieht die Funktion im Diagramm aus. Schlanke Beulfelder haben natürlich weniger mitwirkende Breite. Dieser Effekt wurde wegdividiert, um die unterschiedlichen Kurvenformen betonen zu können. Die wirksame Breite ist fast proportional zur Stegdicke (Proportionalität liegt vor, wenn beide Linien übereinander liegen).

Diagramm 7 Einfluss des Randspannungsverhältnisses auf die wirksame Breite für ψ < -1

Zusammenfassend lässt sich sagen:

Je niedriger das Randspannungsverhältnis ist, desto mehr Breite wirkt mit.

Bei sehr schlanken Stegen besteht dort fast ein linearer Zusammenhang.

Bei einem Randspannungsverhältnis von ψ= – 3 (aber nicht bei ψ=1) ist die wirksame Breite proportional zur Stegdicke, für andere Stegdicken nur fast proportional.

Und so sieht das vollständige Diagramm aus.

Diagramm 8 Einfluss von ψ auf die wirksame Breite nach dem Eurocode für alle ψ

Die wirksame Breite ist in Meter angegeben. Es wurden die Parameter aus dem ersten Rechenbeispiel verwendet: hw= 2,3m; tw= 7mm und ε=1. Das Rechenbeispiel folgt unter Kapitel V.

Für den Vergleich mit dickem Steg wurden 20mm statt 7mm verwendet. Die Formel liefert für dicke Stege wirksame Breiten, die größer sind, als die vorhandene. In diesem Fall ist die Bedingung für die Schlankheit in der Formel für ρ verletzt, sodass die wirksame Breite auf die vorhandene Breite gesetzt wurde (horizontale blaue Linie im Diagramm).

Die Vergleichs-Linie für den dicken Steg wurde mit 7/20 multipliziert, sodass man sehen kann, dass die mitwirkende Breite nicht vollständig proportional zur die Stegdicke ist. Ein halb so dicker Steg trägt etwas mehr als die Hälfte.

**Vergleich mit der DIN**

beff= Hergeleitete Formel 4

Die Formel der DIN unterscheidet sich nur wenig vom Eurocode.

Es kommt ein Faktor (0,97 + 0,03ψ) hinzu.

Der Faktor (0,16 + 0,06ψ) kann negative Werte im Definitionsbereich erreichen.

Für ψ < – 1 besteht zwischen der wirksamen Breite und dem Randspannungsverhältnis weiterhin ein kubischer Zusammenhang.

Die wirksame Breite in Abhängigkeit vom Randspannungsverhältnis.

Diagramm 9 Einfluss von ψ auf die wirksame Breite nach der DIN für alle ψ

Es gibt kaum Unterschiede zum Eurocode.

**Welche Norm bringt mehr wirksame Breiten?**

Im Diagramm wird dieser Faktor in Abhängigkeit vom Randspannungsverhältnis aufgetragen.

Diagramm 10 Verhältnis der wirksamen Breite nach Eurocode und DIN

Der Eurocode bringt immer mehr wirksame Breiten als die DIN. Bei schlanken Beulfeldern mit sehr niedrigem Randspannungsverhältnis sind die wirksamen Breiten sogar bis zu 13 % breiter.

In der DIN 18800-3 gibt es eine andere Formel. Sie enthält zusätzlich den Faktor c.

c= MIN(1,25;1,25 – ψ)

Damit erlaubt die DIN gegenüber dem Eurocode um bis zu 25% höhere Spannungen.

### Vergleich der Abminderungsfaktoren für Schubbeulen

Nach dem Eurocode gilt:

χw= und χw= für <1,08 Eurocode 1993-1-5 Tabelle 5.1

und nach der DIN gilt:

κτ= DIN 18800-3 Tabelle 1

Auf der x-Achse ist die Schlankheit aufgetragen und auf der y-Achse der Abminderungsfaktor.

Diagramm 11 Abminderungsfaktor für Schubbeulen nach beiden Normen in Abhängigkeit von der Schlankheit

Der Eurocode liegt für große und kleine Schlankheiten immer über der DIN.

Für unendlich große Schlankheiten liefert der Eurocode 1,631 Fache Werte.

1,631=

Für kleine Werte ist der Abminderungsfaktor 1,2 , also größer als 1. Das liegt an η.

### Einfluss der Steghöhe hw auf die Stegtragfähigkeit

**Eurocode**

Nach dem Eurocode errechnet sich die Stegtragfähigkeit mit dieser Formel:

Vbw,Rd= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 5.2

mit χw= und > 1,08

Daraus soll eine Funktion der Stegtragfähigkeit in Abhängigkeit von der Höhe werden.

Vbw,Rd= f(hw)

Zuerst muss der Definitionsbereich eingegrenzt werden:

> 1,08 nach hw umstellen

hw > 1,08∙37,421∙t∙ε∙

hw > 40,4∙t∙ε∙

Es wird folgende Annahme getroffen:

a ~ hw

Dadurch ist der Schubbeulwert gleich.

Nun zur Herleitung der Funktion.

Vbw,Rd= χ wurde eingesetzt und dann wird umgeformt.

Vbw,Rd= wird eingesetzt und Konstanten zusammengefasst.

Vbw,Rd=

Das ist eine gebrochenrationale Funktion (genauer Hyperbel) des Typs:

f(x)=

Solche Funktionen haben eine Nullstelle im Ursprung und eine Polstelle. Die Polstelle liegt aber nicht im Definitionsbereich.

image21.wmfDie Funktion ließe sich noch auf diesen Typ vereinfachen.

f(x)=

Dieser Typ darf nicht mit f(x)= verwechselt werden.

Allerdings hat man dann viele Konstanten doppelt drin.

Vbw,Rd=

Bild 6

**DIN**

Nach der DIN errechnet sich die Stegtragfähigkeit mit dieser Formel:

Vbw,Rd= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 5.2

mit χw= und Hergeleitete Formel 2

Zuerst muss der Definitionsbereich eingegrenzt werden:

> 0,84 nach hw umstellen

hw > 0,84∙37,0103∙t∙ε∙

hw > 31,09∙t∙ε∙

Es wird folgende Annahme getroffen:

a ~ hw

Dadurch ist der Schubbeulwert gleich.

Nun zur Herleitung der Funktion.

Vbw,Rd= χ wurde eingesetzt und dann wird umgeformt.

Vbw,Rd= wird eingesetzt und Konstanten zusammengefasst.

Vbw,Rd= umformen

Vbw,Rd= Die Zahlen werden zusammengefasst.

Vbw,Rd=

Hier geschieht etwas sehr Seltsames: hw kürzt sich heraus

Vbw,Rd= 17,949∙ fyk∙ t²∙ ε∙ /γ

Das ist eine konstante Funktion des Typs:

f(x)= c

Das bedeutet, dass in der DIN die Querkrafttragfähigkeit eines Steges unabhängig von der Höhe ist. Bei einem Knickstab verringert sich die Tragfähigkeit quadratisch in Abhängigkeit von der Höhe.

**Zahlenbeispiel**

Es werden die Parameter aus dem ersten Rechenbeispiel gewählt:

tw= 0,007m

S235

kτ= 7,856

Eurocode

hw > 40,4∙t∙ε∙

hw> 40,4∙0,007∙1∙ 2,8028

hw> 0,7926m

Vbw,Rd=

Vbw,Rd=

Vbw,Rd= [MN]

Der Grenzwert ist

Vbw,Rd= = 0,9566MN

DIN

hw > 31,09∙t∙ε∙

hw> 31,09∙0,007∙1∙ 2,8028

hw> 0,60997m

Vbw,Rd= 17,949∙ fyk∙ t²∙ ε∙ /γ

Vbw,Rd= 17,949∙240∙0,007²∙1∙2,8028/1,1

Vbw,Rd= 0,538MN

Dies lässt sich in einem Diagramm zusammenfassen.

Auf der x-Achse ist die Steghöhe hw in Meter aufgetragen und auf der y-Achse die Stegtragfähigkeit in MN.

Diagramm 12 Schubtragfähigkeit in Abhängigkeit von der Steghöhe

Nach dem Eurocode gilt: Je höher der Steg, desto mehr kann er tragen, obwohl er nicht dicker wird.

Gegenüber der DIN trägt der Steg nach dem Eurocode bis zu 77% mehr.

**Schneller Schubbeulnachweis nach der DIN**

Dadurch, dass sich hw heraus gekürzt hat, ist es nach der DIN möglich mit nur einer einzigen Formel sofort den Schubbeulnachweis zu führen.

< 1 Hergeleitete Formel 5

Für überschlägliche Berechnungen ist er sehr gut geeignet, da er immer auf der sicheren Seite liegt und unempfindlich gegen irrsinnige Werte ist. Der Nachweis ersetzt nicht den einfachen Querkraftnachweis.

### Einfluss des Quersteifenabstandes a auf die Stegtragfähigkeit

Der Quersteifenabstand hat nur Einfluss auf den Schubbeulwert.

kτ= 4 + 5,34∙(hw/a)² für hw /a >1

Für den anderen Fall sind die 4 und 5,34 zu vertauschen.

Für beide Fälle ist dies eine Funktion des Typs

f(x)=

Dieser Typ lässt sich auch umschreiben zu

f(x)=

image22.wmf

Nach der DIN gilt

Vbw,Rd= 17,949∙ fyd∙ t²∙ ε∙

kτ geht mit der Wurzel ein.

Damit entsteht dieser Funktionstyp

f(x)=

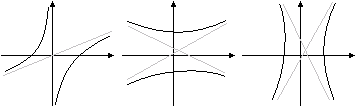
Das ist eine Hyperbel dividiert durch x.

Bild 7

**Erläuterung: Begriff Hyperbel**

Eine Hyperbel lässt sich mit 3 verschiedenen Funktionstypen beschreiben.

f(x)= (häufigster Typ)

 f(x)=

f(x)=

Bild 8 mögliche Hyperbelformen

Durch Drehen und Verschieben des Koordinatensystems lässt sich die eine Formel in die andere überführen.

Für die Anzahl der Quersteifen bedeutet das Folgendes:

Baut man statt keiner Quersteifen wenig Quersteifen ein, so verändert sich der Beulwert fast nicht. Fügt man zu vielen Quersteifen weitere hinzu, so ist die Stegtragfähigkeit nahezu proportional zur Quersteifenanzahl und die Schlankheit ist fast proportional zum Steifenabstand.

Für den Eurocode sieht das deutlich komplizierter aus.

Der Schubbeulwert geht in die Schlankheit ein. Für den Abminderungsfaktor gibt es mehrere Formeln. Daraus lässt sich kein Funktionstyp herleiten.

Daher wird jetzt die Stegtragfähigkeit in Abhängigkeit vom Steifenabstand a für beide Normen im Diagramm aufgetragen.

image24.wmf

Diagramm 13

Der Steg ist 2,3m hoch, 7mm dick und besteht aus S235.

Bei kurzem Steifenabstand dominiert deutlich die Charakteristik des Abminderungsfaktors. Bei sehr großem Steifenabstand zeigt sich bei der DIN das Annähern an die Asymptote der Hyperbel/X. Der Eurocode zeigt ebenfalls dieses Verhalten.

# Erstes Rechenbeispiel: einfaches Beulfeld mit Flanschen

## Modell der wirksamen Breiten nach dem Eurocode 1993-1-5

### Geometrie

Tabelle 9 Maße des Querschnitts für das erste Rechenbeispiel

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Quersteifen | a' | 2,9m |  |  |
| oberer Flansch | bf2 | 0,37m | tf2 | 11mm |
| unterer Flansch | bf1 | 0,47m | tf1 | 13mm |
| Steg | hw | 2,3m | tw | 7mm |
| Streckgrenze | fyd | 235N/mm² |  |  |

Dieser Träger wird nicht in der Realität gebaut. Es werden hauptsächlich teilerfremde Maße verwendet, um die Berechnung besser nachvollziehen zu können. Es wird noch mal darauf hingewiesen, dass die Anzahl der Nachkommastellen nicht irgendeine Genauigkeit bedeuten, sondern der Zahlentyp. Die Zahlen werden daher länger als in anderen Zahlensystemen ausgeschrieben, damit kleine Fehler besser gefunden werden können und nicht als Rundungsfehler abgetan werden. Z.B. sieht eine fehlende Flanschdicke beim Spannungsnachweis in anderen Zahlensystemen aus wie ein Rundungsfehler, weil das Verhältnis zur Steghöhe weit unter 1% liegt. Die Erfahrung hat gezeigt, dass dadurch sehr viele „Rundungsfehler“ behoben werden konnten.

Die Streckgrenze nach der DIN ist 240N/mm².

Schnittgrößen:

M= – 2424kNm

N= – 2020kN (- 2,02MN)

V= 695kN

**Schubverzerrung**

Schubverzerrung wird in diesem Rechenbeispiel vernachlässigt.

Die mitwirkenden Flanschbreiten werden ignoriert. Der Flansch trage vollständig mit.

### Bruttoquerschnittswerte

As= bf2∙tf2 + hw∙tw + bf1∙tf1

As= 0,37∙0,011 + 0,007∙2,3 + 0,47∙0,013

As= 0,02628m²

Der Schwerpunkt hs wird vom unteren Stegende aus nach oben gemessen.

hs =

hs =

hs =

hs =1,06007m

Das Flächenträgheitsmoment I besteht aus 3 Steineranteilen und 3 Eigenanteilen

I=

I=

I= 10–3∙(7,09 + 6,95 + 6,31 + 0,13)

I= 0,02049m4

Spannung σ2 im oberen Stegende

σ2= =

σ2= 146,7 – 76,9

σ2= 69,8N/mm²

Spannung σ1 im unteren Stegende

σ1= – 146,7 – 76,9

σ1= – 202,2N/mm²

Spannungsnulllinie S

S= =

S= 1,7098m

### Berechnung von ρc

b= hw= 2,3m

Randspannungsverhältnis ψ

ψ= =

ψ= – 0,345

Beulwert kσ

kσ= 7,81 – 6,29∙ψ + 9,78∙ψ² Eurocode 1993-1-5 Tabelle 4.1

kσ= 11,146

Beulschlankheitsgrad

= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.3

=

= 3,46

Abminderungsfaktor ρ

ρ = Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.2

ρ = (3,46 – 0,055∙(3 – 0,346))/3,46

ρ = 0,27673

Bruttobreiten

Von dem druckbeanspruchten Stegteil wird berechnet, welches Stück davon am unteren Flansch angrenzt und welches am oberen angrenzt. Es geht noch keine Fläche verloren.

bu = WENN

bu= WENN( – 0,345 > 0;;0,4∙MIN(1,7098;2,3))

bu= 0,4∙1,7098

bu= 0,684

bo = WENN

bo= WENN( – 0,345 > 0;;0,6∙MIN(1,7098;2,3))

bo= 0,6∙1,7098

bo= 1,026

wirksame Breiten

Die wirksame Fläche Ac,eff eines druckbeanspruchten Teils berechnet sich mit

image25.wmf Ac,eff= Ac∙ρ Gleichung 4.1

bu,eff= bu∙ρ = 0,27673∙0,68

bu,eff= 0,1893

bo,eff= bo∙ρ = 0,27673∙1,026

bo,eff = 0,2839

Σbeff = 0,1893 + 0,2839

Σbeff = 0,4732

Verlust= MIN(S;hw) – Σbeff

Verlust= MIN(1,7098;2,3) – 0,4732

Verlust= 1,237m

**Verhalten**

plattenartiges Verhalten

σE= 190000∙(tw/hw)² = 190000∙(0,007/2,3)²

σE= 1,7599 MNm

Grafik 8 Träger mit wirksame Breiten

σcr,p= kσ∙σE = 1,7599∙11,146

σcr,p= 19,6 MNm

knickstabähnliches Verhalten

σcr,c= = Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.8

σcr,c= 1,106 MNm

= =

= 14,58

k= 0,5∙(1 + α∙( – 0,2) + )

k= 0,5∙(1 + 0,21∙(14,57 – 0,2) + 14,57²)

k= 108,26

χc=

χc=

χc= 0,00464

Interaktion

ξ= und 0 < ξ < 1

ξ=

ξ= 1

ρc = (ρ – χc)∙ ξ∙(2 – ξ) + χc Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.13

ρc = (0,27673 – 0,00464)∙1∙(2 – 1) + 0,00464

ρc = 0,27673

### Wirksame Querschnittswerte

Stegfläche im Druckbereich Aeff

Ac,eff= (bo,eff + bu,eff)∙tw

Ac,eff= (0,189 + 0,283)∙0,007

Ac,eff= 0,00331m²

In Excel wurde so gerechnet:

Tabelle 10 Formeln in Excel zur Berechnung der wirksamen Querschnittswerte

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Stegdaten | Stegteillänge i | Ort | Ort m | A∙Abstand | Eigen I | Steiner | Teilfläche |
| oben Zug | hw – MIN(hw;S) | i + u | (L +Lu)/2 | tw∙L∙i | tw∙i³/12 | tw∙i∙m | i∙tw |
| oben Druck | bo,eff | i + u | (L +Lu)/2 | tw∙L∙i | tw∙i³/12 | tw∙i∙m | i∙tw |
| Loch | Verlust | i + u | (L +Lu)/2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| unten Druck | bu,eff | i | (L +Lu)/2 | tw∙L∙i | tw∙i³/12 | tw∙i∙m | i∙tw |
|  |  |  |  | Summe | Summe | Summe |  |

Die Buchstaben haben dabei diese Bedeutung:

Die erste Spalte legt einige Variablen fest. Wird eine dieser Variable in einer Zelle verwendet, so bezieht sie sich auf den Wert in der gleichen Spalte.

Weiterhin kann ein relativer Bezug auf Zellen genommen werden. Dabei bedeutet:

L= die linke Zelle

r= die rechte Zelle

u= die untere Zelle

o= die obere Zelle

L3= 3 Zellen nach links

Lu= die linke untere Zelle

Alle anderen Buchstaben haben globale Bedeutung.

Tabelle 11 tabellarische Berechnung der wirksamen Querschnittswerte

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Stegdaten | Stegteillänge | Ort u | Ort m | A∙Abstand | Eigen I | Steiner | Teilfläche |
| oben Zug | 0,590154823 | 2,3 | 2,0049226 | 0,0082825 | 0,000119899 | 0,002783416 | 0,0041311 |
| oben Druck | 0,283898472 | 1,7098452 | 1,5678959 | 0,0031159 | 1,33477E-05 | 0,000292749 | 0,0019873 |
| Loch | 1,236681057 | 1,4259467 | 0,8076062 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| unten Druck | 0,189265648 | 0,1892656 | 0,0946328 | 0,0001254 | 3,95487E-06 | 0,001572485 | 0,0013249 |
|  |  |  |  | 0,0115237 | 0,000137201 | 0,00464865 | 0,007443 |

Aeff = As – hw∙tw + ΣTeilfläche

Aeff = 0,02628 – 2,3∙0,007 + 0,007443

Aeff = 0,01762

Schwerpunkt

hs,eff= wie hs, nur mit ΣA∙Abstand statt mit Steg

hs,eff=

hs,eff=

hs,eff= 1,184m

effektives Flächenmoment zweiten Grades Ieff

Ieff=

Ieff=

Ieff= 0,01856m4

Widerstandsmomente

Weff,u= = Weff,o= =

Weff,u= Weff,o=

Weff,u= 0,01559 Weff,o= 0,01655

MRd= Weff,u∙fyd

MRd= 0,01559∙235000

MRd= 3664kNm

Der verschobene Schwerpunkt erhöht das Moment.

MEd,N= MEd + NEd∙(hs – hs,eff)

MEd,N= – 2424 + 2020∙(1,06007 – 1,184)

MEd,N= 2674kNm

Nachweis

η1=

η1=

η1= 0,7298 + 0,4878

η1= 1,2176

Nachweis nicht erfüllt

Das Moment darf nach Eurocode Kapitel 4 letzter Satz abgemindert werden.

x= MIN(0,4∙a; 0,5∙b)

x= MIN(0,4∙2,9; 0,5∙2,5)

x= 1,15

MEd,N:= MEd,N – V∙x

MEd,N:= 2674 – 695∙1,15

MEd,N:= 1875kNm

Nachweis

η1= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.14

η1=

η1= 0,512 + 0,488

η1= 1

Nachweis erfüllt

Da jedoch der Nachweis mit Abstand geführt wurde ist zusätzlich ein Klasse3-Querschnittsnachweis am Auflager erforderlich. Da der Querschnitt nicht geschwächt ist, wird das Moment nicht durch den verschobenen Querschnitt erhöht.

As= 0,02628m²

hs =1,06007m

I= 0,02049m4

σu=

σu=

σu= – 126,17 – 76,86

σu= – 203,03N/mm²

σo=

σo=

σo= 147,33 – 76,86

σo= 70,46N/mm²

σo und σu sind kleiner als fyd. Nachweis erfüllt

### Schubbeulen

Der Querkraftwiderstand setzt sich aus einem Teil des Steges und des Flansches zusammen.

**Beitrag des Steges**

a/hw= 2,9/2,3

a/hw= 1,2609

Schubbeulwert

kτ= Wenn(a/hw >1; 5,34;4) + Wenn(a/hw <1; 5,34; 4)∙(hw/a)² Gleichung A.5

kτ= 5,34 + 4∙1,2609–2

kτ= 7,856

Schubbeulschlankheit

= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 5.6

=

= 3,133

für > 1,08 gilt:

χw= = Eurocode 1993-1-5 Tabelle 5.1

χw= 0,35746

Vb,w,Rd= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 5.2

Vb,w,Rd=

Vb,w,Rd= 780,8kN

**Beitrag des Flansches**

Mf,Rd ist die plastische Momententragfähigkeit der Flansche allein.

Mf,Rd= (hw + bf1/2 + bf2/2)∙fy∙ MIN(bf1∙tf1;bf2∙tf2)

Mf,Rd= (2,3 + 0,012)∙235000∙MIN(0,37∙0,011;0,47∙0,013)

Mf,Rd= 2,312∙235000∙0,00407

Mf,Rd= 2211kNm

wirkt zusätzlich eine Normalkraft, so ist Mf,Rd um einen Faktor abzumindern.

Faktor= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 5.9

Faktor=

Faktor= 0,1556

Mf,Rd:= Mf,Rd∙0,1556

Mf,Rd:= 2211∙0,1556

Mf,Rd:= 344,1kNm

Mf,Rd< MEd

* Vbf,Rd= 0 Eurocode 1993-1-5 Gleichung 5.8

Vb,Rd= MIN Eurocode 1993-1-5 Gleichung 5.1

Vb,Rd= MIN(780,8 + 0 ; 1,2∙235000∙2,3∙0,007∙3–0,5)

Vb,Rd= MIN(780,8; 2621)

Vb,Rd= 780,8kN

Nachweis

η3= = Eurocode 1993-1-5 Gleichung 5.10

η3= 0,89007

Da η3 größer als 0,5 ist, so ist ein Interaktionsnachweis erforderlich.

### Lokales Beulen aus Einzellast

In diesem Beispiel wirkt keine Einzellast.

### Interaktion

**Berechnung von Mpl,N**

Für die Interaktion wird Mpl,N benötigt. Excel sucht sich automatisch die Flächenhalbierende und erkennt, welche Flächen es wie abziehen muss. Da der Algorithmus sehr fehleranfällig ist, muss überprüft werden, ob Excel richtig rechnet. Mpl,N ist vom ungeschwächten Querschnitt (ohne Beuleinfluss).

So rechnet Excel: Zuerst werden die Stegstücke mit Länge, Breite und Fläche übernommen. Die Steifen sind so hoch, wie der Steg breit ist. Die Länge wird aus der Steifenfläche rückgerechnet. Dort, wo eine Steife nicht existiert, wird ein kurzes Stegstück angesetzt. Auf der negativen halben Fläche werden die Teilflächen addiert. Wechselt der Wert auf positiv, so ist die Flächenhalbierende gefunden und der genaue Ort wird berechnet. Die Fläche mit der Flächenhalbierenden wird geteilt und im nächsten Schritt richtig einsortiert. Die Werte werden neu berechnet, sortiert und es wird berücksichtigt, dass bei den Steifen die Fläche rückgerechnet werden muss. Excel rechnet die Fläche aus, die für die Normalkraft nötig ist. Dann wird von der Flächenhalbierenden ausgehend bestimmt, welche Teilflächen verbraucht werden und welche geschwächt werden. Von den vollständigen und geschwächten Flächen wird der Schwerpunktabstand zur Flächenhalbierenden berechnet. Aus Fläche mal Abstand werden die Teilwiderstandsmomente errechnet. Die Summe ist WPl,N.

A= 0,02628m²

Lage der Flächenhalbierenden (Flächen werden von oben nach unten abgezogen)

image26.wmf hF= =

= 1,2957m

Fläche zur Aufnahme von N

AN= =

AN= 0,008596m²

hwN= = = Verluststeghöhe

hwN= 1,228

Beginn und Ende der Verlustfläche

h1= hf + hwN/2= 1,2957 + 1,228/2

h1= 1,9097

h2= hf – hwN/2= 1,2957 – 0,614

h2= 0,6817

Widerstandsmoment

Wpl,N=

Wpl,N= (5,296 + 4,549 + 2,203 + 6,176)∙10–3

Wpl,N= 0,01824m³

Grafik 9 Notwendige Maße zur Berechnung des plastischen Momentes

Mpl,N= Wpl,N∙ fyd

Mpl,N= 0,01824∙ 235000

Mpl,N= 4286kNm

Interaktion

η1= =

η1= 0,43751 η3= 0,89007

Nachweis

η1 + ∙(2∙η3 – 1)² Eurocode 1993-1-5 Gleichung 7.1

= 0,43751 + ∙(2∙0,89007 – 1)²

= 0,43751 + 0,55976

0,99726 < 1

Nachweis erfüllt

## Modell der wirksamen Spannungen nach der DIN 18800-3

### Geometrie

Die Geometrie ist die gleiche.

### Bruttoquerschnittswerte

Die Bruttoquerschnittswerte ändern sich nicht.

### Berechnung von κpx

Es werden diese Werte aus der vorherigen Rechnung übernommen.

kσ= 11,146

ψ= – 0,345

plattenartiges Verhalten

σE= 190000∙(tw/hw)² = 190000∙(0,007/2,3)²

σE= 1,7599N/mm²

σpi= 11,146∙1,7599= 19,61N/mm²

= =

= 3,498

κp= MIN(1,25; 1,25 – 0,25∙ψ)∙ DIN 18800-3 Tabelle 1

κp= 1,25∙

κp= 0,3349

knickstabähnliches Verhalten

α = a/hw= 1,2609

= kσ∙α²∙ DIN 18800-3 Gleichung 23

= 11,146∙1,2609²∙1

= 17,72

Λ= Min(Max(2; + 0,5);4) DIN 18800-3 Gleichung 22

Λ= 4

k= 0,5∙(1 + 0,34∙( – 0,2) + )

k= 0,5∙(1 + 0,34∙(3,5 – 0,2) + 3,5)

k= 7,178

κk= =

κk= 0,07437

ρ= Min(Max(;0);1) DIN 18800-3 Gleichung 21

ρ=0

κpx= (1 – ρ²)∙κ + ρ²∙κk  DIN 18800-3 Gleichung 24

κpx= (1 – 0²)∙0,334 + 0²∙0,074

κpx= 0,3349

σP,Rd= κpx∙ fyd = 0,3349∙240/1,1 DIN 18800-3 Gleichung 11

σP,Rd= 73,07N/mm²

σd= =

σd= 202,2N/mm²

### Nachweis

= = 2,768 DIN 18800-3 Gleichung 9

Nachweis nicht erfüllt

### Querkraft

kτ= 7,856

τpi= kτ∙ σE= 7,856∙ 1,7599

τpi= 13,83N/mm²

= =

= 3,166

κτ= = DIN 18800-3 Tabelle 1

κτ= 0,2653

τEd= = =

τEd= 43,16N/mm²

τP,Rd= = DIN 18800-3 Gleichung 12

τP,Rd= 33,42N/mm²

Nachweis

= = 1,2915 DIN 18800-3 Gleichung 10

1,2915 > 1

Nachweis nicht erfüllt

Man kann diesen langen Nachweis auch mit dieser Formel abkürzen

< 1

< 1

< 1

1,2915 > 1

Nachweis nicht erfüllt

### Lokales Beulen aus Einzellast

In diesem Beispiel wirkt keine Einzellast.

### Interaktion

κx= 0,33489

κy= 1

κτ= 0,2653

e1= 1 + κx4 = 1 + 0,334894 DIN 18800-3 Gleichung 15

e1= 1,0125

e3= 1 + κx∙ κy∙ κτ²= 1 + 0,33489·0,26532 DIN 18800-3 Gleichung 17

e3= 1,0236

e1 + e3 = 2,7681,0125 + 1,29151,0236 DIN 18800-3 Gleichung 14

4,102 > 1

Nachweis nicht erfüllt

## Modell der wirksamen Spannungen nach dem Eurocode 1993-1-5

Aus dem Rechenbeispiel nach dem Eurocode mit dem Modell der wirksamen Breiten werden folgende Werte übernommen, da der Rechenweg gleich ist:

ρc= 0,27673 Plattenbeulen

χw= 0,35746 Schubbeulen

Aus dem Rechenbeispiel nach der DIN mit dem Modell der wirksamen Spannungen werden folgende Werte übernommen.

σd= 202,2N/mm²

τEd= 43,16N/mm²

Spannungsnachweis

<1

= 3,1103

Nachweis nicht erfüllt

Schubspannungsnachweis

<1

= 0,89007

Nachweis erfüllt

Aus allen 3 Auslastungen wird dann der Interaktionsnachweis geführt.

< 1² Gleichung 10.5

3,1103² + 0² – 3,1103∙0 + 0,89007² < 1²

3,2351 > 1

Nachweis nicht erfüllt

## Modell der wirksamen Breiten nach der DIN 18800-2

Aus dem Rechenbeispiel nach der DIN mit dem Modell der wirksamen Spannungen werden folgende Werte übernommen:

S= 1,7098m

kσ= 11,146

ψ= – 0,345

κp= 0,33489

κτ= 0,26534

Die Stegdicke wird zusätzlich mit diesem Faktor abgemindert:

τP,Rd=

τP,Rd=

τP,Rd= 33,42N/mm²

Faktor=

Faktor=

Der imaginäre Faktor wird auf 0 gerundet.

**wirksame Breite**

ρ=

ρ=

ρ= = 0,26284

k1= – 0,04∙ψ² + 0,12ψ + 0,42 (oben)

k2= + 0,04∙ψ² – 0,12ψ + 0,58 (unten)

Da ψ negativ ist, wird ψ für diese Formel auf 0 gesetzt und für b wird die Spannungsnulllinie S verwendet.

k1= 0,42

k2= 0,58

b´= ρ∙b∙k

b´o,eff= 0,26284∙1,7098∙0,42

b´ o,eff = 0,1887

b´ u,eff = 0,26284∙1,7098∙0,58

b´ u,eff = 0,2607

Stegfläche im Druckbereich Aeff

Ac,eff= (bo,eff + bu,eff)∙tw

Ac,eff= (0,1887 + 0,2607)∙0,007

Ac,eff= 0,003146m²

In Excel wurde so gerechnet:

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Stegdaten | Stegteillänge i | Ort | Ort m | A∙Abstand | Eigen I | Steiner | **Teilfläche** |
| oben Zug | hw–MIN(hw;S) | i + u | (L + Lu)/2 | tw∙L∙i | tw∙i³/12 | tw∙i∙m | **Faktor∙i∙tw** |
| oben Druck | bo,eff | i + u | (L + Lu)/2 | tw∙L∙i | tw∙i³/12 | tw∙i∙m | **Faktor∙i∙tw** |
| Loch | Verlust | i + u | (L + Lu)/2 | 0 | 0 | 0 | **0** |
| unten Druck | bu,eff | i | (L + Lu)/2 | tw∙L∙i | tw∙i³/12 | tw∙i∙m | **Faktor∙i∙tw** |
|  |  |  |  | Summe | Summe | Summe |  |

Die Buchstaben haben dabei diese Bedeutung:

Die erste Spalte legt einige Variablen fest. Wird diese Variable in einer Zelle verwendet, so bezieht sie sich auf den Wert in der gleichen Spalte.

Weiterhin kann ein relativer Bezug auf Zellen genommen werden. Dabei bedeutet:

L= die linke Zelle

r= die rechte Zelle

u= die untere Zelle

o= die obere Zelle

L3= 3 Zellen nach links

Lu= die linke untere Zelle

Alle anderen Buchstaben haben globale Bedeutung.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Stegdaten | Stegteillänge | Ort u | Ort m | A∙Abstand | Eigen I | Steiner | Teilfläche |
| oben Zug | 0,5901548 | 2,3 | 2,00492 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| oben Druck | 0,2606595 | 1,7098 | 1,57952 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Loch | 1,2604323 | 1,4492 | 0,81897 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| unten Druck | 0,1887534 | 0,1887 | 0,09437 | 0 | 0 | 0 | 0 |
|  |  |  |  | 0 | 0 | 0 | 0 |

Die vielen Nullen entstehen, weil der Steg überlastet ist.

Ist der Steg nicht zu 129,15%ausgelastet, sondern nur zu 50%, dann würde die Tabelle so aussehen:

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Stegdaten | Stegteillänge | Ort u | Ort m | A∙Abstand | Eigen I | Steiner | Stegdicke | Teilfläche |
| oben Zug | 0,5901548 | 2,3 | 2,00492 | 0,0071729 | 0,0001038 | 0,0025536 | 0,0060622 | 0,003577 |
| oben Druck | 0,2606595 | 1,7098 | 1,57952 | 0,0024959 | 8,946E-06 | 0,000278 | 0,0060622 | 0,001580 |
| Loch | 1,2604323 | 1,4492 | 0,81897 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| unten Druck | 0,1887534 | 0,1887 | 0,09438 | 0,000108 | 3,397E-06 | 0,0012995 | 0,0060622 | 0,001144 |
|  |  |  |  | 0,0097767 | 0,0001162 | 0,0041311 |  | 6302,044 |

Aeff = As – hw∙tw + ΣTeilfläche

Aeff = 0,02628 – 2,3∙0,007 + 0

Aeff = 0,01018

Schwerpunkt

hs,eff=

hs,eff=

hs,eff= 0,9178m

effektives Flächenmoment zweiten Grades Ieff

Ieff=

Ieff= =

Ieff= 0,01306m4

Widerstandsmomente

Weff,u= = Weff,o= =

Weff,u= Weff,o=

Weff,u= 0,01412 Weff,o= 0,00941

MRd= Weff,u∙fyd = 0,01412∙240000/1,1

MRd= 3080kNm

Der verschobene Schwerpunkt erhöht das Moment.

MEd,N= MEd + NEd∙(Hs – Hs,eff)

MEd,N= – 2424 + 2020∙(1,06007 – 0,9178)

MEd,N= 2136,7kNm

Nachweis

< 1

0,694 + 0,909

1,603 > 1

Nachweis nicht erfüllt

## Zusammenfassung

Tabelle 12 wirksame Flächen

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Brutto | Euro Netto | DIN Netto |
| A | 0,02628 | 0,0176232 | 0,01018 |
| hs | 1,0600712 | 1,1840854 | 0,9178458 |
| I | 0,0204913 | 0,0185652 | 0,0130577 |

Bei der DIN rutscht der Schwerpunkt nach unten, weil der komplette Steg für die Querkraft gebraucht wird.

Tabelle 13 Abminderungsfaktoren

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Abminderung | Euro | DIN |  |
| ρc | 0,2767292 | 0,3348885 | Plattenbeulen |
| χw | 0,35746 | 0,2653403 | Schubbeulen |

Die DIN 18800 Teil 3 hat einen besseren Abminderungsfaktor für Plattenbeulen, weil in der Formel zusätzlich eine 1,25 enthalten ist. Dafür wird die 0,22 nicht durch das Randspannungsverhältnis abgemindert. In DIN 18800 Teil 2 fehlt die 1,25.

ρ = vs. κp= MIN(**1,25**; 1,25 – 0,25∙ψ)∙

Der Eurocode schneidet beim Schubbeulen besser ab, er startet mit dem Faktor 1,37 und die DIN nur mit 0,84. Der zusätzliche Malus im Eurocode von 0,7 auf die Schlankheit macht sich bei großen Schlankheiten kaum bemerkbar. Sind obendrein noch Längssteifen vorhanden, so geht die große Schlankheit in die Formel der DIN quadratisch ein.

χw= vs. κτ=

Tabelle 14 Nachweise

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Nachweise | EuroB | DINS | EuroS | DINB |
| η1 | 1 | 2,768227 | 3,1102663 | x |
| η1u | 0,863973531 | x | x | 0,8639735 |
| η1o | 0,299840619 | x | x | 0,2998406 |
| η2 | 0 | 0 | 0 | x |
| η3 | 0,890070109 | 1,2915102 | 0,8900701 | 1,2915102 |
| Interaktion | 0,997264046 | 4,1032303 | 3,2351156 | 1,6027175 |

Die Abkürzungen haben folgende Bedeutungen:

EuroB = Eurocode 1993-1-5 Kapitel 4-7 Modell der wirksamen Breiten

DINS= DIN 18800-3 Modell der wirksamen Spannungen

EuroS= Eurocode 1993-1-5 Modell 10 Methode der wirksamen Spannungen

DINB= DIN 18800-2 Modell der wirksamen Breiten

Das Rechenbeispiel wurde so gewählt, sodass das Beulfeld nach dem Eurocode vollständig ausgelastet ist. DIN 18800-2 hat in der Interaktion 1,603 und damit 60% mehr als der Eurocode. Dies liegt zum einen daran, dass nach dem Eurocode das Moment deutlich abgemindert werden darf, und zum anderen, dass nach der DIN 18800- 2 der ganze Steg für Schub verbraucht wird und nur noch die Flansche tragen. Dafür wandert der Schwerpunkt in eine günstige Richtung, sodass die Querschnittsnachweise η1o und η1u besser ausfallen. Ist die Querkraftbeanspruchung nur 80%, so tragen breite Teile des Steges mit. Für diesen Fall ist die Auslastung 140% nach der DIN 18800-2 und 110% nach dem Eurocode (Je geringer die Querkraft, desto weniger wird das Moment abge- mindert.). Insgesamt ist das Modell der wirksamen Breiten dem Modell der wirksamen Spannungen weit überlegen. Beim Modell der wirksamen Spannungen ist das schwächste Querschnittsteil maßgebend. Die Flansche übernehmen nur so viel Spannung, wie das schwächste Querschnittsteil. Dies zeigt sich in den Interaktionen. Da hat der Eurocode eine 311%ige Auslastung und die DIN etwa 400% (Beim Eurocode wurde die Wurzel gezogen, bei der DIN können die 3 Exponenten nicht in eine Auslastung rückgerechnet werden.). Der Interaktionsnachweis nach der DIN bringt ungünstigere Ergebnisse als der im Eurocode, da im Eurocode quadratisch interagiert wird und in der DIN bei kleinen Abminderungsfaktoren linear.

Die Schwächen im Schubbeulnachweis in der DIN stammen aus dem Abminderungsfaktor.

### Rechenaufwand

Tabelle 15 Anzahl der benötigten Seiten

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Abschnitt | EuroB | DINS | EuroS | DINB |
| 1 | ' | ' | ' | ' |
| 2 | I | I | I | I |
| 3 | II' | I' | II' | II' |
| 4 | III | 0 | 0 | ' |
| 5 | I' | 0 | I' | ' |
| 7 | III | ' | ' |  |
| Summe | 12,5 | 3,5 | 6 | 6 |

Der Eurocode bringt gute Tragfähigkeiten und benötigt immensen Rechenaufwand. Bei der DIN 18800-3 ist dies genau umgekehrt. Die DIN hat Stärken im Schubnachweis, der in nur einer Zeile erledigt ist, während der Eurocode 1,5 Seiten für benötigt. Der Interaktionsnachweis im Eurocode mit der Methode der wirksamen Breiten benötigt MPl,N , eine Schnittgröße, die nur aufwändig zu berechnen ist. Auch bei der Ermittlung der wirksamen Breiten läuft beim Eurocode das volle Programm. Das Modell der wirksamen Breiten nach der DIN bringt bei gleichem Aufwand wie der Eurocode nach dem Modell der wirksamen Spannungen bei weitem mehr Tragfähigkeit.

Kommt dem alltäglichen Ingenieur plötzlich ein Beulnachweis in die Quere, so wird er in Zukunft massiv Zeit dafür aufwenden müssen.

### Stahlverbrauch.

In den folgenden Vergleichen wird Flanschbeulen mit berücksichtigt. Schubverzerrung wird weiterhin vernachlässigt, weil keine Trägerlängen angegeben sind. Es wird der Stahlverbrauch nach allen 4 Rechenmöglichkeiten verglichen. Der Träger wird so verdickt, bis die Nachweise erfüllt sind.

Eurocode wirksame Breiten

Da die c/t Werte nicht eingehalten sind, ist der Nachweis nicht erfüllt. Der Druckflansch muss 2mm dicker werden.

Eurocode wirksame Spannungen

Der Druckflansch muss 23mm dick sein und der Steg 13mm.

DIN wirksame Breiten

Der Druckflansch ist 19mm dick und der Steg 9mm.

DIN wirksame Spannungen

Der Druckflansch muss 22mm dick und 48cm lang sein und der Steg ist 15mm dick.

Tabelle 16 Größe des erforderlichen Stahlquerschnittes.

|  |  |
| --- | --- |
| EuroB | 2272 cm² |
| DINB | 3370 cm² |
| EuroS | 4478 cm² |
| DINS | 4913 cm² |

### Vergleich zwischen Aufwand und Stahlverbrauch

Um den Stahlverbrauch vergleichen zu können, wird eine Größe benötigt, die wie folgt definiert wird.

Aufwandeinsparverhältnis E =

Die DIN 18800-3 dient als Bezugswert und dieser ist immer 1. Das Aufwandeinsparverhältnis beschreibt, wie viel Tragfähigkeit pro Seite entsteht.

E(EuroB)= = 0,605

E(DINB)= = 0,8504

E(EuroS)= = 0,64

E(DINS)= = 1

Die DIN kann mit deutlichem Abstand gegenüber dem Eurocode schnell Tragfähigkeiten aufbauen.

### Variation der Belastung

Es wird untersucht, wie groß das Moment bei einer gegebenen Normalkraft sein darf. Die Querkraft ist proportional zum Moment und es wird festgelegt:

V= M/3Meter

In der Tabelle wird angegeben, wie groß das Moment bei einer gegebenen Normalkraft sein darf, bei der noch alle Nachweise erfüllt sind.

Tabelle 17 Momententragfähigkeit in Abhängigkeit von der Normalkraft und Maßgebende Nachweise

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | EuroB |  | DINS |  | EuroS |  | DINB |  |
| N | M | Nachweis | M | Nachweis | M | Nachweis | M | Nachweis |
| 1000 | 2326 | I 3 | 1556 | I | 2105 | I | 1614 | 3 |
| 500 | 2342 | 3 I | 1201 | I | 1869 | I | 1614 | 3 |
| 0 | 2342 | 3 I | 857 | I | 1516 | I | 1614 | 3 |
| -500 | 2342 | 3 I | 387 | I | 937 | I | 1614 | 3 |
| -1000 | 2297 | I 3 | 0 | I | 45 | I | 1614 | 3 |
| -1500 | 2219 | I 3 |  |  |  |  | 1487 | 1 |
| -2000 | 2149 | I |  |  |  |  | 1113 | 1 |
| -2500 | 1626 | 1 |  |  |  |  | 620 | 1 |
| -3000 | 536 | 1 |  |  |  |  | 26 | 1 |

In der Spalte „Nachweis“ sind die maßgebenden Nachweise angegeben. Ein Nachweis ist maßgebend, wenn er größer als 0,95 ist. Die Abkürzungen haben dabei folgende Bedeutung:

1: Nachweis η1 ist maßgebend.

3: Nachweis η3 ist maßgebend.

I: Der Interaktionsnachweis ist maßgebend.

S: Der semiplastische Querschnittsnachweis ist maßgebend.

u: Der untere Querschnittsnachweis ist maßgebend.

Im Diagramm sind die Daten der Tabelle visualisiert.

Diagramm 14 maximale Momententragfähigkeit in Abhängigkeit von der Normalkraft

Der Eurocode ermögliche große Momententragfähigkeiten, während das Modell der wirksamen Breiten große Normalkräfte aufnehmen kann. Das Modell der wirksamen Breiten nach dem Eurocode einigt beide Vorteile.

Nach der DIN 18800-3 besteht zwischen aufnehmbarer Normalkraft und Moment ein fast linearer Zusammenhang.

# Berechnung der semiplastischen Tragfähigkeit

Für reine Biegeträger ist es sinnvoll, den Druckflansch etwas dicker zu machen. Das hat 2 Vorteile. Zum einen rutscht der Schwerpunkt herunter, sodass größere Zugbereiche und größere Beulwerte entstehen. Zum anderen muss der Druckflansch, der nicht seine volle Streckgrenze erreicht, nicht so viele Spannungen aufnehmen. Jedoch entsteht das kleine Problem, dass der Zugflansch schnell seine Streckgrenze erreicht.

Abhilfe schafft der Eurocode 1993-1-1: (ein Satz über 6.2.2)

„(10) Tritt Fließen als Erstes auf der Zugseite des Querschnitts auf, so dürfen bei der Ermittlung der Beanspruchbarkeit von Klasse-3-Querschnitten die plastischen Reserven auf der Zugseite der neutralen Achse durch den Ansatz einer Teilplastifizierung ausgenutzt werden.“

Nach dem Eurocode ist plastifizieren im Zugbereich erlaubt. Verbeulte Querschnitte sind aber Klasse 4. Allerdings darf der Beulnachweis ein Stück neben der Stütze geführt werden. Über der Stütze ist dafür ein normaler Spannungsnachweis zu führen. Dieser Spannungsnachweis wird mit ungeschwächtem Querschnitt geführt, also ein Querschnitt Klasse 3.

Da es für das semiplastische Moment keine Formel gibt, wird sie jetzt hergeleitet.

Querschnitt elastisch semiplastisch plastisch

fyd  fyd fyd

+ + +

– – –

σd fyd fyd

Grafik 10 Spannungsverteilungen von elastisch bis plastisch

Bei der elastischen Spannungsverteilung ist an einem Trägerende die Streckgrenze erreicht.

Bei der plastischen Spannungsverteilung ist die Streckgrenze im ganzen Träger erreicht.

Die semiplastische Spannungsverteilung bildet ein Zwischending. Dabei ist die Streckgrenze an beiden Trägerenden und in einem Stegstück erreicht.

Spannungszustand und Kräfte

F2 fyd

a F2PL +

b F2EL

c – F1EL

fyd F1

Grafik 11 Kräfte im semiplastischen Spannungszustand

Es wird eine Vereinfachung getroffen. Die Kraft in den Flanschen wirkt im Schwerpunkt und deren Größe ist Streckgrenze mal Fläche. Dies liegt leicht auf der unsicheren Seite. Es wirkt keine Normalkraft.

Der Trägersteg unterteilt sich in 3 Längen.

Länge A beschreibt die Länge des plastifizierten Stegstücks.

Länge B beschreibt die Länge des nicht plastifizierten Stegstücks unter Zugspannungen.

Länge C beschreibt die Länge des nicht plastifizierten Stegstücks unter Druckspannungen.

Es wirken 5 Kräfte

F2 ist die Zugkraft des Obergurtes. F2= A2∙fyd

F1 ist die Druckkraft des Untergurtes. F1= A1∙fyd

F1EL ist die elastische Druckkraft des unteren Stegstücks. F1EL= tw∙c∙fyd/2

F2EL ist die elastische Zugkraft des mittleren Stegstücks. F2EL= tw∙b∙fyd/2

F2PL ist die plastische Zugkraft des oberen Stegstücks. F2PL= tw∙a∙fyd

Zwischen allen Kräften muss Gleichgewicht herrschen.

F2 + F1 + F1EL + F2EL + F2PL= 0

Aus Gründen der Dehnung müssen die elastischen Kräfte gleich groß sein.

F1EL + F2EL= 0

Es gilt ebenfalls:

c= b

Damit lässt sich das Gleichgewicht vereinfachen zu

F2 + F1 + F2PL= 0 nach F2PL umstellen

F2PL = F1 – F2

F2PL muss größer als 0 sein, sonst ist die Formel nicht anwendbar.

Nun kann die plastifizierte Länge a ausgerechnet werden.

F2PL= tw∙a∙fyd F2PL = F1 – F2

F1 – F2= tw∙a∙fyd

a= F2= A2∙fyd und F1= A1∙fyd

a= fyd kürzen

a=

Die Länge b und c errechnet sich mit:

b= c= =

Nun kann das semiplastische Moment ausgerechnet werden. Dabei wird immer Kraft mal Hebelarm gerechnet.

MPE,Rd=

Die elastischen Terme können zusammengefasst werden,

da b=c und F1EL= F2EL und FEL= tw∙b∙fyw/2

Für die anderen Summanden wird die Kraft durch ihre Formel ersetzt. Somit entsteht die endgültige Formel für die semiplastische Momententragfähigkeit.

MPE,Rd=

Zu dieser Formel gibt es einige Besonderheiten.

Die Spannungsnulllinie liegt in der Flächenhalbierenden.

Dadurch muss nur in der Formel die 2/3 entfernt werden und schon ergibt sich die Formel für die plastische Momententragfähigkeit. Dies gilt nur für Biegung ohne Normalkraft.

MPL,Rd=

## Einbau einer Normalkraft in die Gleichung

Da meist noch eine Normalkraft wirkt, muss die Gleichung erweitert werden. Die Normalkraft greift im Schwerpunkt des Trägers an.

Spannungszustand und Kräfte

F2 fyd

a F2PL +

N

b

F2EL

c – F1EL

fyd F1

Grafik 12 Kräfte im semiplastischen Spannungszustand mit Normalkraft

Es muss wieder Gleichgewicht zwischen den 6 Kräften herrschen. Die beiden elastischen Kräfte heben sich auf, sodass F2PL berechnet werden kann.

F2PL = F1 – F2 + N

F2PL muss größer als 0 sein, sonst ist die Formel nicht anwendbar. F2PL ist größer als 0, wenn bei einer elastischen Spannungsermittlung die Zugspannung in der Randfaser größer ist als die Druckspannung.

Nun kann die plastifizierte Länge a ausgerechnet werden

F2PL= tw∙a∙fyd F2PL = F1 – F2 – N

F1 – F2 + N= tw∙a∙fyd

a= F2= A2∙fyd und F1= A1∙fyd

a= fyd kürzen

a=

Die Länge b und c errechnet sich mit:

b= c= =

Die Formel ändert sich nur um den Term der Normalkraft.

Spannungszustand und Kräfte

a hw – S

N

b

S

c

Grafik 13 Richtung von Moment und Normalkraft

Die Normalkraft dreht um die Spannungsnulllinie mit dem Hebelarm:

a + b – (hw – S)

MPE,Rd=

## Zusammenfassung

MPE,Rd=

mit

a=

b=

# zweites Rechenbeispiel: Zweifeldträger mit Gleichstreckenlast

## Modell der wirksamen Breiten nach dem Eurocode 1993-1-5

### Geometrie

Zu berechnen ist ein Beulfeld in einem 33m langen Zweifeldträger. Um die Tragfähigkeit zu erhöhen, wird eine Längssteife bei der Stütze in 0,4m Höhe eingebaut. Da diese Längssteife im Feld woanders gebraucht wird, wird eine Quersteife 7,1m von der Stütze entfernt eingebaut. Dort endet die Längssteife.

image27.wmf

image28.wmfGrafik 14 Zweifeldträger mit Maße und Last

Tabelle 18 Alle Eingangsdaten für das zweite Rechenbeispiel

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Quersteifen | a' | 7,1 | m |  |
| Träger links | l1 | 33 | m |  |
| Träger rechts | l2 | 33 | m |  |
| Belastung | qEd | 55,4 | kN/m |  |
|  |  |  |  |  |
| oberer Flansch | bf2 | 0,37m | tf2 | 11mm |
| unterer Flansch | bf1 | 0,53m | tf1 | 17mm |
| Steg | hw | 2,9m | tw | 9mm |
| Steife | bsl | 0,1m | tsl | 8mm |
| untere Steife | hw1 | 0,4m |  |  |
|  |  |  |  |  |
| Streckgrenze | fyd | 235 N/mm² | ε= 1 | η= 1,2 |
| Teilsicherheitsb. | γM0 | 1 |  |  |
| Teilsicherheitsb. | γM1 | 1 |  |  |
|  |  |  |  |  |
| DIN | fyk | 240 N/mm² | 1 |  |
| Teilsicherheitsb. | γM | 1,1 |  |  |
| Bezugsspannung | σE | 1,83 | N/mm² |  |

Grafik 15 Maße des Trägers

Schnittgrößen

Zur Vereinfachung wird die Längssteife als nichttragend angenommen. Die Längssteife behindert das Beulen, erhöht aber nicht das Flächenmoment zweiten Grades. Dadurch ist das Stützmoment nicht größer als – q∙l²/8.

M= –

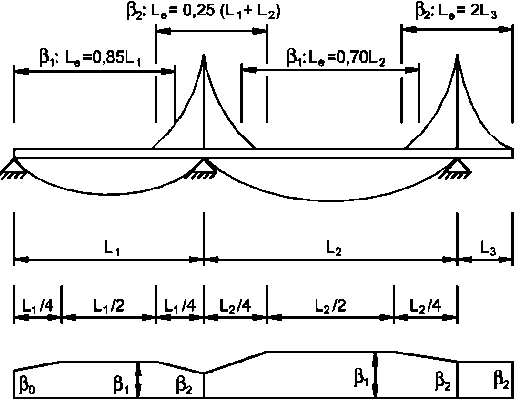
M= – 7541,325kNm

V=

V= 1142,625kN

**Schubverzerrung**

b0= 0,37/2= 0,185

 b0= 0,53/2= 0,265

Le= 0,25∙(L1 + L2)

Le= 16,5m

K=

K= 0,016 <0,02

ß=1

Bild 9 Längen für b0

keine Schubverzerrung

Grenz c/t

Eurocode 1993-1-1 Tabelle 5.2

15,32 14

Beulnachweis erforderlich

kσ= 0,43

= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.3

=

= 0,836

ρ= = Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.3

ρ= 0,927

bf:= bf ∙ρ= 0,53∙0,927

bf:= 0,4915

Mit der kürzeren Länge des Druckflansches wird gerechnet.

### Bruttoquerschnittswerte

As= bf2∙tf2 + hw∙tw + bf1∙tf1

As= 0,37∙0,011 + 0,009∙2,9 + 0,4915∙0,017

As= 0,03852m²

Der Schwerpunkt hs wird vom unteren Stegende aus nach oben gemessen.

hs =

hs =

hs =

hs = 1,2874m

Das Flächenträgheitsmoment I besteht aus 3 Steineranteilen und 3 Eigenanteilen.

I=

I=

I= 10–3∙(18,23 + 14,03 + 10,65 + 0,69)

I= 0,04367m4

Spannung σ2 im oberen Stegende

σ2= =

σ2= 278 – 0

σ2= 278,5N/mm²

Spannung σ1 im unteren Stegende

σ2=

σ1= – 222,3N/mm²

Spannungsnulllinie S

S= =

S= 1,2874m

Die Spannungsnulllinie geht durch den Schwerpunkt, weil keine Normalkraft wirkt.

Spannung σsl in der Steife

σsl= =

σsl=

σsl= – 153,2N/mm²

### Berechnung von ρc

**Feld 1 Feld 2**

Feld 2 **Feld 2**

**Feld 1** Feld 1

b= hw1 – tsl/2= 0,4 – 0,004 b= MIN(S;hw) – hw1 – tsl/2= 1,2874 – 0,4 – 0,004

b= 0,396m b= 0,8834m

Randspannungsverhältnis ψ

ψ= = ψ= =

ψ= 0,689 ψ= – 1,817

Beulwert kσ Eurocode 1993-1-5 Tabelle 4.1

kσ=

kσ= 4,715 kσ= 47,46

Beulschlankheitsgrad Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.3

= =

= =

= 0,712 = 0,501

Abminderungsfaktor ρ Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.2

ρ = MIN( 1 ; ) ρ = MIN( 1 ; )

ρ = ρ =

ρ = 1 ρ = 1

Bruttobreiten

Von dem druckbeanspruchten Stegteil wird berechnet, welches Stück davon am unteren Flansch angrenzt und welches oben angrenzt. Es geht noch keine Fläche verloren.

bu= = bu= =

bu= 0,1837 bu= 0,3533

bo= b – bu bo= b – bu

bo= 0,396 – 0,1837 bo= 0,8834 – 0,3533

bo= 0,2122 bo= 0,53007

wirksame Breiten

bu1,eff= bu∙ρ = 0,1837∙1 bu2,eff= bu∙ρ = 0,3533∙1

bu1,eff= 0,1837 bu2,eff= 0,3533

bo1,eff= bo∙ρ = 0,2122∙1 bo2,eff= bo∙ρ = 0,53007∙1

bo1,eff = 0,2122 bo2,eff = 0,53007

Σbeff = 0,2122 + 0,1837 Σbeff = 0,53 + 0,3533

Σbeff = 0,396 Σbeff = 0,8834

Verlust= b – Σbeff Verlust= b – Σbeff

Verlust= 0,396 – 0,396 Verlust= 0,8834 – 0,8834

Verlust= 0m Verlust= 0m

**Querschnittswerte der Steife**

Steife

beff2,u= 0,353m

tsl= 8mm

beff1,o= 0,2122m

Grafik 16 wirksame Breiten an der Steife

Asl= tw∙(b1o + b2u + tsl) + bsl∙tsl

Asl= 0,009∙(0,2122 + 0,3534 + 0,008) + 0,1∙0,008

Asl= 0,005963

xsl=

xsl=

xsl= 0,007312

Isl= 2 Eigen + 2 Steiner

Isl=

Isl=

Isl= (0,035 + 0, + 0,276 + 1,781)∙10–6

Isl= 2,759∙10–6m4

**Beulen des Gesamtfeldes**

image30.wmfplattenartiges Verhalten

b1= hw1= 0,4

b= B1= hw= 2,9

b2= B1 – hw= 2,5

ac= 4,33∙

ac= 4,33∙

ac= 4,628m

ac < a=7,1m

σcr,sl= für a < ac

σcr,sl= für a > ac

σcr,sl=

σcr,sl= 3,6978∙1013∙2,4∙10–6= 8,93∙107N/m²

σcr,sl= 89,3∙N/mm²

Die Beulspannung darf erhöht werden. Dabei wird die ideale Beulspannung auf den Ort der Steife bezogen.

σcr,p= =

σcr,p= 129,56N/mm²

Ac= ΣAsl,eff + Σρ∙bc,loc∙b

Ac= 0,005963

Ac,eff,loc = Asl + (beffo1 + tsl + beffu2)∙tw

Ac,eff,loc = 0,0008 + (0,2122 + 0,008 + 0,353)∙0,009

Ac,eff,loc = 0,005963

ßA,c= = 1

=

=

= 1,347

ψ= = – 1,252

ρ = Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.2

ρ =

ρ= 0,68952

Knickstabverhalten

Ac,eff= ρ∙Ac,eff,loc + bedge,eff∙t

Ac,eff= 0,6895∙0,005963 + 0,009∙(0,1837 + 0,53007)

Ac,eff= 0,01053

Asl= tw∙(b1o + b2u + tsl) + bsl∙tsl= 0,005936

Asl,1,eff= tw∙(b1o,eff + b2u,eff + tsl) + bsl∙tsl= 0,005936

ßA,c= =1

Isl= 2,759∙10–6m4

σcr,sl= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.9

σcr,sl=

σcr,sl= 19,02N/mm²

σcr,c= =

σcr,c= 27,6N/mm²

= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.11

=

= 2,918

Definition der Abstände e1 und e2

**∙** e2= xsl= 0,00731

e1 e1=(tw + bsl)/2 – xsl

e1=(0,009 + 0,1)/2 – 0,00731

e1=0,04719

e2 e= MAX(e1;e2)

**∙** e= 0,04719

Grafik 17 Definition der Abstände

α= 0,49 für offene Querschnitte

i= =

i= 0,02151m

αe= α + 0,09e/i Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.12

αe= 0,49 + 0,09∙0,04919/0,02151

αe= 0,687

k= 0,5∙(1 + αe∙( – 0,2) + )

k= 0,5∙(1 + 0,687∙(2,918 – 0,2) + 2,918²)

k= 5,69

χc=

χc=

χc= 0,09453

Interaktion

ξ= und ξ wird zwischen 0 < ξ < 1 begrenzt

ξ=

ξ= 1

ρc = (ρ – χc)∙ ξ∙(2 – ξ) + χc Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.13

ρc = (0,68952 – 0,09453)∙1∙(2 – 1) + 0,09453

**ρc = 0,68952**

### Wirksame Querschnittswerte

Ac,eff= 0,01053

image31.wmf

tw,red= tw∙ρc= 0,009∙0,68952

tw,red= 0,006206

tsl,red= tsl∙ρc= 0,008∙0,68952

tsl,red= 0,005516

A=

A=

Grafik 18 notwendige Maße für die Querschnittswerte

Schwerpunkt

bs= beff2u + tsl + beff1o= 0,3533 + 0,008 + 0,2122

bs= 0,573

bz= Zugsteg + beff2o= 1,612 + 0,53007

bz= 2,142

A∙hs=

A∙hs=

hs= 1,3229

Ieff= 5 Steiner + 5 Eigen

Ieff= +

Ieff= 0,00745 + 0,035

Ieff= 0,04251m4

wirksame Widerstandmomente

Weffu= Weffo=

Weffu= Weffo=

Weffu= 0,03193m³ Weffo= 0,02686m³

MRd,u = Weffu·fyd  MRd,o = Weffo·fyd

MRd,u = 0,03193∙235000 MRd,u = 0,02686∙235000

MRd,u = 7503,1kNm MRd,u = 6312,3kNm

MEd= 7541,325kNm

Nachweis, ob die Stegdicken weiter verringert werden müssen.

σcom,Ed=

σcom,Ed=

σcom,Ed= 163,7N/mm²

= <1 Eurocode 1993-1-5 Gleichung A.3

1 < 1

keine weitere Abminderung erforderlich

Nachweise

Nachweis nicht erfüllt

genauerer Nachweis mit Abstand

x= MIN

x= MIN

x= 1,25m

abgemindertes Moment

MEd= MEd,N – x∙V + x²∙q/2

MEd= 7541,325 – 1,25∙1142,625 + 1,25²∙55,4/2

MEd= 6156,325

Nachweis

0,8205 < 1

Nachweis erfüllt

Da der Nachweis mit Abstand geführt wurde, muss über der Stütze ein zusätzlicher Klasse 3 Querschnittsnachweis geführt werden.

hs =1,2874m

I= 0,04367m4

η1u= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.14

η1u=

η1u= 0,952 <1 OK

η1o=

η1o=

η1o= 1,189 1

Nachweis nicht erfüllt

Der Eurocode erlaubt plastifizieren im Zugbereich für Klasse 3 Querschnitte.

a= =

a= 0,476m plastifizierte Steglänge

b= =

b= 1,212

MPE,Rd=

MPE,Rd= =

MPE,Rd= 7547,3kN

verbesserter Nachweis

0,9992 < 1

Nachweis erfüllt

### image32.wmfSchubbeulen

Beim Schubbeulen wirken andere Breiten mit.

beff= 15∙ε∙tw = 15∙1∙0,009

beff= 0,135m

Asl= (beff∙2 + tsl)∙tw + bsl∙tsl

Asl= (0,27 + 0,008)∙0,009 + 0,008∙0,1

Asl= 0,003302

xsl= =

xsl= 0,013204m

Grafik 19 wirksame Breiten für Schubbeulen

Isl=

Isl= = ∙10–6m4

Isl= 2,484∙ 10–6m4

**Berechnung des Schubbeulwertes**

Es werden vom Einzelfeld und vom Gesamtfeld die Schlankheiten errechnet. Die kleinere ist Maßgebend.

Gesamtfeld

kτsl= MAX( Formel 1; Formel 2) Eurocode 1993-1-5 Gleichung A.5

Formel 1= 9∙

Formel 1= 9∙

Formel 1= 1,694

Formel 2=

Formel 2=

Formel 2= 2,215

kτsl= MAX( 1,694; 2,215)

kτsl= 2,215

kτ= 5,34 + 4∙ + kτsl Eurocode 1993-1-5 Gleichung A.5

kτ= 5,34 + 4∙ + 2,215

kt= 8,2233

Da das Beulfeld und (1 oder 2 Längssteifen) hat, darf Gleichung A.6 verwendet werden.

kτ= 4,1 + Eurocode 1993-1-5 Gleichung A.6

kτ= 4,1 +

kτ= 4,1 + 1,051 + 0,0353 + 2,3215

kτ= 7,5078

Da diese Gleichung keinen höheren Beulwert bringt, bleibt es bei

kt= 8,2233

Schubbeilschlankheit

= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 5.6

=

= 3,003

Einzelfeld

Feldhöhe = hw – h1= 2,9 – 0,4=2,5m

kτ= 5,34 + 4∙

kτ= 5,34 + 4∙

kτ= 5,836

Schubbeulschlankheit

= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 5.6

=

= 3,073

Einzelfeldbeulen ist maßgebend.

lambda.PNGw= MIN(3,003;3,073)= 3,073

für > 0,82/η gilt:

χw= = Eurocode 1993-1-5 Tabelle 5.1

χw= 0,363

Vb,w,Rd= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 5.2

Vb,w,Rd=

Vb,w,Rd= 1285,9kN

Beitrag der Flansche

Der Flansch liefert auch noch einen Beitrag zur Stegtragfähigkeit. Dies ist bei unausgelasteten Flanschen der Fall. Bei Einfeldträgern können die Flansche in der Regel mit genutzt werden. Bei Zweifeldträgern ist meist keine zusätzliche Tragfähigkeit zu erwarten.

Mf,Rd= MIN(A1;A2)∙ (hw + tf1/2 + tf2/2)∙fyd

Mf,Rd= 0,00407∙(2,9 + 0,015)∙235

Mf,Rd= 2,787MN

Mf,Rd < MEd=7541

* Vbf,Rd =0 Flansch trägt nicht mit

Gesamtquerkrafttragfähigkeit Vb,Rd

Vb,Rd= 0 + 1285,9= 1285,9kN

Schubbeulnachweis

η3= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 5.10

η3= 0,88856<1

Nachweis erfüllt

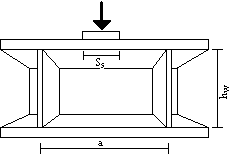
### lokales Beulen aus einer Einzellast

Der Träger kann noch eine lokale Einzellast aufnehmen. Wie groß sie sein kann, wird hier gezeigt. Die Einzellast verursacht keine Schnittgrößen.

F= 330kN

ss= 0,1m

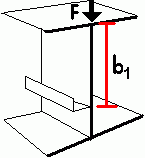
Beulwert kf

Skizze:

kf= 6 + 2∙ + ∙ Eurocode 1993-1-5 Gleichung 6.6

Der dritte Term gilt für Längssteifen und ist nur gültig, wenn gilt:

0,05 < und < 0,3



b1= hw – h1

b1= 2,9 – 0,4

b1= 2,5

= 0,38 > 0,05 OK

Längssteife trägt nicht mit

Beulwert

kf= 6 + 2∙

kf= 6,3336

Fcr= 0,9∙kf∙E∙tw³/hw Eurocode 1993-1-5 Gleichung 6.5

Fcr= 0,9∙ 6,3336∙ 210∙109∙0,009³/2,9

Fcr= 300916N

m1= = Eurocode 1993-1-5 Gleichung 6.8

m1= 41,

m2= Wenn( < 0,5; 0; 0,02∙hw²/tf²) Eurocode 1993-1-5 Gleichung 6.9

m2= 0,02∙hw²/tf² = 0,02∙2,9²/0,011²

m2= 1390,1

ly= MIN(a; ss + 2∙tf2 ∙(1 + )) Eurocode 1993-1-5 Gleichung 6.10

ly= 0,1 + 2∙0,011∙(1 + ) Eurocode 1993-1-5 Gleichung 6.10

ly= 0,954

= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 6.4

=

= 2,56

Die Vorraussetzung 0,5 wurde eingehalten.

χF= 0,5/ = 0,5/2,56 Eurocode 1993-1-5 Gleichung 6.3

χF= 0,193

Leff= χf∙ Ly =0,193∙0,954 Eurocode 1993-1-5 Gleichung 6.2

Leff= 0,1842

FRd= fyd∙ Leff∙ tw Eurocode 1993-1-5 Gleichung 6.1

FRd= 235000∙0,1842∙0,009

FRd= 389,6kN

Nachweis

η2= = Eurocode 1993-1-5 Gleichung 6.14

η2= 0,84689

Nachweis erfüllt

### Interaktion

Zuerst muss das plastische Moment ausgerechnet werden. Die Steife trägt hier mit.

image33.wmf A= 0,00407 + 0,026 + 0,0008 + 0,00901

A= 0,03998m²

A/2= 0,01999m²

Die Flächenhalbierende liegt im Steg über der Steife.

Die Skizze hat keinen relativen Maßstab.

W= =

W= 0,03791m³

MPl,Rd= W∙fyd

MPl,Rd= 0,03791∙235000

MPl,Rd= 8909,4kNm

Mf,Rd= 2787,1kNm

Grafik 20 Maße zur Berechnung von Mpl

Der Interaktionsnachweis darf im Abstand x geführt werden

x =

x= 1,25

MEd= 6156,325

VEd:= VEd – x∙q

VEd= 1142,625 – 1,25∙55,4

VEd= 1073,375kN

Nachweis

< 1

0,69099 + 0,30793= 0,99892 < 1

Nachweis erfüllt

Interaktion zwischen η1 und η2

Eurocode 1993-1-5 Gleichung 7.2

1 < 1

Nachweis erfüllt.

## Modell der wirksamen Spannungen nach der DIN 18800-3

### Geometrie

Es wird die gleiche Geometrie verwendet.

Für den Druckflansch muss ein b/t-Nachweis geführt werden.

Grenz b/t

15,32 12,9

Beulnachweis erforderlich

kσ= 0,43

= Hergeleitete Formel 1

=

= 0,831

κp= = DIN 18800-3 Tabelle 1

κp= 0,83998

bf:= bf ∙ κp = 0,53∙0,83998

bf:= 0,4452

Mit der verkürzten Länge des Druckflansches wird gerechnet. Der Druckflansch in der DIN ist kürzer als im Eurocode.

### Bruttoquerschnittswerte

As= bf2∙tf2 + hw∙tw + bf1∙tf1

As= 0,37∙0,011 + 0,009∙2,9 + 0,4452∙0,017

As= 0,03774m²

Der Schwerpunkt hs wird vom unteren Stegende aus nach oben gemessen.

hs =

hs =

hs =

hs =1,3145m

Das Flächenträgheitsmoment I besteht aus 3 Steineranteilen und 3 Eigenanteilen

I=

I=

I= 10–3∙(18,29 + 13,24 + 10,3 + 0,48)

I= 0,04232m4

Spannung σ2 im oberen Stegende

σ2=

σ2=

σ2= 282,53 – 0

σ2= 282,53N/mm²

Spannung σ1 im unteren Stegende

σ2=

σ1= – 234,23N/mm²

Spannungsnulllinie S

S= =

S= 1,3145m

Spannung σsl in der Steife

σsl= =

σsl=

σsl= – 162,96N/mm²

### Berechnung von κpx

**Feld 1 Feld 2**

Feld 2 **Feld 2**

**Feld 1** Feld 1

b= hw1 – tsl/2 b= MIN(S;hw) – hw1 – tsl/2

b= 0,4 – 0,004 b= 1,3145 – 0,4 – 0,004

b= 0,396m b= 0,9105m

Randspannungsverhältnis ψ

ψ= = ψ = =

ψ= 0,695 ψ = – 1,734

Beulwert kσ Eurocode 1993-1-5 Tabelle 4.1

kσ=

kσ= 4,697 kσ= 44,69

Beulschlankheitsgrad Hergeleitete Gleichung 1

= =

= =

= 0,722 = 0,538

Abminderungsfaktor ρ DIN 18800-2 Gleichung 81 Tabelle 27

ρ=

ρ= da < 0,673 = >

ρ= 0,9855 ρ = 1

Bruttobreiten

Nach der DIN wird ähnlich vorgegangen, wie nach dem Eurocode. Zuerst werden die Bruttobreiten berechnet, daraus dann die wirksamen Breiten und zum Schluss die wirksamen Dicken.

In der DIN ist keine Begrenzung für ψ angegeben. Da es logisch erscheint, wird für negative ψ wie im Eurocode ψ=0 gesetzt.

k1= – 0,04∙ψ² + 0,12∙ψ + 0,42 (unten) k1= – 0,04∙ψ² + 0,12∙ψ + 0,42 (unten)

k1= – 0,04∙0,695² + 0,12∙0,695 + 0,42 k1= – 0,04∙0² + 0,12∙0 + 0,42

k1= 0,484 k1= 0,42

k2= + 0,04∙ψ² – 0,12∙ψ + 0,58 (oben) k2= + 0,04∙ψ² – 0,12∙ψ + 0,58 (oben)

k2= + 0,04∙0,695² – 0,12∙0,695 + 0,58 k2= + 0,04∙0² – 0,12∙0 + 0,58

k2= 0,516 k2= 0,58

b12= b∙k12 b12= b∙k12

bo= 0,396∙k1= 0,396∙0,516 bo= 0, 9104∙k1= 0, 9104∙0,58

bo= 0,2043 bo= 0,5281

bu= 0,396∙k2= 0,396∙0,484 bu= 0, 9104∙k2= 0, 9104∙0,42

bu= 0,1917 bu= 0,3824

wirksame Breiten

bu1,eff= bu∙ρ = 0,1917∙0,9855 bu2,eff= bu∙ρ = 0,3824∙1

bu1,eff= 0,1889 bu2,eff= 0,3824

bo1,eff= bo∙ρ = 0,2043∙0,9855 bo2,eff= bo∙ρ = 0,5281∙1

bo1,eff = 0,2013 bo2,eff = 0,528

Σbeff = 0,2013 + 0,1889 Σbeff = 0,5281 + 3824

Σbeff = 0,3902 Σbeff = 0, 9104

Verlust= b – Σbeff Verlust= b – Σbeff

Verlust= 0,396 – 0,3902 Verlust= 0, 9104 – 0, 9104

Verlust= 0,0058m Verlust= 0m

**Querschnittswerte der Steifen**

Die Querschnittswerte der Steifen ändern sich geringfügig, weil sich die Breiten geändert haben.

image34.wmfSteife

beff2,u= 0,3824m

tsl= 8mm

beff1,o= 0,2013m

Asl= tw∙(b1o + b2u + tsl) + bsl∙tsl

Asl= 0,009∙(0,2013 + 0,3824 + 0,008) + 0,1∙0,008

Asl= 0,0061254

xsl=

xsl=

xsl= 0,007118

Grafik 21 Träger mit wirksame Breiten und Dicken

Isl= 2 Eigen + 2 Steiner

Isl=

Isl=

Isl= (0,036 + 0, + 0,27 + 1,796)∙10–6

Isl= 2,768∙10–6m4

**Beulen des Gesamtfeldes**

plattenartiges Verhalten

Da die DIN keine Formeln zur Berechnung der Beulwerte für ausgesteifte Plattem enthält und stattdessen auf die Literatur verweist, wird der Beulwert nach dem Eurocode berechnet.

b1= hw1= 0,4

b= B1= hw= 2,9

b2= B1 – hw= 2,5

σcr,sl= Eurocode 1993-1-5 Gleichung A.4

σcr,sl=

σcr,sl= 3,6∙1013∙2,419∙10–6= 8,71∙107N/m²

σpi= 87,09∙N/mm²

Der Beulwert muss für die DIN rückgerechnet werden.

σe= 190000∙= 19000∙ DIN 18800-3 Element 113

σe= 1,82996N/mm²

kσ= σpi/σe= 87,09/1,82996

kσ= 47,59

= 1,66008

κp= MIN(1,25; 1,25 – 0,25∙ψ)∙ DIN 18800-3 Tabelle 1

κp= 1,25∙

κp= 0,65319

knickstabähnliches Verhalten

γ = DIN 18800-3 Element 114

γ =

γ = 14,3

δ = = DIN 18800-3 Element 114

δ = 0,0306

k= 0,5∙(1 + 0,34∙( – 0,2) + )

k= 0,5∙(1 + 0,34∙(1,66008 – 0,2) + 1,66008²)

k= 2,126

κk= =

κk= 0,2895

Interaktion

= kσ∙α²∙ DIN 18800-3 Gleichung 23

= 47,59∙

= 19,21

Λ= + 0,5 und 2< Λ <4 DIN 18800-3 Gleichung 22

Λ= 1,66008² + 0,5

Λ= 3,256

ρ= und 0 < ρ < 1 DIN 18800-3 Gleichung 21

ρ=

ρ= 0

κpx= (1 – ρ²)∙κp + ρ²∙κk  DIN 18800-3 Gleichung 24

κpx= (1 – 0²)∙0,653 + 1²∙0,2895

κpx= 0,65319

### Nachweis

σd= 234N/mm²

σp,Rd= fyd∙MIN(κ1;κ2;κpx)= 240∙0,653/1,1

mit κ1 und κ2 als Abminderungsfaktoren für Einzelfeldbeulen

σp,Rd= 142,51

< 1 DIN 18800-3 Gleichung 11

1,64 1

Nachweis nicht erfüllt.

### Schubbeulen

Da die DIN keine Formel für einen Schubbeulwert mit Längssteifen enthält, wird die Formel aus dem Eurocode verwendet. Da auch der Rechenweg bis gleich ist, werden die Werte bis dahin übernommen.

kτ= 8,2233

= Hergeleitete Formel 2

=

= 3,034

Die Berechnung der Schubschlankheit für das Einzelfeld ist mit dem Eurocode identisch. Der Wert wird übernommen.

= 3,073

Einzelfeldbeulen ist maßgebend.

= MIN(3,034;3,073)= 3,073

Für > 1,38 und Beulfeld mit Längssteifen gilt

κτ = = DIN 18800-3 Tabelle 1

κτ = 0,12286

Nachweis

τd=

τd= 43,78N/mm²

τP,Rd= =

τP,Rd= 15,47N/mm²

DIN 18800-3 Gleichung 12

2,8287 1

Nachweis nicht erfüllt

### Lokales Beulen aus einer Einzellast

F= 330kN

ss= 0,1m

c= ss + 2∙tf2= 0,1 + 2∙0,011

c= 0,122

α= ß=

α= 2,4482 ß= 0,01718

Aus der Tabelle kann entnommen werden

Tabelle 19 Auszug aus

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ß↓ α→ | 2 | 3 |
| 0 | 1,17 | 0,73 |
| 0,1 | 1,21 | 0,79 |

z= zlo + (zro – zlo)∙ +

kσy= 1,17 + (0,73 – 1,17) ∙ +

kσy= 1,17 – 0,198 + (0,04 + 0,02∙0,45)∙0,171

kσy= 0,981

σe= 1,82996N/mm²

σy,pi= kσy∙σe∙a/c

σy,pi= 0,981∙1,82996∙7,1/0,122

σy,pi= 104,49N/mm²

=

= 1,516

κy= DIN 18800-3 Tabelle 1

κy=

κy= 0,56405

σyki= 1,88·σe= 3,437N/mm²

Es wird laut DIN die Beulschlankheit verwendet. Der Eurocode hingegen verlangt die Knickschlankheit .

k= 0,5∙(1 + 0,34∙(y – 0,2) + )

k= 0,5∙(1 + 0,34∙(1,516 – 0,2) + 1,516²)

k= 1,872

κk=

κk=

κk= 0,33659

= 30,41

Λ= + 0,5 und 2< Λ <4 DIN 18800-3 Gleichung 22

Λ= 1,516² + 0,5

Λ= 2,797

ρ= Min(Max(;0);1) DIN 18800-3 Gleichung 21

ρ=

ρ= 0

κpx= (1 – ρ²)∙κp + ρ²∙κk  DIN 18800-3 Gleichung 24

κpx= (1 – 0²)∙0,56405 + 1²∙0,33659

κpx= 0,56405

σP,Rd= fyd∙ κpx = 240∙0,56405/1,1

σP,Rd= 123,06

σy= F/(c∙tw)= 330/(0,122∙0,009)

σy= 300,5N/mm²

Nachweis

= 2,442

### Interaktion

κx= 0,65319 Nachweis η1: 1,6436

κy= 0,56405 Nachweis η2: 2,4422

κτ= 0,12286 Nachweis η3: 2,8287

e1= 1 + κx4= 1 + 0,653194 DIN 18800-3 Gleichung 15

e1= 1,182

e2= 1 + κy4= 1 + 0,564054 DIN 18800-3 Gleichung 16

e2= 1,101

e3= 1 + κx∙ κy∙ κτ² = 1 + 0,65319∙0,56405∙0,12286² DIN 18800-3 Gleichung 17

e3= 1,005

V= (κx∙ κy)6= (0,653∙0,564)6

V= 0,0025

< 1 Gleichung 14

1,6441,182 + 2,4421,101 + 2,8291,005 – 0,0025∙1,644∙2,442

7,3074 > 1

Nachweis nicht erfüllt

## Modell der wirksamen Spannungen nach dem Eurocode 1993-1-5

Aus dem Rechenbeispiel nach dem Eurocode mit dem Modell der wirksamen Breiten werden folgende Werte übernommen, da der Rechenweg gleich ist:

ρc= 0,68952 Plattenbeulen

χw= 0,36314 Schubbeulen

σd= σ1= 222,3N/mm²

τd=

τd= 43,78N/mm²

Spannungsnachweis

<1

Nachweis nicht erfüllt

Schubspannungsnachweis

<1

Nachweis erfüllt

**Nachweis der Einzellast**

Bis σy,Pi ist der Rechenweg gleich.

σy,pi= 104,49N/mm²

=

= 1,4997

ρ= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.2

ρ=

ρ= 0,569

σyki= σe= 1,82996N/mm²

=

= 11,338

α= 0,21 für Einzelfelder

k= 0,5∙(1 + α∙( – 0,2) + )

k= 0,5∙(1 + 0,21∙(11,338 – 0,2) + 11,338²)

k= 65,94

χc=

χc=

χc= 0,00764

ξ= und 0 < ξ < 1

ξ= und 0 < ξ < 1

ξ= 1

Abminderungsfaktor ρc

ρc = (ρ – χc)∙ ξ∙(2 – ξ) + χc Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.13

ρc = (0,569 – 0,00764)∙1∙(2 – 1) + 0,00764

ρc = 0,569

σp,Rd= 0,569∙235

σp,Rd= 133,7

σy= 300,5N/mm²

Nachweis

= 2,248 1

Nachweis nicht erfüllt

Aus allen 3 Auslastungen wird der Interaktionsnachweis geführt.

< 1² Gleichung 10.5

1,883 + 5,052 – 3,084 + 0,789 < 1²

2,154 > 1

Nachweis nicht erfüllt

## Modell der wirksamen Breiten nach der DIN 18800-2

Der Rechengang ist nach der DIN mit dem Modell der wirksamen Spannungen bis κp der gleiche. Es werden folgende Werte übernommen:

Tabelle 20 wirksame Breiten und Querschnittswerte

wirksame Breiten

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| bo | bu | bu1,eff | bo1,eff | Verlust |
| 0,2043 | 0,1917 | 0,1889 | 0,2013 | 0,0058m |
| Querschnittswerte | |  |  |  |
| As | hs | I | S |  |
| 0,03774m² | 1,3145m | 0,04232m4 | 1,3145m |  |

κp = 0,65318

τd= 43,78N/mm²

τP,Rd= 15,47N/mm²

Die Stegdicke wird zusätzlich reduziert, um den Einfluss der Querkraft zu berücksichtigen.

Faktor=

Faktor=

Der imaginäre Faktor wird auf 0 gerundet. Der Steg ist vollständig aufgebraucht.

Wirksame Querschnittswerte

Fläche

A= bf1∙tf1 + bf2∙tf2

A= 0,4452∙0,017 + 0,37∙0,011

A= 0,01164m²

Schwerpunkt

hs∙A= bf2∙tf2∙(hw + tf2) – bf1∙tf1²/2

hs∙0,01164= 0,37∙0,011∙(2,9 + 0,011/2) – 0,4452∙0,017²/2

hs=

hs= 1,0105m

Flächenmoment zweiten Grades

I= bf1∙tf1∙(hs + tf1)² + bf2∙tf2∙(hw – hs + tf2)²

I= 0,4452∙0,017∙(1,0105 + 0,017/2)² + 0,37∙0,011∙(2,9 – 1,0105 + 0,011/2)²

I= 0,00785 + 0,0146

I= 0,02247

Weff,u= =

Weff,u=

Weff,u= 0,02205

Nachweis

1,567 1

Nachweis nicht erfüllt

## Zusammenfassung

Das Rechenbeispiel wurde so gewählt, sodass der Träger im Eurocode nach dem Modell der wirksamen Breiten ausgelastet ist. Die anderen 3 Rechenwege schneiden daher deutlich schlechter ab.

Durch einen kleinen Fehler ganz am Anfang, der wie ein Rundungsfehler aussah, verändert sich die wirksame Breite des unteren Flansches.

So wurde gerechnet

= kleinere wirksamere Breite des Flansches

richtig müsste es lauten

= damit entsteht eine größere wirksame Breite

Für die Zusammenfassung wurde mit richtigen Breiten gerechnet.

### Abminderungsfaktoren.

Tabelle 21 Abminderungsfaktoren für das zweite Rechenbeispiel

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Abminderung | Euro | DIN |  |
| ρc | 0,698952 | 0,65319 | Plattenbeulen |
| χw | 0,36313 | 0,12286 | Schubbeulen |

Beim Plattenbeulen hat der Eurocode einen besseren Abminderungsfaktor. Das liegt daran, dass, wenn Steifen vorhanden sind, die ideale Beulspannung und Knickspannung auf die Steife bezogen werden.

σcr,p=

Durch diese stark erhöhte Beulspannung sinkt die Schlankheit und somit steigt der Abminderungsfaktor. Ebenfalls günstig wirkt sich das Randspannungsverhältnis aus.

ρ = Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.2

Dieses schwächt den negativen Summanden und erhöht somit den Abminderungsfaktor.

Die DIN kann einen zusätzlichen Faktor von 1,25 entgegenhalten, sodass der Abminderungsfaktor der DIN nicht ganz so niedrig ist.

Beim Schubbeulen ist die DIN dem Eurocode weit unterlegen.

χw= vs. κτ=

Bei Längssteifen und großen Schlankheiten geht die Schlankheit quadratisch ein.

### Zusammenfassung der einzelnen Nachweise

Tabelle 22 Nachweise für alle 4 Rechenmöglichkeiten

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Nachweise | EuroB | DINS | EuroS | DINB |
| η1 | 0,81466808 | 1,6435881 | 1,3610118 | 1,5672541 |
| η1u | 0,94622622 | x | x | 1,003187 |
| η1o | 0,99418642 | x | x | 1,2064416 |
| η2 | 0,84688921 | 2,4421529 | 2,2476724 | x |
| η3 | 0,88856025 | 2,8286919 | 0,8885602 | 2,8286919 |
| Interaktion | 0,99892821 | 7,3073967 | 2,152862 |  |
| Interaktion 2 | 1 | x | x | x |

Die Abkürzungen haben folgende Bedeutungen:

EuroB= Eurocode 1993-1-5 Kapitel 4-7 Modell der wirksamen Breiten

DINS= DIN 18800-3 Modell der wirksamen Spannungen

EuroS= Eurocode 1993-1-5 Kapitel 10 Modell der wirksamen Spannungen

DINB= DIN 18800-2 Modell der wirksamen Breiten

x= Nachweis existiert nicht

Die Buchstaben für den Ausnutzungsgrad stimmen im Eurocode überein und in der DIN gibt es keine. Deshalb werden die Buchstaben auch für die DIN benutzt.

η1= Normalspannungsauslastung mit Beulen

η1o= Normalspannungsauslastung oben im Bruttoquerschnitt ohne Beulen

η1u= Normalspannungsauslastung unten im Bruttoquerschnitt ohne Beulen

η2= Auslastung aus einer Einzellast

η3= Ausnutzungsgrad aus Schubbeulen

Interkation= Interaktion zwischen η1 und η3 im Eurocode wirksame Breiten und Interaktion

zwischen allen Spannungen im Modell der wirksamen Spannungen.

Interaktion 2= Interaktion zwischen η1 und η3 im Eurocode.

Das Ergebnis unterscheidet sich nicht vom ersten Rechenbeispiel. Der Träger trägt mehr, wenn nach dem Eurocode oder nach dem Modell der wirksamen Breiten gerechnet wird.

Die kleinen Nachweise, wie z.B. die Mindeststeifigkeit der Längssteifen wurden eingehalten, ohne dass sie hier berechnet wurden.

### Rechenaufwand

Tabelle 23 Erforderlicher Rechenaufwand nach dem zweiten Rechenbeispiel

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Abschnitt | EuroB | DINS | EuroS | DINB |
| 1 | II | II | II | II |
| 2 | I' | I' | I' | I' |
| 3 | IIIII' | IIIII | IIIII' | IIIII |
| 4 | III | ' | I | I |
| 5 | II' | I | II' | I |
| 6 | II | II | II | fehlt |
| 7 | I' | I | I |  |
| Summe | 18 | 13 | 16 | 13,5 |

In der Tabelle sind die Anzahl der benötigten Seiten eingetragen. Der Eurocode fordert für seine besonders schlanken Träger einen deutlich höheren Rechenaufwand. Während die Berechnung nach der DIN schon nach 13 Seiten fast fertig ist, sind es im Eurocode über 18 Seiten. Es fehlt noch der Nachweis der Mindeststeifigkeit. Der Eurocode verlangt zusätzlich den Nachweis gegen flanschinduziertes Stegbeulen, während es nach der DIN 18800-2 nicht möglich ist lokale Lasten zu berücksichtigen.

Ein großer Vorteil des Eurocodes ist seine Vollständigkeit. Beulnachweise sind ohne Hilfe von Literatur möglich.

### Stahlverbrauch

Der Träger benötigt nach dem Eurocode (wirksame Breiten) am wenigsten Stahl.

Für die anderen 3 Rechenmodelle wird der Querschnitt dicker gemacht, sodass der Nachweis erfüllt ist. Biegedrillknicken und zusätzliches Eigengewicht werden ignoriert. Biegedrillknicken benötigt im Eurocode großen Rechenaufwand.

Der Träger benötigt nach dem Eurocode (wirksame Spannungen) fast 1m³ mehr als Eurocode wirksame Breiten.

Nach dem Modell der wirksamen Spannungen ist der Druckflansch nicht richtig ausnutzbar.

Daher wird die Lastaufstandlänge ss von 10cm auf 30cm vergrößert. Der Druckflansch wird von 17mm auf 18mm verdickt und die Stegdicke wird auf 13mm geändert.

Der Eurocode enthält gegenüber der DIN viele kleine Tragfähigkeitsboni:

Nachweis im Abstand

semiplastischer Nachweis

bessere Abminderungsfaktoren, besonders bei Schub

Querkrafttragfähigkeit des Flansches

Knickspannung am Ort der Steife und nicht am Rand

Die DIN (wirksame Breiten) benötigt etwas mehr Stahl als der Eurocode (wirksamen Spannungen). Dies liegt daran, dass nach der DIN die Schubschlankheit quadratisch eingeht. Dazu muss der Steg so weit verdickt werden, bis die Schubspannung aufgenommen wird. Wird er einen Millimeter dicker hergestellt, als für Schub notwendig ist, bringt er viel Biegetragfähigkeit. Für geringe Schubspannungen liefert die DIN 18800-2 bessere Resultate, als der Eurocode nach Kapitel 10. Ein weiterer Grund für den höheren Stahlverbrauch ist, dass der Eurocode diverse kleine Tragfähigkeitsboni enthält, die in der DIN fehlen.

Daher ist der Steg 14mm dick. Der Druckflansch ist 19,5mm dick und 51cm breit, um den Verlust aus dem b/t Verhältnis zu kompensieren. Im Eurocode muss c/t <14 sein und nach der DIN b/t<12,9. Allerdings ist die Wirkung der Einzellast nicht erfasst, sodass noch etwas mehr Stahl benötigt wird.

Nach der DIN 18800-3 entsteht der schwerste Träger.

Hier summieren sich alle Schwächen auf. Eine große Schwäche des Modells der wirksamen Spannungen ist, dass die Flansche nur so viel Spannung aufnehmen können, wie das schwächste Querschnittsteil. Dadurch müssen die Flansche klein gehalten werden und der Steg verbreitert werden. Der Steg muss das Moment aufnehmen. Dass die Schubschlankheit quadratisch eingeht, spielt deswegen keine Rolle mehr. Eine weitere Schwäche ist der Interaktionsnachweis. Bei geringen Schlankheiten werden alle Ausnutzungsfaktoren addiert. Die Quadrate im Eurocode Kapitel 10 lassen kleine Ausnutzungen um die 30% fast verschwinden. Der Interaktionsnachweis im Eurocode in Kapitel 7 arbeitet mit der plastischen Momententragfähigkeit und kombiniert diesen Bonus noch damit, dass der Nachweis im Abstand geführt werden darf.

Die Lastaufstandlänge ist 30cm, der Steg 21mm dick und der Flansch 20mm dick.

Grafik1.emf Eurocode Eurocode DIN 18800-2 DIN 18800-3

wirksame Breiten wirksame Spannungen

Grafik1.emfGrafik1.emf

Grafik1.emf

**2,64m³ 3,44m³ 3,66m³ 5,04m³**

Grafik 22 Stahlverbrauch zum zweiten Rechenbeispiel

### Vergleich zwischen Aufwand und Stahlverbrauch

Aufwandeinsparverhältnis E =

E(EuroB)= = 1,378

E(DINB)= = 1,326

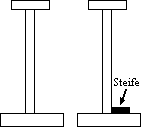
E(EuroS)= = 1,19

E(DINS)= = 1

Die DIN 18800-3 schneidet am schlechtesten ab und baut pro Seite am wenigsten Tragfähigkeit auf. Das Modell der wirksamen Breiten bringt mit jeder Seite die meiste Tragfähigkeit.

## Variation der Geometrie

### Träger mit Längssteife am Stegende

Untersucht wird ein Träger, an dessen Stegende eine Längssteife angebaut wird. Die wirksame Druckflanschbreite wird zur Vereinheitlichung nach dem Eurocode berechnet. Die Längssteife im Rechenbeispiel wird bis 1mm vor Stegende verschoben. In der Praxis ist dies völliger Unsinn, aber eine Norm muss in sich geschlossen und widerspruchsfrei sein und beurteilen können, ob eine Konstruktion Unsinn ist. Welche Norm und welches Modell diese Prüfung besteht, wird hier untersucht.

Plausibel ist folgendes Ergebnis: Es macht keinen Unterschied, ob die Längssteife vorhanden ist oder nicht.

Ergebnisse ohne Längssteifen Ergebnisse mit Längssteifen

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Nachweise | EuroB | DINS | EuroS | DINB |
| η1 | 0,903 | 2,356 | 2,023 | 1,403 |
| η1u | 0,946 | x | x | 0,946 |
| η1o | 0,994 | x | x | 1,187 |
| η2 | 0,847 | 2,442 | 2,248 | x |
| η3 | 0,992 | **1,469** | 0,992 | **1,469** |
| Interaktion | 1,164 | 6,68 | 2,363 | x |
| Interaktion 2 | 0,991 | x | x | x |

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Nachweise | EuroB | DINS | EuroS | DINB |
| η1 | 0,901 | 2,351 | 2,019 | 1,403 |
| η1u | 0,946 | x | x | 0,946 |
| η1o | 0,994 | x | x | 1,187 |
| η2 | 0,847 | 2,442 | 2,248 | x |
| η3 | 0,992 | **3,695** | 0,992 | **3,695** |
| Interaktion | 1,153 | 11,74 | 2,361 | x |
| Interaktion 2 | 0,982 | x | x | x |

Tabelle 24 Vergleich der Nachweisergebnisse, wenn mit und ohne Längssteife auf dem Flansch gerechnet wird

Im Eurocode gibt es in den Einzelnachweisen keine Unterschiede. Die Unterschiede in den Interaktionen sind 1%. Das liegt daran, dass die Steife im plastischen Moment mit berücksichtigt wird. Eine zusätzliche Fläche im Querschnitt, die weit vom Schwerpunkt entfernt ist, erhöht die Tragfähigkeit. Die Plastische Tragfähigkeit wirkt im Nenner von (nicht η1).

Hier zeigt sich, dass der Eurocode widerspruchsfrei ist.

In der DIN gibt es in allen Nachweisen, bis auf dem Schubnachweis, ebenfalls Widerspruchsfreiheit. Der Widerspruch ist in der DIN 18800-3 Tabelle 1 zu finden. Für Beulfelder ohne Längssteifen gilt:

κτ =

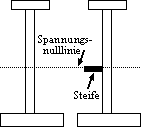
Sind Längssteifen vorhanden und die Schlankheit größer als 1,38 gilt stattdessen:

κτ =

Damit ist die DIN nicht durchgehend widerspruchsfrei. Dieser Widerspruch wirkt sich nicht nur auf sinnlose Konstruktionen aus, sondern auch auf solche, bei denen die Steife etwas höher liegt. Eine zusätzliche Längssteife kann also die Schubtragfähigkeit verringern!

Die beiden Modelle sind widerspruchsfrei. Die Längssteife kann problemlos verschoben werden, ohne dass irgendwelche Sprünge, Singularitäten und Polstellen aktiviert werden.

### Träger mit Längssteife in der Spannungsnulllinie

Das Ziel ist das gleiche, wie im vorherigem Abschnitt. Welche Widersprüche sind in den Normen zu finden? Untersucht wird der Träger im Rechenbeispiel, bei dem die Längssteife 0,4mm unter der Spannungsnulllinie liegt.

Das zu erwartende Ergebnis ist, dass die Längssteife nur Wirkung auf die Schubtragfähigkeit hat.

Ergebnisse ohne Längssteifen Ergebnisse mit Längssteifen

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Nachweise | EuroB | DINS | EuroS | DINB |
| η1 | 0,903 | 2,356 | 2,023 | 1,403 |
| η1u | 0,946 | x | x | 0,946 |
| η1o | 0,994 | x | x | 1,187 |
| η2 | 0,847 | 2,442 | 2,248 | x |
| η3 | 0,992 | 1,469 | 0,992 | 1,469 |
| Interaktion | 1,165 | 6,68 | 2,363 | x |
| Interaktion 2 | 0,992 | x | x | x |

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Nachweise | EuroB | DINS | EuroS | DINB |
| η1 | 0,991 | 2,075 | 1,851 | 1,403 |
| η1u | 0,946 | x | x | 0,946 |
| η1o | 0,994 | x | x | 1,187 |
| η2 | 0,847 | 2,442 | 2,248 | x |
| η3 | 0,872 | 2,759 | 0,872 | 2,759 |
| Interaktion | 1,067 | 7,669 | 2,253 | x |
| Interaktion 2 | 1,037 | x | x | x |

Tabelle 25 Vergleich der Ergebnisse, wenn mit und ohne Längssteife auf der Spannungsnulllinie gerechnet wird

Baut man eine Längssteife auf der Spannungsnulllinie, so entstehen völlig andere Ergebnisse.

Der Nachweis der Einzellast hat sich nicht verändert. Das Modell der wirksamen Breiten in der DIN bringt scheinbar widerspruchsfreie Ergebnisse, jedoch nicht im Schubspannungsnachweis. Zu erwarten ist, dass die Schubbeanspruchung sinkt, da das Beulfeld halbiert wurde. Jedoch wird wegen des Vorhandenseins der Längssteifen eine andere Formel verwendet. Der ganze Steg wird für die Schubspannung verbraucht. Befinden sich im Steg Fehler in der Berechnung, so bleiben sie durch der Multiplikation mit 0 unsichtbar. Wäre das Rechenbeispiel so gewählt, sodass der Träger nicht nach dem Eurocode ausgelastet ist, sondern nach der DIN wirksame Breiten, so wären in den Auslastungen Unterschiede sichtbar.

Nach dem Eurocode erhöht die Längssteife tatsächlich die Schubtragfähigkeit.

Die Querschnittsnachweise η1 und η1u haben sich ebenfalls nicht verändert. Die Interaktionsnach-weise liefern nur wegen veränderter Eingangswerte veränderte Werte.

Wo die Ursachen für die unterschiedlichen Werte liegen wird jetzt gezeigt.

**unterschiedliche Beulfelder**

Die erste Ursache liegt bei der Berechnung von η1. Beim Einzelfeldbeulen gibt es Unterschiede.

Feld 2

Feld 1 Feld 1

Das Einzelfeld hat eine andere Breite und einen anderen Beulwert.

Rechengang ohne Längssteife Rechengang mit Längssteife

b= hw= 2,9m b= hw1 – tsl/2= 1,276m

Randspannungsverhältnis ψ Randspannungsverhältnis ψ

ψ= = ψ= =

ψ= – 1,258 ψ= 0,00317

Beulwert kσ Beulwert kσ

kσ = 5,98∙(1 – ψ)² kσ = 8,2/(1,05 + ψ)

kσ = 5,98∙(1 + 1,258)² kσ = 8,2/(1,05 + 0,00317)

kσ = 30,5 kσ = 7,78

Beulschlankheitsgrad Beulschlankheitsgrad

= =

= =

= 2,052 = 1,787

Abminderungsfaktor ρ Abminderungsfaktor ρ

ρ = ρ =

ρ = ρ =

ρ = 0,465 ρ = 0,507

Die Längssteife erhöht den Abminderungsfaktor. Aus diesem entstehen längere wirksame Breiten. Damit lassen sich im Modell der wirksamen Spannungen (beide Normen) die geringeren Auslastungen erklären.

**Unendliche ideale Beulspannung**

Im Eurocode gibt es eine Polstelle. Untersucht man das Knicken der Steife, so stellt man fest, dass man den Ort der Steife berücksichtigen kann.

σcr,c= Gleichung 4.9 Anmerkung

σcr,c=

σcr,c= **∞**

Doch dies macht Sinn. Eine Steife auf der Spannungsnulllinie kann weder Knicken noch Beulen. Die unendliche Tragfähigkeit führt zu ρc=1. Dadurch wird der Bereich in der Steife nicht ein zweites Mal abgemindert. Das Ergebnis ist, dass es ohne Längssteife wirksame Breiten mit voller Dicke gibt, und mit Längssteife gibt es wirksame Breiten, die nicht weiter abgemindert werden. Es gibt also keinen Unterschied.

In der DIN liegt damit ein Widerspruch dort, wo das Knicken der unausgelasteten Steife und das Beulen des Teilfeldes maßgebend werden können (In diesem Rechenbeispiel ist das Einzelfeldbeulen gegenüber dem Teilfeldbeulen maßgebend). Das Model der wirksamen Breiten nach der DIN hat dünnere wirksame Breiten. Durch die Multiplikation mit 0 ist dieser Mangel unsichtbar. Dies ist jedoch kein Mangel der DIN, da die DIN 18800-2 ausgesteifte Beulfelder nicht behandelt. Um trotzdem rechnen zu können, wurde dieses Modul aus dem Eurocode übernommen. Die Kombination beider Normen führt daher zum Fehler. Als Korrektur kann man aus dem Eurocode übernehmen, dass der Ort der Steife ebenfalls berücksichtigt wird.

**reduzierte Schlankheit**

Nachdem σcr,c ausgerechnet wurde, errechnet sich die Schlankheit:

mit ßA,c= Gleichung 4.11

Also je mehr Fläche durch Einzelfeldbeulen verloren geht, desto geringer ist die Schlankheit für Teilfeldbeulen. Sinkt die Stegdicke, so sinkt ρc und die Tragfähigkeit. In diesem Punkt gibt es keinen Widerspruch. Ändert man aber die Form der Steifen, so entsteht Unsinn.

**uneinheitlicher Abstand**

Beim Eurocode mit dem Modell der wirksamen Spannungen gibt es nicht nur eine Veränderung der wirksamen Breiten sondern am Ende auch einen Widerspruch.

Der Nachweis darf im Abstand von 0,5∙b und 0,4∙a geführt werden, wobei b die Beulfeldbreite ist und a der Quersteifenabstand. Laut dem Kommentar [7] zum Eurocode wird das größte Beulfeld verwendet.

Baut man eine Steife ein, so sinkt die Beulfeldhöhe und das Moment darf weniger abgemindert werden.

Rechengang mit Längssteife Rechengang ohne Längssteife

x= MIN x= MIN

x= MIN(1,62/2; 0,4∙7,1) x= MIN(1,45; 2,84)

x= 0,81 x= 1,45

MEd= 6634kNm MEd= 5943kNm

Baut man also eine Längssteife auf der Spannungsnulllinie ein, so stürzt die Brücke laut Eurocode ein.

**Ergebnis ohne Widersprüche**

Setzt man x=1,45 und ρ= 0,465 und ignoriert in der DIN κτ= 1,16/, so entsteht dieses Ergebnis

Ergebnisse ohne Längssteifen Ergebnisse mit Längssteifen

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Nachweise | EuroB | DINS | EuroS | DINB |
| η1 | 0,903 | 2,355 | 2,026 | 1,403 |
| η1u | 0,946 | x | x | 0,946 |
| η1o | 0,994 | x | x | 1,187 |
| η2 | 0,847 | 2,442 | 2,248 | x |
| η3 | 0,992 | 1,469 | 0,992 | 1,469 |
| Interaktion | 1,165 | 6,678 | 2,364 | x |

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Nachweise | EuroB | DINS | EuroS | DINB |
| η1 | 0,903 | 2,355 | 2,026 | 1,403 |
| η1u | 0,946 | x | x | 0,946 |
| η1o | 0,994 | x | x | 1,187 |
| η2 | 0,847 | 2,442 | 2,248 | x |
| η3 | 0,872 | 1,255 | 0,872 | 1,255 |
| Interaktion | 0,94 | 6,524 | 2,316 | x |

Tabelle 26 Vergleich der Nachweisergebnisse, wenn die Widersprüche ignoriert werden.

Ganz deutlich sieht man, dass der Nachweis η1 sich nicht mehr verändert und sich die Schubtragfähigkeit erhöht.

### Einfluss des Ortes der Steife auf die Tragfähigkeit

Da nun die beiden Extremfälle untersucht sind, wird im Diagramm der Einfluss des Ortes der Steife angezeigt.

Auf der x-Achse ist der Abstand der Steife zum Druckflansch aufgetragen und auf der Y-Achse das Ergebnis des Interaktionsnachweises. Die Kurve der DIN 18800-3 wurde um den Faktor 5 skaliert und nach der DIN 18800-2 ist das Ergebnis immer 1,403 , weil der überlastete Steg keinen Einfluss mehr hat.

Tabelle 27 Interaktionsnachweis in Abhängigkeit vom Ort der Steife

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Ort | EuroB | DINS | EuroS |
| 0,001 | 1,153 | 11,74 | 2,361 |
| 0,1 | 1,112 | 10,74 | 2,296 |
| 0,2 | 1,073 | 9,67 | 2,24 |
| 0,3 | 1,035 | 8,1 | 2,193 |
| 0,4 | 0,999 | 7,38 | 2,156 |
| 0,5 | 0,982 | 7,11 | 2,141 |
| 0,6 | 0,993 | 7,22 | 2,144 |
| 0,8 | 1,015 | 7,36 | 2,154 |
| 1 | 1,038 | 7,39 | 2,192 |
| 1,15 | 1,055 | 7,53 | 2,225 |
| 1,28 | 1,067 | 7,67 | 2,253 |

Diagramm 15 Interaktionsnachweis in Abhängigkeit vom Ort der Steife

Der Träger aus dem Rechenbeispiel kann noch optimiert werden, indem die Längssteife um 7cm höher geschoben wird.

### Einfluss der Stahlgüte auf die Tragfähigkeit

Die Stahlgüte beeinflusst die Schlankheit und geht proportional in die plastischen Schnittgrößen ein. Die Gesamtwirkung wird im Diagramm aufgetragen.

Auf der Y-Achse wird der Interaktionsnachweis aufgetragen. Die Interaktion entspricht im Eurocode nach dem Modell der wirksamen Spannungen der Auslastung. Für das andere Modell lässt sich die Interaktion nicht in eine Auslastung umrechnen. Bei der DIN ist das für beide Modelle nahezu der Fall. Für die DIN 18800-3 wurden die Werte durch 2 dividiert, um sie im Diagramm darstellen zu können.

image37.wmf

Diagramm 16

Im Gegensatz zu einem Knickstab erhöht sich die Tragfähigkeit mit zunehmender Streckgrenze. Bildet man dazu den reziproken Wert, so entstehen 4 Geraden. Diese Geraden sind unmerkbar positiv gekrümmt.

Ab einer Streckgrenze von 460N/mm² ist der Steg nach der DIN nicht mehr überlastet, sodass er nach der DIN 18800-2 mitträgt.

Für eine unendlich große Streckgrenze gehen alle Nachweise gegen 0.

# drittes Rechenbeispiel: Zweifeldträger mit vielen Lasten

## Modell der wirksamen Breiten nach dem Eurocode 1993-1-5

### Geometrie

Es wird ein Zweifeldträger mit 2 Längssteifen und ohne Quersteifen an der Stütze untersucht. Er wird durch eine Gleichlast und einer Einzellast im ersten Feld belastet. Die Stahlgüte ist S355.

image38.wmf

Tabelle 28 Eingangsdaten für das dritten Rechenbeispiel

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Quersteifen | a' | keine | m |
| Träger links | l1 | 5 | m |
| Träger rechts | l2 | 6,4 | m |
| Belastung links | qEd | 18 | kN/m |
| Belastung rechts | qEd | 18 | kN/m |
| Einzellast | F | 9,3 | kN |

Querschnittsdaten in mm.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| oberer Flansch | bf2 | 71 | tf2 | 3 |
| unterer Flansch | bf1 | 91 | tf1 | 7 |
| Steg | hw | 600 | tw | 3 |
| Steife | bsl | 30 | tsl | 4 |
| Steifenflansch | hsl | 24 | tsl2 | 3 |
| obere Steife | hw2 | 300 |  |  |
| untere Steife | hw1 | 150 |  |  |

Grafik 23 Träger

Da bei diesem kleinen Träger sehr viele Nullen in den Formeln stehen, wird für die Länge öfter der Präfix Milli verwendet. Dabei entstehen natürliche Zahlen ohne Komma.

Schnittgrößen

image39.wmf

Grafik 24 Zweifeldträger mit allen Maßen und Lasten

M=

M= = Mq + MF= – 76,41 – 3,82

M= – 80,23kNm

Vlinks=

Vlinks=

Vlinks= – 45 – 15,28 – 0,76 – 4,65

Vlinks= – 65,7

Vrechts=

Vrechts=

Vrechts= 57,6 + 11,93 + 0,59

Vrechts= 70,14

N= – 251,5kN

**Schubverzerrung**

b0= 0,091/2= 0,0455

Le= 0,25∙(L1 + L2)

Le= 2,85m

K= Eurocode 1993-1-5 Tabelle 3.1

K= 0,01592 <0,02

* ß=1

keine Schubverzerrung

Grenz c/t

ε Eurocode 1993-1-1 Tabelle 5.2

ε= = 0,8165

6,28 < 11,39

Flansch trägt vollständig mit

### Bruttoquerschnittswerte

image10.wmfDa diese Berechnung schon zweimal durchgeführt wurde, werden jetzt nur die Ergebnisse gezeigt:

Fläche A= 0,00265m²

Schwerpunkt hs= 0,251m

Spannungsnulllinie S= 0,4m

Flächenmoment zweiten Grades I= 0,0001258m4

Spannung oben σ2= 127,6 N/mm²

Spannung neben der oberen Steife σsl2= – 63,8 N/mm²

Spannung neben der unteren Steife σsl1= – 159,5 N/mm²

Spannung unten σ1= – 255,2 N/mm²

### Berechnung von ρc

Zuerst werden die wirksamen Breiten der Einzelfelder berechnet. So geht man da für jedes Feld vor:

Randspannungsverhältnis ψ ausrechnen.

Beulwert kσ aus Tabelle Eurocode 4.1 berechnen.

Beulschlankheitsgrad nach Gleichung 4.3 ermitteln.

Abminderungsfaktor ρ Gleichung 4.2 errechnen.

Bruttobreiten bu und bo bestimmen.

wirksame Breiten mit bu1,eff= bu∙ρ berechnen

Da dies bereits in den vorherigen Rechenbeispielen vorgeführt wurde, wird dreimal derselbe Rechengang in einer Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 29 Zusammenfassung des Rechengangs für alle 3 Beulfelder

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Feld 1 | Feld 2 | Feld 3 |
| b | 0,148 | 0,146 | 0,098 |
| ψ | 0,625 | 0,4 | – 2 |
| kσ | 4,8954 | 5,6549 | 53,794 |
|  | 0,9638 | 0,8846 | 0,5861 |
| ρ | 0,8229 | 0,8915 | 1 |

Kontrolle:

(b1 + tsl/2) + (b2 + tsl) + (b3 + tls/2)= S

0,15 + 0,15 + 0,1= 0,4 OK

Tabelle 30 wirksame Breiten

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Feld 1 | Feld 2 | Feld 3 |
| bu | 0,06767 | 0,06348 | 0,03921 |
| bo | 0,08034 | 0,08252 | 0,05881 |
|  |  |  |  |
| bu eff | 0,05567 | 0,05659 | 0,03921 |
| bo,eff | 0,06611 | 0,07356 | 0,05881 |
| Σ beff | 0,12179 | 0,13015 | 0,09802 |
| verlust | 0,02621 | 0,01585 | 0 |

**Querschnittswerte der Steifen**

obere

Steife

beff3,u= 0,03921

tsl= 4mm

beff2o =0,07356

Fläche der Längssteife ohne mitwirkende Breiten

As= bsl∙tsl + hsl∙ tsl2 – tsl∙ tsl2

As= 30∙4 + 24∙3 – 4∙3

As= 180mm²

bu,eff3 + bo,eff2 + tsl= 73,56 + 39,21 + 4= 116,8

bu + bo + tsl= 82,52 + 39,21 + 4= 125,73

Asl= tw∙(b2o + b3u + tsl) + As

Asl= 3∙(82,52 + 39,21 + 4) + 180

Asl= 557,1mm²

Der Schwerpunkt xsl wird auf die Stegmitte bezogen.

xsl=

xsl=

xsl= 6,784mm

Isl= 3 Eigen + 3 Steiner

Isl=

Isl=

Isl= 70354mm4

Druckkraft Fs in der Steife

Fs= σsl2∙ Asl2 = 63,8∙ 557,1

Fs= 35,56kN

untere

Steife

beff2,u= 0,05659 bu2= 0,06348

tsl= 4mm

beff1o = 0,06612 bo1= 0,08034

As= 180mm²

bu,eff2 + bo,eff1 + tsl= 56,59 + 66,12 + 4= 126,71

bu + bo + tsl= 80,34 + 63,48 + 4= 147,82

Fläche mit wirksamen Breiten

Asl= tw∙(b1o + b2u + tsl) + As

Asl= 3∙147,82 + 180

Asl= 623,5mm²

Schwerpunkt xsl

xsl=

xsl=

xsl= 6,289mm

Isl= 3 Eigen + 3 Steiner

Isl=

Isl=

Isl= 73130mm4

Druckkraft Fs in der Steife

Fs= σsl1∙ Asl1 = 159,5∙ 623,5

Fs= 99,46kN

Querschnittswerte der zusammengeführten Steife.

Nach dem Eurocode sind 3 Fälle zu untersuchen. Die ersten beiden sind das einzelne Beulen und Knicken der Längssteifen und der dritte Fall ist das Beulen und Knicken beider Längssteifen gleichzeitig. Dabei wird eine Ersatzlängssteife geschaffen. Diese hat die Querschnittswerte der einzelnen Steifen zusammen und die Lage errechnet sich aus der Resultierenden der Kräfte der Steifen.

AL= Asl1 + Asl2 = 557,1 + 623,5

AL= 1180,6mm²

IL= Isl1 + Isl2 = 70354 + 73160

IL= 143514mm4

hwL=

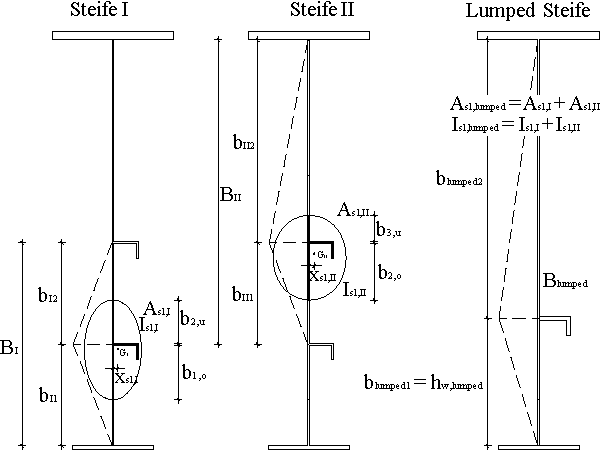
hwL= 0,15 +

hwL= 0,1895

Tabelle 31 Zusammenfassung der Steifenquerschnittswerte

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | untere | obere | lumped |
| Asl | 623,46 | 557,19 | 1180,7 |
| xsl | 6,0629 | 6,784 |  |
| Isl | 73130 | 70354 | 143484 |
| hw | 0,15 | 0,3 | 0,1895 |

**Berechnung der idealen Beulspannung**

Bei der Berechnung der idealen Beulspannung gibt es die 3 Fälle zu untersuchen. In den ersten beiden Fällen wird das Beulen der einzelnen Steife untersucht, wobei die andere als starr ange-nommen wird. Der dritte Fall wird mit der zusammengeführten Steife gerechnet. Dabei besteht das Teilfeld immer aus der Steife und den benachbarten Einzel- feldern.

Jetzt wird dreimal der gleiche Rechenweg durchlaufen.

Beulen der unteren Steife

b1= hw1= 0,15m

b2= hw2 – hw1= 0,15m

b= B1= b1 + b2= 0,3m

ac= 4,33∙

ac= 4,33∙

ac= 1,126m

ac < a=5m

a= Quersteifenabstand

σcr,sl= für ac > a Gleichung A.4

σcr,sl= für ac < a

σcr,sl=

σcr,sl= 3,536∙1014∙1,08∙10–6= 382∙106N/m²

σcr,sl= 382,6N/mm²

Die Beulspannung darf erhöht werden. Dabei wird die ideale Beulspannung auf den Ort der Steife bezogen.

σcr,p,1= =

σcr,p,1= 612,1N/mm²

Beulen der oberen Steife

b1= hw2 – hw1= 0,15m

b2= hw – hw2= 0,3m

b= B1= b1 + b2= 0,45m

ac= 4,33∙

ac= 4,33∙

ac= 1,4248m

ac < a=5m

σcr,sl= für ac < a Gleichung A.4

σcr,sl=

σcr,sl= 3,957∙1014∙0,65∙10–6= 257∙106N/m²

σcr,sl= 257,1N/mm²

σcr,p,2= =

σcr,p,2= 1028,3N/mm²

Beulen der gemeinsamen Steife

b1= hwL= 0,1895m

b2= hw – hwL= 0,4105m

b= B1= hw= 0,6m

ac= 4,33∙

ac= 4,33∙

ac= 2,083m

ac < a = 5m

σcr,sl= für ac < a Gleichung A.4

σcr,sl,lumped=

σcr,sl,lumped= 1,867∙1014∙0,619∙10–6= 115,7∙106N/m²

σcr,sl,lumped= 115,7N/mm²

σcr,p,lumped =

σcr,p,lumped =

σcr,p,lumped = 219,9N/mm²

Von den 3 idealen Beulspannungen ist die geringste maßgebend.

σcr,p= MIN(σcr,p,1 ;σcr,p,2 ;σcr,p,lumped)

σcr,p= MIN(612,1;1028,3;219,9)

σcr,p= 219,9N/mm²

Mit dieser Spannung kann der Beulnachweis für das Teilfeld geführt werden.

Ac= Asl1 + Asl2 = 623,46 + 557,19

Ac= 1180,7mm²

bu3,eff + bo2,eff + tsl= 56,6 + 66,1 + 4= 126,7

bu2,eff + bo1,eff + tsl= 73,6 + 39,2 + 4= 116,8

Ac,eff,loc= tw∙(bu3,eff + bo2,eff + tsl) + As + tw∙( bu2,eff + bo1,eff + tsl) + As

Ac,eff,loc= 3∙126,7 + 180 + 3∙116,8 + 180

Ac,eff,loc= 1090,4mm²

ßA,c=

ßA,c= 0,923

= =

= 1,2209

ψ = = – 0,5

ρ = Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.2

ρ =

ρ = 0,72679

Knickstabverhalten

Beim knickstabähnlichen Verhalten wird nur das Ausknicken der unteren Steife untersucht.

Asl1,eff= untere Steife mit wirksamen Breiten

Asl1,eff= tw∙(b1o,eff + b2u,eff + tsl) + As

Asl1,eff= 3∙(56,6 + 66,1 + 4) + 180

Asl1,eff= 560,1mm²

Asl1= untere Steife mit Bruttobreiten

Asl1= tw∙(b1o + b2u + tsl) + As

Asl1= 3∙(80,3 + 63,5 + 4) + 180

Asl1= 623,4mm²

ßA,c=

ßA,c= 0,898

Isl1= 7,313∙10–8m4

σcr,sl= = Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.9

σcr,sl= 9,72N/mm²

σcr,c= =

σcr,c= 15,56N/mm²

= = Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.11

= 4,52

Im Kommentar [7] zum Eurocode 1993-1-5 wird für e1 eine gigantische Formel (mit Tippfehlern) verwendet. Bildet man das Momentengleichgewicht um den Steg, so lässt sich eine einfache Formel erzeugen.

Definition der Abstände e1 und e2

**∙** e2= xsl= 6,06mm

e1 e2∙Asl= (e1 + e2)∙As

e1= =

e1= 14,94mm

e2 e= MAX(e1;e2)

**∙** e= 14,94mm

α= 0,49 für offene Querschnitte

i= =

i= 10,83mm

αe= α + 0,09e/i Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.12

αe= 0,49 + 0,09∙14,9/10,8

αe= 0,614

k= 0,5∙(1 + αe∙( – 0,2) + )

k= 0,5∙(1 + 0,614∙(4,52 – 0,2) + 4,52²)

k= 12,08

χc=

χc=

χc= 0,042963

Interaktion

ξ= und ξ wird zwischen 0 < ξ < 1 begrenzt

ξ=

ξ= 1

ρc = (ρ – χc)∙ ξ∙(2 – ξ) + χc Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.13

ρc = (0,72679 – 0,042963)∙1∙(2 – 1) + 0,042963

**ρc = 0,72679**

### Wirksame Querschnittswerte

Die wirksamen Querschnittswerte werden in einer Exceltabelle berechnet. So wird in Excel gerechnet:

Zuerst wird der Steg in viele Bereiche unterteilt: Ein Beulfeld unterteilt sich in 2 wirksame Breiten. In der Mitte des Beulfeldes ist ein Loch. Zwischen den Beulfeldern befindet sich die Steife. Das Beulfeld, das Zug enthält wird in einen Zug- und Druckbereich unterteilt (der Zugbereich ist 0 bei reinem Druck). Ist eine Steife nicht vorhanden, so werden die Steglängen des Beulfeldes auf 0 gesetzt.

Dann wird der Schwerpunktabstand der Flächen zum unteren Stegende berechnet.

Der Querschnitt besteht aus sehr vielen Rechtecken mit unterschiedlicher Dicke. Die Stegteile, die am Zugbereich oder Flansch anschließen haben die volle Stegdicke. Die Stegteile, die an einer Steife angrenzen haben eine mit ρc multiplizierte Stegdicke. Die Löcher haben eine Stegdicke

von 0.

Zu jedem Stegstück werden Fläche, Steineranteil, Eigenträgheitsanteil und A∙ Abstand berechnet, die in weiteren Formeln zu Querschnittswerte verarbeitet werden.

Damit lauten die Querschnittswerte

Aeff= 0,002324m²

hs,eff= 0,2616m

Ieff= 0,0001213m4

Widerstandsmoment unten Widerstandsmoment oben

Weff,u= = Weff,o= =

Weff,u= Weff,o=

Weff,u= 4,576∙10–4m³ Weff,o= 3,569∙10–4m³

MRd= Weff,u∙fyd MRd,o= Weff,o∙fyd

MRd= 4,576∙10–4∙355000 MRd,o= 3,569∙10–4∙355000

MRd= 162,4kNm MRd,o= 126,7kNm

Der verschobene Schwerpunkt erhöht das Moment.

MEd,N= – MEd + NEd∙(Hs – Hs,eff)

MEd,N= 80,23 + ( – 251,5)∙(0,2513 – 0,2616)

MEd,N= 82,83kNm

Nachweis

η1=

η1=

η1= 0,5099 + 0,3048

η1= 0,8147

Nachweis erfüllt

Nachweis oben

η1=

η1=

η1= 0,65376 + 0,30484

η1= 0,9586

Nachweis erfüllt

Nachweis, ob die Stegdicken weiter verringert werden müssen.

σcom,Ed=

σcom,Ed=

σcom,Ed= 184,4N/mm²

= <1 Eurocode 1993-1-5 Gleichung A.3

0,7147 < 1

Keine weitere Abminderung erforderlich

Die Nachweise sind zwar erfüllt, doch der Nachweis kann auch genauer geführt werden. Dazu errechnet man sich den Abstand, in dem der Nachweis geführt wird und führt bei der Quersteife den Querschnittsnachweis. Kann die Zugkraft nicht aufgenommen werden, so kann der Nachweis semiplastisch geführt werden.

Das Ergebnis würde so aussehen:

η1= 0,7512 statt 0,8147

und beim Querschnittsnachweis

η1u= 0,7252 Nachweis unten

η1o= 0,3621 Nachweis oben

Der semiplastische Nachweis kann nicht geführt werden, weil der Druckflansch zuerst plastifiziert.

### Schubbeulen

Beim Schubbeulen wirken andere Breiten mit.

beff= 15∙ε∙tw = 15∙0,8136∙3

beff= 36,61mm

Asl= (beff∙2 + tsl)∙tw + As

Asl= (36,61∙2 + 4)∙3 + 180

Asl= 411,7mm²

xsl=

xsl=

xsl= 9,182mm

Isl= 3 Eigen + 3 Steiner

Isl=

Isl=

Isl= 61181mm4

**Berechnung des Schubbeulwertes**

Es werden vom Einzelfeld und vom Gesamtfeld die Schlankheiten errechnet. Die kleinere ist maßgebend.

Gesamtfeld

kτsl= MAX( Formel 1; Formel 2)

Formel 1= 9∙ Isl:= 2∙Isl, weil es 2 Steifen gibt

Formel 1= 9∙

Formel 1= 0,5905

Formel 2=

Formel 2=

Formel 2= 4,12

kτsl= MAX(0,5905; 4,1203)

kτsl= 4,1203

kτ= 5,34 + 4∙ + kτsl Eurocode 1993-1-5 Gleichung A.5

kτ= 5,34 + 4∙ + 4,1203

kt= 9,518

Schubbeulschlankheit

= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 5.6

=

= 2,129

Einzelfeld

Feldhöhe = größtes Schubbeulfeld= 0,3m

kτ= 5,34 + 4∙

kτ= 5,34 + 4∙

kτ= 5,3544

Schubbeulschlankheit

= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 5.6

=

= 1,419

Einzelfeldbeulen ist nicht maßgebend.

= MIN(1,419;2,129)= 2,129

für > 0,82/η gilt:

χw= = Eurocode 1993-1-5 Tabelle 5.1

χw= 0,4842

Vb,w,Rd= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 5.2

Vb,w,Rd=

Vb,w,Rd= 178,6kN

Der Beitrag der Flansche wird vernachlässigt, weil die Flansche stark ausgelastet sind.

Vb,Rd= Vb,w,Rd = 178,6kN

Schubbeulnachweis

η3= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 5.10

η3= 0,3926 < 1

Nachweis erfüllt

### Lokales Beulen aus einer Einzellast

Der Träger muss die Einzellast von 9,3 aufnehmen können. Da dies ein langer Formelapparat ist, bei dem nichts neu ist und der schon einmal im zweiten Rechenbeispiel Kapitel VI durchgearbeitet wurde, wird die Berechnung übersprungen.

Die Längssteife trägt nicht mit.

Leff= 0,0524

FRd= fyd∙ Leff∙ tw Eurocode 1993-1-5 Gleichung 6.1

FRd= 355000∙0,0524∙0,003

FRd= 55,81kN

Nachweis

η2= = Eurocode 1993-1-5 Gleichung 6.14

η2= 0,16662

Nachweis erfüllt

### Interaktion

Zuerst muss das plastische Moment ausgerechnet werden. Die Steife trägt mit.

Die Skizze hat keinen relativen Maßstab und ist auf das wichtigste reduziert.

image40.wmf

Grafik 25 wichtige Maße zur Berechnung der plastischen Momententragfähigkeit

Flächenhalbierende

A= 213 + 1112 + 688 + 637 + 180 + 180

A= 3010mm²

A/2= 1505mm²

Die Flächenhalbierende liegt im Steg über der unteren Steife.

Die wirkende Normalkraft zehrt den Steg von der Flächenhalbierenden beginnend auf.

AN= = 7,085cm²

AN= 708,5mm²

AN/2= 352,2mm²

Diese Fläche zehrt den gesamten Steg zwischen den Steifen auf. Dann werden die Steifen geschwächt. Die Flächen der Steifen werden zur Vereinfachung in einem Punkt konzentriert.

Restflächen der Steifen

As,o= As + 70,

As,o= 180 + 212 –352,2

As,o= 37,8mm²

As,u= As + 79,

As,u= 180 + 238 – 352,2

As,u= 63,8mm²

W= =

W= 503473mm³

MPl,Rd= W∙fyd = 0,503473∙355

MPl,Rd= 178,7

Tragfähigkeit Mf,Rd der Flansche allein

Mf,Rd= MIN(A1;A2)∙ (hw + tf1/2 + tf2/2)∙fyd Eurocode 7.1.3

Mf,Rd= 213∙(600 + 1,5 + 3,5)∙355

Mf,Rd= 45,747kN

Da noch eine Normalkraft wirkt, muss Mf,Rd reduziert werden.

Faktor= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 5.9

Faktor= 1 –

Faktor= 0,1665

Mf,Rd:= Mf,Rd∙ Faktor

Mf,Rd= 45,747∙ 0,1665kN

Mf,Rd= 7,618kN

Der Interaktionsnachweis darf im Abstand x geführt werden. Die Höhe ist das größte Beulfeld.

x =

x= 0,15

MEd= MEd,N – x∙V + x²∙q/2

MEd= 82,83 – 0,15∙70,13 + 0,15²∙18/2

MEd= 72,51

VEd:= VEd – x∙q

VEd= 70,13 – 0,15∙18

VEd= 67,43kN

= 0,4057

= MIN(0,5;0,3788)

= 0,5

Nachweis

< 1 Eurocode 1993-1-5 Gleichung 7.1

0,4057 < 1

Nachweis erfüllt

Interaktion zwischen η1 und η2

0,35084 < 1

Nachweis erfüllt.

### Sonstige Nachweise

Für den Träger sind bestimmte Mindestanforderungen zu erfüllen. Die Mindestanforderungen sind in allen Rechenbeispielen eingehalten.

**Mindestanforderungen an die Längssteife**

Eine Längssteife muss mindestens so steif sein, dass sie nicht biegedrillknickt. Dies ist der Fall, wenn

Eurocode 1993-1-5 Gleichung 9.3

Dieser Nachweis wird auf das einheitliche Format umgeformt:

< 1

Torsionsträgheitsmoment It

It=

It=

It= 820mm4

Polares Trägheitsmoment Ip um den Anschlusspunkt der Steife an den Steg.

Iy=

Iy=

Iy= 36000 + 45 + 48735

Iy= 84780mm4

Iz=

Iz=

Iz= 160 + 2000 + 8640

Iz= 10800mm4

Ip= Iy + Iz

Ip= 84780 + 10800

Ip= 95580mm4

Die Formel für Iw ist höchstwahrscheinlich falsch. Sie ist aus dem Kommentar [7] zum Eurocode entnommen, im dem zwischen tsl und tsl2 nicht unterschieden wird.

Iw=

Iw= = 798∙16128

Iw= 12870144mm6= 1,287∙10–11m4

Nachweis

< 1 Eurocode 1993-1-5 Gleichung 9.3

Nachweis nicht erfüllt

Es kann auch ein genauerer Nachweis geführt werden. Der Eurocode fordert σcr > θ∙ fyd mit θ=6, gibt aber keine Formel für die Berechnung von σcr an. Der Kommentar [7] zum Eurocode 1993-1-5 enthält im letzten „worked Example“ den benötigten Formelapparat. Der Nachweis wird vereinheitlicht zu

< 1 Eurocode 1993-1-5 Gleichung 9.4

Drehfedersteifigkeit cθ

cθ =

mit b= Abstand zwischen den Steifen

cθ = 12600N

Dann errechnet man eine Länge Lcr, die kleiner sein muss, als der Quersteifenabstand, damit die Formel angewendet werden darf.

Lcr= π∙

Lcr= π∙

Lcr= 0,38m < a=5m

* Formel ist gültig

σcr=

σcr= =

σcr= 4554N/mm²

< 1

= 0,4677 <1

Nachweis erfüllt

**Mindestanforderungen an die Quersteifen**

Es sind keine Quersteifen vorhanden. Für Quersteifen muss ein Nachweis gegen Biegedrillknicken geführt werden und die Anforderungen nach Eurocode 9.2.1 müssen eingehalten werden. Im Mittelauflager soll eine beidseitige steife Quersteife eingebaut werden.

image41.wmf

An den Trägerenden müssen 2 Quersteifen als starre

Auflagersteife eingebaut werden. Die Fläche einer solchen

Quersteife muss mindestens sein:

A= Eurocode 1993-1-5 9.3.1.3

Dabei ist e der Steifenabstand. Er muss größer als ein

Zehntel der Steghöhe sein.

Bild 10

Sind die Quersteifen 10cm entfernt, 6mm dick und 36mm hoch, so ist der Nachweis erfüllt

6∙36=

216= 216 OK

**flansch induziertes Stegbeulen**

Dass der Flansch in den Steg einbeult, wird verhindert, wenn folgendes Kriterium eingehalten ist:

Eurocode 1993-1-5 Gleichung 8.1

mit

Aw= Stegfläche

Acf= effektive Querschnittsfläche des Druckflansches

k= 0,55 für elastische Bemessung

= 546,9

200 < 546,9

Flanschinduziertes Stegbeulen ist ausgeschlossen.

## Modell der wirksamen Spannungen nach der DIN 18800-3

### Geometrie

Es wird die gleiche Geometrie verwendet.

Für den Druckflansch muss ein b/t-Nachweis geführt werden.

Grenz b/t

6,286 < 12,9

Grenz b/t eingehalten

### Bruttoquerschnittswerte

Fläche A= 0,00265m²

Schwerpunkt hs= 0,251m

Spannungsnulllinie S= 0,4m

Flächenmoment zweiten Grades I= 0,0001258m4

Spannung oben σ2= 127,6 N/mm²

Spannung neben der oberen Steife σsl2= – 63,8 N/mm²

Spannung neben der unteren Steife σsl1= – 159,5 N/mm²

Spannung unten σ1= – 255,2 N/mm²

### Berechnung von κpx

Die Berechnung der wirksamen Breiten durch die Einzelfelder wird ähnlich geführt wie im Eurocode.

Dabei ist ρ= durch ρ= zu ersetzen.

Wirksame Breiten werden nicht benötigt, sondern nur die Abminderungsfaktoren. Diese werden in einer Tabelle zusammengefasst.

**für die DIN**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Feld 1 | Feld 2 | Feld 3 |
| b | 0,148 | 0,146 | 0,098 |
| ψ | 0,625 | 0,4 | – 2 |
| kσ | 4,8955 | 5,6549 | 53,794 |
|  | 0,9711 | 0,8913 | 0,5898 |
| ρ | 0,8088 | 0,8701 | 1 |

Die DIN hat keine Formeln zur Berechnung des Beulwertes und verweist auf die Literatur. Um den Beulwert des Gesamtfeldes zu berechnen, werden zuerst die wirksamen Breiten ausgerechnet und dann nach dem Eurocode verfahren. Dabei werden zuerst die Querschnittswerte der ersten Steife, der zweiten Steife und der zusammengeführten Steife berechnet. Dann wird die ideale Beulspannung aus den 3 Steifen errechnet und die kleinste ist maßgebend. Aus dieser wird dann der Beulwert rückgerechnet. Der Rechenweg wird übersprungen.

Alternative Literatur ist das Buch „Beulwerte ausgesteifer Rechteckplatten“ von Klöppel und Scheer. Aus diesem kann schnell ein genauerer und größerer Beulwert entnommen werden. Dazu werden die Steifenkennwerte benötigt. In I sind wirksame Breiten enthalten.

Steifenkennwerte

I= 7,025∙10–8m4

γ = DIN 18800-3 Element 114

γ =

γ = 47,35

δ = = mit As= 180mm² DIN 18800-3 Element 114

δ = 0,1

ψ= – 0,5

α=

„Zufällig“ gibt es dafür ein Diagramm in dem Buch. Leider ist α im Diagramm nicht enthalten. Daher wird der Mindestwert der Kurve verwendet.

image42.wmf

**γ= 47,3**

Diagramm 17 Beulwert

Ein Beulwert von kσ= 67 kann abgelesen werden. Der Eurocode schlägt für ac= 2,08 vor. ac ist diejenige Länge, die zwischen den beiden Formeln des Eurocodes unterscheidet. Dividiert man ac durch die Steghöhe, so ergibt sich 3,4. Dies ist genau der Minimumwert im Diagramm. Ändert man die Geometrie und Belastung, so findet der Eurocode den Ort des Minimums. Ganz anders sieht es mit dem Beulwert aus. Der Eurocode liefert nur kσ= 26,2.

Die ideale Beulspannung kann sofort berechnet werden.

kσ= 67

σe= 190000∙=190000∙ DIN 18800-3 Element 113

σe= 4,75N/mm²

σpi= kσ∙ σe= 67∙ 4,75 DIN 18800-3 Element 113

σpi= 318,25∙N/mm²

plattenartiges Verhalten

=

= 1,063

κp= MIN(1,25; 1,25 – 0,25∙ψ)∙ DIN 18800-3 Tabelle 1

κp= 1,25∙

κp= 0,93218

knickstabähnliches Verhalten

k= 0,5∙(1 + 0,34∙( – 0,2) + )

k= 0,5∙(1 + 0,34∙(1,063 – 0,2) + 1,063²)

k= 1,212

κk=

κk=

κk= 0,55729

Interaktion

= kσ∙α²∙ DIN 18800-3 Gleichung 23

= 67∙

= 105,9

Λ= + 0,5 und Λ wird zwischen 2< Λ <4 begrenzt Gleichung 22

Λ= 1,063² + 0,5

Λ= 2

ρ= und ρ wird zwischen 0 < ρ < 1 begrenzt Gleichung 21

ρ=

ρ= 0

κpx= (1 – ρ²)∙κp + ρ²∙κk  DIN 18800-3 Gleichung 24

κpx= (1 – 0²)∙0,93218 + 1²∙0,55729

κpx= 0,93218

### Nachweis

σd= 255,2N/mm²

σp,Rd= fyd∙MIN(κ1;κ2;κ3;κpx) DIN 18800-3 Gleichung 11

mit κ1 und κ2 als Abminderungsfaktoren für Einzelfeldbeulen

σp,Rd= 360/1,1∙MIN(0,8088;0,8701;1;0,93218)= 360∙0,8088/1,1

σp,Rd= 264,7

< 1 DIN 18800-3 Gleichung 9

0,9643 < 1

Nachweis erfüllt.

### Schubbeulen

Da die DIN keine Formel für einen Schubbeulwert mit Längssteifen enthält, wird die Formel aus dem Eurocode verwendet. Da auch der Rechenweg bis gleich ist, werden die Werte bis dahin übernommen.

kτ= 9,518

= Hergeleitete Formel

=

= 2,144

Die Berechnung der Schubschlankheit für das Einzelfeld ist mit dem Eurocode ähnlich. Der Wert wird übernommen.

= 1,4144

Einzelfeldbeulen ist maßgebend.

= MIN(2,144;1,4144)= 2,144

Für > 1,38 und Beulfeld mit Längssteifen gilt

κτ = = DIN 18800-3 Tabelle 1

κτ = 0,25232

Nachweis

τd=

τd= 38,96N/mm²

τP,Rd= DIN 18800-3 Gleichung 12

τP,Rd=

τP,Rd= 47,67N/mm²

DIN 18800-3 Gleichung 10

0,8173 < 1

Nachweis erfüllt

### Lokales Beulen aus einer Einzellast

F= 9,3kN

ss= 0,05m

c= ss + 2∙tf2= 0,05 + 2∙0,003

c= 0,056

α=

α= 8,33

ß=

ß= 0,0112

Aus der Tabelle kann entnommen werden:

Tabelle 32 Auszug aus

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ß↓ α→ | 8 | 10 |
| 0 | 0,25 | 0,2 |
| 0,1 | 0,4 | 0,35 |

z= zlo + (zro – zlo)∙ +

kσy= 0,25 + (0,2 – 0,25) ∙ +

kσy= 0,25 – 0,00833 + (0,15 + 0∙0,166)∙0,112

kσy= 0,2584666

σe= 4,75N/mm²

σy,pi= kσy∙σe∙a/c

σy,pi= 0,2584666∙4,75∙5/0,056

σy,pi= 109,61N/mm²

=

= 1,8122

κy= = DIN 18800-3 Tabelle 1

κy= 0,48482

σyki= 1,88·σe= 8,93N/mm²

Es wird laut DIN die Beulschlankheit y verwendet.

k= 0,5∙(1 + 0,34∙(y – 0,2) + )

k= 0,5∙(1 + 0,34∙(1,8122 – 0,2) + 1,8122²)

k= 2,416

κk=

κk=

κk= 0,24912

= 12,27

Λ= + 0,5 und 2< Λ <4 DIN 18800-3 Gleichung 22

Λ= 1,8122² + 0,5

Λ= 3,78

ρ= und 0 < ρ < 1 DIN 18800-3 Gleichung 21

ρ=

ρ= 0

κpx= (1 – ρ²)∙κp + ρ²∙κk  DIN 18800-3 Gleichung 24

κpx= (1 – 0²)∙0,48482 + 1²∙0,24912

κpx= 0,48482

σP,Rd= fyd∙ κpx = 360∙0,485/1,1

σP,Rd= 158,7

σy= F/(c∙tw)

σy= 9,3/(0,056∙0,003)

σy= 55,36N/mm²

Nachweis

= 0,3489

Nachweis erfüllt

### Interaktion

κx= 0,93218 Nachweis η1: 0,9643

κy= 0,48482 Nachweis η2: 0,3489

κτ= 0,25232 Nachweis η3: 0,8173

e1= 1 + κx4= 1 + 0,932184 DIN 18800-3 Gleichung 15

e1= 1,754

e2= 1 + κy4= 1 + 0,484824 DIN 18800-3 Gleichung 16

e2= 1,055

e3= 1 + κx∙ κy∙ κτ² = 1 + 0,93218∙0,48482∙0,25232² DIN 18800-3 Gleichung 17

e3= 1,029

V= (κx∙ κy)6= (0,93218∙0,48482)6 DIN 18800-3 Gleichung 18

V= 0,00852

< 1 Gleichung 14

0,96431,754 + 0,34891,055 + 0,81731,029 – 0,00852∙0,9643∙0,3489

2,077 > 1

Nachweis nicht erfüllt

Benutzt man die Gleichung aus dem Eurocode, so würde man auf ein günstigeres Ergebnis kommen:

< 1

= 1,78

### Sonstige Nachweise

**Mindestanforderungen an die Längssteife**

Die Mindestanforderung gegen Biegedrillknicken nach Gleichung 34 und 35 ist mit dem Eurocode identisch.

Nachweis

< 1 DIN 18800-3 Gleichung 34

Nachweis fast erfüllt

**Endquersteife**

Für Endquersteifen muss ein Nachweis geführt werden, wenn

V > Vpi = hw∙tw∙τpi DIN 18800-3 Gleichung 27

VPi= 600∙3∙45,2= 81360N

VPi= 81,36kN > V= 70,13

Nachweis nicht erforderlich

## Modell der wirksamen Spannungen nach dem Eurocode 1993-1-5

Aus dem Rechenbeispiel nach dem Eurocode mit dem Modell der wirksamen Breiten werden folgende Werte übernommen, da der Rechenweg gleich ist:

ρc= 0,72679 Plattenbeulen

χw= 0,48423 Schubbeulen

σd= σ1= 255,2N/mm²

τd=

τd= 38,96N/mm²

Spannungsnachweis

<1

< 1

0,9893 < 1

Nachweis erfüllt

Schubspannungsnachweis

<1 Eurocode 1993-1-5 Gleichung 5.10

= 0,3926 <1

Nachweis erfüllt

**Nachweis der Einzellast**

Bis σy,Pi nach dem Rechengang der DIN 18800-3 ist der Rechenweg gleich.

σy,pi= 109,6N/mm²

=

= 1,7996

ρ= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.2

ρ=

ρ= 0,48774

σyki= σe= 4,75N/mm²

=

= 8,6495

α= 0,21 für Einzelfelder

k= 0,5∙(1 + α∙( – 0,2) + )

k= 0,5∙(1 + 0,21∙(8,6495 – 0,2) + 8,6495²)

k= 38,79

χc=

χc=

χc= 0,01305

ξ=

ξ= und ξ wird zwischen 0 und 1 begrenzt

ξ= 1

ρc = (ρ – χc)∙ ξ∙(2 – ξ) + χc Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.13

ρc = (0,48774 – 0,01305)∙1∙(2 – 1) + 0,01305

ρc = 0,48774

σp,Rd= 0,48774∙355

σp,Rd= 173,1

σy= 55,36N/mm²

Nachweis

= 0,3197 < 1

Nachweis erfüllt

Aus allen 3 Auslastungen wird der Interaktionsnachweis geführt.

< 1² Gleichung 10.5

0,9892² + 0,3197² – 0,3162 + 0,3926² < 1²

0,9585 <1

Nachweis erfüllt

In diesen Nachweis geht die Einzellast günstig ein. Die Einzellast wirkt aber nicht neben dem Auflager, sondern in Feldmitte. Daher kann die günstig wirkende Einzellast nicht mit angesetzt werden.

< 1² Eurocode 1993-1-5 Gleichung 10.5

0,9892² + 0,3926² < 1²

1,0643 > 1

Nachweis nicht erfüllt

## Modell der wirksamen Breiten nach der DIN 18800-3

Der Rechengang ist nach der DIN mit dem Modell der wirksamen Spannungen bis κp der gleiche. Es werden folgende Werte übernommen:

Tabelle 33 wirksame Breiten der Beulfelder

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Feld 1 | Feld 2 | Feld 3 |
| bu | 0,0709 | 0,0674 | 0,0412 |
| bo | 0,0771 | 0,0786 | 0,0569 |
| bu,eff | 0,0574 | 0,0586 | 0,0412 |
| bo,eff | 0,0623 | 0,0684 | 0,0569 |
| Verlust | 0,0283 | 0,019 | 0 |

κp = 0,93218

τd= 38,96N/mm²

τP,Rd= 47,67N/mm²

Die Stegdicke wird zusätzlich reduziert, um den Einfluss der Querkraft zu berücksichtigen.

Faktor=

Faktor=

Faktor= 0,5762

Da der Faktor nicht 0 ist, trägt der Steg mit 57,5% seiner wirksamen Dicke mit.

große Tabelle 34 Alle Daten zur tabellarischen Berechnung der wirksamen Querschnittswerte

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Stegdaten | Stl | ort u | ort m | A∙Abstand | Eigen I | Steiner | Stegdicke | Teilfläche |
| oben Zug | 0,19998 | 0,6 | 0,50001 | 0,0001729 | 1,15E-06 | 2,4E-05 | 0,001729 | 0,00035 |
| oben Druck | 0,05685 | 0,40002 | 0,3716 | 3,652E-05 | 2,65E-08 | 1,79E-06 | 0,001729 | 9,8E-05 |
| Loch | 0 | 0,34317 | 0,34317 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| o Steife | 0,04117 | 0,34317 | 0,32259 | 2,14E-05 | 9,37E-09 | 4,92E-07 | 0,001611 | 6,6E-05 |
| Steife | 0,004 | 0,302 | 0,3 | 1,934E-06 | 8,59E-12 | 2,6E-08 | 0,001611 | 6,4E-06 |
| oben Druck | 0,0684 | 0,298 | 0,2638 | 2,908E-05 | 4,3E-08 | 8,23E-08 | 0,001611 | 0,00011 |
| Loch | 0,01896 | 0,2296 | 0,22012 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| o Steife | 0,05864 | 0,21064 | 0,18132 | 1,714E-05 | 2,71E-08 | 2,88E-07 | 0,001611 | 9,5E-05 |
| Steife | 0,004 | 0,152 | 0,15 | 9,669E-07 | 8,59E-12 | 4,82E-08 | 0,001611 | 6,4E-06 |
| oben Druck | 0,06232 | 0,148 | 0,11684 | 1,173E-05 | 3,25E-08 | 1,44E-06 | 0,001611 | 0,0001 |
| Loch | 0,0283 | 0,08568 | 0,07153 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| unten Druck | 0,05738 | 0,05738 | 0,02869 | 2,846E-06 | 2,72E-08 | 4,28E-06 | 0,001729 | 9,9E-05 |
|  | Stl= Stegteillänge | |  | 0,0002945 | 1,32E-06 | 3,25E-05 |  | 0,000927 |

In der Spalte Stegteillänge wird der Steg in Abschnitte unterteilt, die eine bestimmte Länge haben.

Der Ort u ist der Abstand vom unteren Stegende bis zum oberen Stegteilende.

Der Ort m ist der Abstand vom unteren Stegende bis zum Schwerpunkt des Stegteils. Er wird aus dem Ort u ermittelt.

Die Stegdicke des Stegteils berechnet sich folgendermaßen:

Wenn das Stegteil an einen Flansch oder Zugbereich angrenzt,

dann: Stegdicke∙ Faktor= 3∙0,5762= 1,729mm

sonst: Stegdicke∙ κp∙ Faktor= 3∙0,93217∙0,5762= 1,611mm

Die Zeile A∙ Abstand errechnet sich aus Stegdicke∙ Stegteillänge∙ Ort m. Die Summe der Spalte wird für den Schwerpunkt benötigt.

Für das Flächenträgheitsmoment werden die Summe der Eigenträgheiten und der Steineranteile benötigt.

Fläche

Aeff= bf1∙tf1 + bf2∙tf2 + ΣTeilfläche

Aeff= 71∙3 + 91∙7 + 927,6

Aeff= 1777,6mm²

Schwerpunkt

hs,eff ∙A= bf2∙tf2∙(hw + tf2) – bf1∙tf1²/2 + Σ(A∙Abstand)

hs,eff∙0,001777,6= 0,071∙0,003∙(0,6 + 0,003/2) – 0,091∙0,007²/2 + 0,0002945

hs,eff=

hs,eff= 0,2365m

Der Schwerpunkt wird vom unteren Stegende aus gemessen. Der Schwerpunkt ist nach unten gerutscht, obwohl unten Flächen abgezogen wurden. Dies liegt daran, dass der gesamte Steg abgemindert wurde. Das Moment aus dem fehlenden Steg ändert die Lage des Schwerpunktes nur wenig, aber die Fläche ist weniger geworden, sodass der dicke untere Flansch den Schwerpunkt stärker anzieht.

Flächenmoment zweiten Grades

Ieff=

Ieff= =

Ieff= 9,884∙10–5m4

Weff,u= =

Weff,u=

Weff,u= 4,119∙10–4m³

Weff,o= =

Weff,o=

Weff,o= 2,708∙10–4m³

Der verschobene Schwerpunkt muss berücksichtigt werden.

MEd,N= – MEd + NEd∙(Hs – Hs,eff)

MEd,N= 80,2 + ( – 251,5)∙(0,2513 – 0,236)

MEd,N= 76,51kNm

Nachweis

< 1

0,5676 + 0,4323

1 < 1

Nachweis erfüllt

Der Nachweis für lokales Beulen aus der Einzellast kann nicht erfüllt werden.

## Zusammenfassung

Der Zweifeldträger wurde so entworfen, dass er nach der DIN 18800-2 nach dem Modell der wirksamen Breiten ausgelastet ist. Außerdem wurde das Randspannungsverhältnis auf – 0,5 hingerechnet und für γ = 0,1 gesorgt. Dadurch konnte ein Diagramm angewendet werden, ohne doppelt interpolieren zu müssen. Der Beulwert aus der Literatur bringt einen großen Tragfähigkeitsbonus.

### Zusammenfassung der einzelnen Nachweise

Tabelle 35 wirksame Breiten der einzelnen Felder

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Feld | ρ Euro | Verlusthöhe | κp DIN | Verlusthöhe |
| unten | 0,8229 | 0,02621 | 0,80876 | 0,0283 |
| zwischen | 0,8915 | 0,01585 | 0,87014 | 0,01896 |
| oben | 1 | 0 | 1 | 0 |

Tabelle 36 Die Abminderungsfaktoren des dritten Rechenbeispiels

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Euro | DIN |  |
| ρc | 0,72679 | 0,93218 | Plattenbeulen |
| χw | 0,48423 | 0,25232 | Schubbelen |

Tabelle 37 Nachweise des dritten Rechenbeispiels

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | EuroB | DINS | EuroS | DINB |
| η1 | 0,7512 | 0,9643 | 0,9892 | 1 |
| η1u | 0,7252 | X | X | 0,7252 |
| η1o | 0,3621 | X | X | 0,3621 |
| η2 | 0,16662 | 0,3489 | 0,3197 | X |
| η3 | 0,3926 | 0,8173 | 0,3926 | 0,8173 |
| Interaktion | 0,4057 | 2,077 | 1,0643 |  |
| Interaktion 2 | 0,3508 | x | x | x |

Die Abkürzungen sind im zweiten Rechenbeispiel erklärt.

### Rechenaufwand

Tabelle 38 Anzahl der benötigten Seiten für jede Rechenmethode

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Abschnitt | EuroB | DINS | EuroS | DINB |
| 1 | II | II | II | II |
| 2 | I' | I' | I' | I' |
| 3 | IIIIIIIIIIII | IIIIIII | IIIIIIIIIIII | IIIIIII |
| 4 | III' | ' | ' | IIII |
| 5 | II' | II' | II' | III |
| 6 | II' | II' | II' | Fehlt |
| 7 | III' | ' | ' |  |
| 8 | III | I' | III | I' |
| Summe | 30,5 | 18 | 25 | 22 |

Der Eurocode benötigt auch in diesem Rechenbeispiel mehr Rechenaufwand. Der zusätzliche Aufwand stammt hauptsächlich aus der Berechnung von ρc. Die DIN ist bei der Berechnung dieses Abminderungsfaktors auf Literatur angewiesen. Steht das Buch „Beulwerte ausgesteifter Rechteck- platten“ [6] zur Verfügung, so lassen sich die 5 Seiten zur Ermittlung des Beulwertes einsparen. Dieser Beulwert ist zusätzlich präziser und größer. Weiterhin entsteht im Eurocode für den Inter- aktionsnachweis viel Rechenaufwand durch die Ermittlung des plastischen Momentes. Das Modell der wirksamen Breiten benötigt für die Normalspannungsnachweise zusätzlichen Aufwand, weil die Querschnittswerte von durchlöcherten Querschnitten berechnet werden müssen. Alle 4 Rechenmög- lichkeiten haben diesen Aufwand gemeinsam: Schnittgrößen, Flanschbeulen, Einzelfeldbeulen und Schubbeulen. Dadurch fallen die 12 zusätzlichen Seiten im Eurocode nicht so sehr ins Gewicht.

### Stahlverbrauch

Der Träger wurde nach der DIN 18800-2 (wirksame Breiten) berechnet.

Für die anderen 3 Rechenmodelle wird der Querschnitt verändert, sodass der Nachweis erfüllt ist. Biegedrillnicken und zusätzliches Eigengewicht werden ignoriert. Biegedrillknicken hat Einfluss auf den Stahlverbrauch.

Nach der DIN 18800-3 mit dem Modell der wirksamen Spannungen muss der Steg 1mm verdickt werden. Dabei gibt es nur noch im unteren Einzelfeld unter Normalspannung ein leichtes Beulen von ρ=0,99. Im Träger tritt fast nur Schubbeulen auf.

Nach dem Eurocode mit dem Modell der wirksamen Breiten lassen sich am Steg 1,1mm einsparen. Ein 1,9mm Steg ist zwar nicht baubar, aber zum Vergleichen ist der Wert zulässig. In der Praxis bedeutet dies, dass der zehntel Millimeter mit 10% Wahrscheinlichkeit über einen Millimeter Stahl entscheiden kann. Es wird kein Unterschied gemacht, ob nun 10% Stahl verbraucht werden oder 100% Stahl mit 10% Wahrscheinlichkeit.

Der Zugflansch wird ebenfalls auf 1,9mm verdünnt. Weiterhin kann man Stahl an den Steifen sparen und dadurch steigt die Tragfähigkeit?!?

Der Träger ist nach dem Eurocode mit dem Modell der wirksamen Spannungen leicht überlastet. Deshalb wird der Druckflansch um 1mm länger und dicker gemacht (8mm∙ 92mm).

Grafik1.emf Eurocode Eurocode DIN 18800-2 DIN 18800-3

Grafik1.emfGrafik1.emf wirksame Breiten wirksame Spannungen

Grafik1.emf

**194kg 278kg 269kg 323kg**

Grafik 26 Stahlverbrauch zum dritten Rechenbeispiel

### Vergleich zwischen Aufwand und Stahlverbrauch

Aufwandeinsparverhältnis E =

E(EuroB)= = 0,982

E(DINB)= = 0,982

E(EuroS)= = 0,836

E(DINS)= = 1

Der Eurocode nach dem Modell der wirksamen Spannungen ist bei diesem Rechenbeispiel die schlechteste Wahl. Die anderen Modelle haben das gleiche Aufwandeinsparverhältnis. Für die DIN bedeutet dies, dass man die Wahl hat zwischen viel Rechnen und Material sparen oder viel Material verbauen und Rechenaufwand sparen, wobei sich Aufwand und Ersparnis in der Waage halten. Beim Eurocode ist dies unverhältnismäßig. Der kleine zusätzliche Rechenaufwand nach dem Modell der wirksamen Breiten zu rechnen lohnt sich.

## Variation der Geometrie

### Mehr Tragfähigkeit durch dünnere Längssteifen

Reduziert man die Stegdicke von Längssteifen, so steigt nach dem Eurocode seltsamerweise die Tragfähigkeit.

Die Ursache dafür liegt in dieser Formel

σcr,sl= Eurocode 1993-1-5 Gleichung A.4

Diese Formel berechnet die ideale Beulspannung. Asl und Isl sind Fläche und Trägheitsmoment der Längssteifen mit den wirksamen Breiten. Die Fläche geht im Nenner ein, das Flächenträgheits- moment nur mit der Wurzel im Zähler.

Steigt die Dicke des Steifensteges, so steigern sich Fläche und Trägheitsmoment in etwa gleich. Da die Trägheit mit der Wurzel schwächer ist, als die Fläche im Nenner, dominiert die Fläche. Eine kleine Zahl im Nenner bedeutet ein großer Wert. Mathematisch lässt sich das so ausdrücken:

As ~ I

f(A)= a∙

f(A)= b∙ As wird gekürzt und die Konstanten zusammengefasst

f(A)= b∙

f(A)= ∞

Weiterhin wechselwirkt die Steifenfläche in dieser Gleichung

= mit ßA,c= Eurocode Gleichung 4.7 Beulen

mit ßA,c= Eurocode Gleichung 4.11 Knicken

Wichtig dabei ist der Faktor ß. Beim Beulen ist die zusammengeführte Steife maßgebend, während beim Knicken die untere verwendet wird. So unterscheiden sich auch die Flächen im Bruch. Die Fläche der zusammengeführten Steife ist etwa doppelt so groß. Kürzt man die 2, so lässt sich aus beiden Gleichungen eine machen.

ßA,c= =

Ac ≈ 2∙Asl und Ac,eff,loc ≈ 2∙Asl,eff

Setzt man in die Formel ein, so erhält man:

ßA,c=

Asl,eff ist immer kleiner als Asl, weil in Asl,eff wirksame Breiten enthalten sind. Sowohl in Asl und Asl,eff steckt die volle Steifenfläche As drin. Die zusätzlichen Breiten in der Fläche sind von der Steifenfläche unabhängig. Das bedeutet:

ßA,c= f(As)= mit a < b

ßA,c= f(As)= für

Diese Hyperbel ist monoton wachsend.

Je kleiner die Steifenfläche As wird, desto kleiner wird ßA,c.

Eine reduzierte Steifenfläche wirkt sich also zweimal steigernd auf die ideale Beulspannung aus.

Eine kleinere Steifenfläche erhöht die ideale Beulspannung.

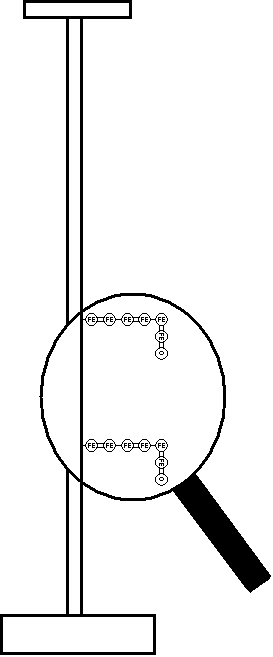
Eine kleinere Steifenfläche und größere ideale Beulspannung reduzieren die Schlankheit.

Eine reduzierte Schlankheit erhöht den Abminderungsfaktor.

Ein großer Abminderungsfaktor bringt mehr Tragfähigkeit.

Eigentlich müsste die Tragfähigkeit sinken, wenn das Beulfeld weniger ausgesteift wird.

### Beulfeld mit mikroskopischen Steifen

Untersucht wird ein Beulfeld mit kleinen Längssteifchen. Die Steifchen haben diese Maße:

Steifensteglänge bsl= 30Å

Steifenflanschlänge hsl= 24Å

Steifenstegdicke tsl= 4Å

Steifenflanschdicke tsl2= 3Å

Nach dem Eurocode werden zuerst wirksame Breiten errechnet und dann eine wirksame Dicke. Logisch ist, dass eine Dicke von 0 herauskommen muss. Stattdessen kommt ein viel größerer Wert raus.

Bild 11 winzige Steifchen

Die Ursache liegt wieder in dieser Formel:

σcr,sl= Eurocode Gleichung A.4

In Asl und Isl stecken nur die wirksamen Breiten. Das bedeutet, dass sich diese Querschnitte aus einem Rechteck zusammensetzen.

Asl= t∙bb mit bb= tsl + bo1 + bu2 Bruttobreiten

Isl= t³∙bb/12

Isl=

Setzt man Isl in die Gleichung A.4 ein so entsteht:

σcr,sl=

Man kann die Wurzel ziehen und Asl kürzen:

σcr,sl=

σcr,p= σcr,sl

Damit ist eine Gleichung entstanden, die unabhängig von den Steifen ist.

Setzt man in die Gleichung ein

σcr,sl= 1,05∙210∙109∙

σcr,sl= 2,205∙1011∙

σcr,sl= 10,95N/mm²

σcr,p,lumped =

σcr,p,lumped =

σcr,p,lumped = 20,67N/mm²

Rechnet man damit weiter:

Ac = 814,3mm²

Ac,eff,loc = 712,3mm²

ßpA,c = 0,8747

= 3,87

ρ = 0,24883

Zusammenfassend bedeutet das, dass Breiten mittragen, obwohl keine richtigen Längssteifen vorhanden sind.

Für den Fall in diesem Rechenbeispiel tragen 25% der Breiten mit. Dennoch ist die Tragfähigkeit geringer, als wenn keine Längssteifen vorhanden sind. Dies liegt daran, dass für keine Längssteifen eine andere Formel verwendet wird.

### Auswirkung der Längssteifengröße auf die Tragfähigkeit

Es wird der Abminderungsfaktor ρc in Abhängigkeit von der Größe der Längssteife untersucht. Dabei sind alle untersuchten Steifen geometrisch ähnlich. Die Steifen haben diese Maße:

Steifensteglänge bsl= 30mm ∙ x

Steifenflanschlänge hsl= 24mm ∙ x

Steifenstegdicke tsl= 4mm ∙ x

Steifenflanschdicke tsl2= 3mm ∙ x

Die Maße im Rechenbeispiel sind für x=1.

Der Abminderungsfaktor wird in Abhängigkeit von x aufgetragen.

Diagramm 18 Einfluss der Steifengröße auf dem Abminderungsfaktor

Bei x=3,3 wird im Eurocode knickstabähnliches Verhalten aktiv und in der DIN beginnt es bei x=3,7. Dadurch sinkt die Tragfähigkeit je größer die Steifen werden. Erst bei Steifen mit unsinnigen Maßen beginnt der Abminderungsfaktor wieder zu steigen. Nach beiden Normen gibt es bei übermäßig riesigen Steifen kein reines Knicken. Es ist in beiden Wichtungsfaktoren noch ein Restbeulen vorhanden (bei x=60 verschwindet es in der DIN).

### Variation der Belastung

Die Einzellast wird entfernt. Der Träger steht unter Normalkraft oder Streckenlast. Untersucht wird, wie viel Streckenlast er unter einer bestimmten Normalkraft tragen kann. Die Geometrie ändert sich nicht und die Steifen bleiben an Ort und Stelle. Das Stützmoment kann nicht verwendet werden, weil der Eurocode bestimmte Abminderungen erlaubt.

Tabelle 39 Maximale Momententragfähigkeit in Abhängigkeit von der Normalkraft nach allen Rechenmodellen

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | EuroB |  | DINS |  | EuroS |  | DINB |  |
| N in kN | q in kN/m | Nachweis | q | Nachweis | q | Nachweis | q | Nachweis |
| 100 | 37,6 | I | 18,1 | I | 32 | I | 22,2 | 3 |
| 50 | 38 | I S | 17,1 | I | 30,4 | I | 22,2 | 3 |
| 0 | 38,2 | S I | 16,1 | I | 28,8 | I | 22,2 | 3 |
| -50 | 37,6 | S I | 15 | I | 27,1 | I | 22,2 | 3 |
| -100 | 36,4 | S u | 13,9 | I | 25,4 | I | 22 | 1 3 |
| -150 | 34,7 | u S | 12,7 | I | 22,5 | I | 21 | 1 3 |
| -200 | 32,5 | u S | 11,6 | I | 19,8 | I | 19,9 | 1 |
| -250 | 30,3 | u S 1 | 4,8 | I 1 | 16,6 | I | 18,6 | 1 |
| -300 | 27,6 | 1 u S | 2,3 | I 1 | 13,3 | I 1 | 17,1 | 1 |
| -350 | 24,3 | 1 u S |  |  | 2,9 | I 1 | 15,4 | 1 |
| -400 | 20,6 | 1 S |  |  |  |  | 13,7 | 1 |
| -450 | 16,6 | 1 |  |  |  |  | 11,8 | 1 |
| -500 | 12,7 | 1 |  |  |  |  | 9,7 | 1 |
| -550 | 8,9 | 1 |  |  |  |  | 7,4 | 1 |
| -600 | 4,9 | 1 #wert |  |  |  |  | 4,9 | 1 |
| -650 | 0 | 1 #wert |  |  |  |  | 0 | 1 |

Die Abkürzungen haben folgende Bedeutungen:

EuroB = Eurocode 1993-1-5 Kapitel 4-7 Modell der wirksamen Breiten

DINS= DIN 18800-3 Modell der wirksamen Spannungen

EuroS= Eurocode 1993-1-5 Kapitel 10 Modell der wirksamen Spannungen

DINB= DIN 18800-2 Modell der wirksamen Breiten

In der Spalte „Nachweis“ sind die maßgebenden Nachweise angegeben. Ein Nachweis ist maßgebend, wenn er größer als 0,95 ist. Die Abkürzungen haben dabei folgende Bedeutung:

1: Nachweis η1 ist maßgebend.

3: Nachweis η3 ist maßgebend.

I: Der Interaktionsnachweis ist maßgebend.

S: Der semiplastische Querschnittsnachweis ist maßgebend.

u: Der untere Querschnittsnachweis ist maßgebend.

#wert: Einige Nachweise enthalten unsinnige Werte

Im Modell der wirksamen Spannungen kann nur der Interaktionsnachweis maßgebend werden. In der DIN nach dem Modell der wirksamen Spannungen sind nur die Nachweise η1 und η3 maßgebend. Der Nachweis der oberen Randspannung wird nicht maßgebend, weil vorher die Schubtragfähigkeit erreicht wird. Im Eurocode können alle Nachweise maßgebend werden.

Diagramm 19 Aufnehmbare Streckenlast in Abhängigkeit von der Normalkraft für 2 Längssteifen

Im Diagramm ist aufgetragen, wie groß die Streckenlast bei einer bestimmten Normalkraft sein darf, bei der noch alle Nachweise erfüllt sind.

Nach dem Eurocode können große Streckenlasten aufgenommen werden, während beim Modell der wirksamen Breiten große Normalkräfte aufgenommen werden können.

# viertes Rechenbeispiel: Kastenstütze mit Druck und Biegung

Das Neue in diesem Rechenbeispiel gegenüber den anderen Beispielen ist, dass zusätzlich ein Knicknachweis geführt wird.

## Modell der wirksamen Breiten nach dem Eurocode 1993-1-5

### Geometrie

Eine Einfeldkastenträgerstütze aus S355 wird mit 3kN/m und -431kN belastet. Der Kastenträger ist unausgesteift. Die Skizze hat einen irrationalen Maßstab und die Dicken sind zehnfach überhöht.

Tabelle 40 Maße des Querschnitts

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| oberer Flansch | bf2 | 0,29 | tf2 | 0,003 |
| unterer Flansch | bf1 | 0,29 | tf1 | image44.wmf0,003 |
| Steg | hw | 0,39 | tw | image45.wmf0,003 |

Schnittgrößen

M= q∙L²/8

M= 3∙7²/8

M= 18,375kNm

N= – 433,1kN

V= q∙L/2

V= 3∙7/2= 10,5kN

ε= = 0,8136

Grafik 27 Stütze mit Maßen, Last und Abmessungen

**Schubverzerrung**

b0= 0,29/2= 0,1,45

Le= L1

Le= 7m

K=

K= 0,0207 ≈ 0,02

ß= f(k) Eurocode 1993-1-5 Tabelle 3.1

ß=

ß= 0,998

effektive Querschnittsfläche

Aeff= MAX (Ac,eff ∙ ßk; Ac,eff ∙ ß)

ßk ist maßgebend, da k < 1

ßk= 0,9980,0207

ßk= 0,99994 ≈ 1

Schubverzerrung wird vernachlässigt

**Grenz c/t**

Eurocode 1993-1-1 Tabelle 5.2

90, 42∙ε

Beulnachweis erforderlich

kσ= 4

= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.3

=

= 1,959

ρ= = Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.2

ρ= 0,45303

Für den Biegeknicknachweis werden die Querschnittswerte des vollständigen Trägers verwendet. Für die Beulnachweise wird mit geschwächten Flanschen gerechnet. Daher müssen diese Werte jetzt berechnet werden, bevor die Flanschlänge überschrieben wird.

As= bf2∙tf2 + 2∙hw∙tw + bf1∙tf1

As= 290∙3 + 390∙3∙2 + 290∙3

As= 4080mm²

Der Schwerpunkt liegt wegen Doppelsymmetrie in der Mitte.

hs = hw/2= 195mm

Flächenträgheitsmoment Iy

Iy=

Iy=

Iy= 10–5∙(2,966+ 6,718 + 0)

Iy= 9,684∙10-5m4

Flächenträgheitsmoment Iz

Iz=

Iz=

Iz= 10–5∙(1,22+ 4,62)

Iz= 5,839∙10-5m4

Jetzt kann die Flanschbreite überschrieben werden.

bf:= ρ·(bf –6·tw)+6·tw

bf:= 0,45303∙(0,29-6·0,003)+6·0,003

bf:= 0,1412

Vereinfachend wird mit der kürzeren Länge beider Flansche weiter gerechnet. Für den unteren Flansch darf eine größere Breite angesetzt werden, in dem in Abhängigkeit der vorhandenen Spannung reduziert wird. Doch dies erfordert eine iterative Berechnung.

### Bruttoquerschnittswerte

As= bf2∙tf2 + 2∙hw∙tw + bf1∙tf1

As= 141,2∙3 + 2∙390∙3 + 141,2∙3

As= 3187mm²

Der Schwerpunkt hs wird vom oberen Stegende aus nach unten gemessen.

hs =

hs =

hs =

hs =195mm

Das Flächenträgheitsmoment I besteht aus 3 Steineranteilen und 3 Eigenanteilen

I=

I=

I= 10–5∙(2,966+ 1,636 + 1,636 + 0)

I= 6,238∙10-5m4

Spannung σ2 im oberen Stegende

σ2=

σ2=

σ2= –57,44 – 135,88

σ2= –193,32N/mm²

Spannung σ1 im unteren Stegende

σ1= 57,44 – 135,88

σ1= – 78,44N/mm²

Spannungsnulllinie S

S=

S=

S= 0,656m

Die Spannungsnulllinie liegt außerhalb des Trägers

### Berechnung von ρc

b= 0,39m

Randspannungsverhältnis ψ

ψ= =

ψ= 0,406

Beulwert kσ

kσ= Eurocode 1993-1-5 Tabelle 4.1

kσ= 5,633

Beulschlankheitsgrad

= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.3

=

= 2,367

Abminderungsfaktor ρ

ρ = Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.2

ρ = (2,367 – 0,055∙(3 + 0,406))/2,367²

ρ = 0,38895

Bruttobreiten

bu= = Eurocode 1993-1-5 Bild A.1

bu= 0,1697

bo= b – bu = 0,39 – 0,17

bo= 0,2202

wirksame Breiten

bu1,eff= bu∙ρ = 0,1697∙0,38895

bu1,eff= 0,06603

bo1,eff= bo∙ρ = 0,2202∙0,38895

bo1,eff = 0,08558

Σbeff = 0,06603 + 0,08565

Σbeff = 0,1517

Verlust= b – Σbeff

Verlust= 0,39 – 0,1517

Verlust= 0,2383m

Knickstabähnliches Verhalten ist ausgeschlossen, weil das Beulfeld wesentlich länger ist als es hoch ist.

Abminderungsfaktor ρc für Plattenbeulen

ρc= 0,38895

### Wirksame Querschnittswerte

Die Berechnung der wirksamen Querschnittswerte wird übersprungen.

Aeff= 0,001757m²

heff= 0,20298

Iy,eff= 5,536∙10-5 m4

Iz,eff=

Iz,eff=

Iz,eff= 10–5∙(5,839 – 0,1647 – 2,822)

Iz,eff= 2,851∙10-5m4

Widerstandsmoment oben Widerstandsmoment unten

Weff,o= = Weff,u= =

Weff,o= Weff,u=

Weff,o= 2,704∙10–4m³ Weff,u= 2,934∙10– 4m³

MRd= Weff,o∙fyd MRd,u= Weff,u∙fyd

MRd= 2,704∙10–4∙355000 MRd,u= 2,934∙10– 4∙355000

MRd= 96,1kNm MRd,u= 104,3kNm

Der verschobene Schwerpunkt erhöht das Moment.

MEd,N= MEd + NEd∙(Hs,eff – Hs)

MEd,N= 18,375 + ( – 433)∙(0,195 – 0,203)= 18,375+ 3,464

MEd,N= 21,83kNm

Nachweis

η1= Eurocode 1993-1-5 Gleichung 4.14

η1=

η1= 0,228 + 0,694

η1= 0,9213

Nachweis erfüllt

Querschnittsnachweis unten

η1u=

η1u=

η1u= – 0,209 + 0,694

η1u= 0,484

Nachweis erfüllt

### Biegeknicknachweis

Tabelle 41 Querschnittswerte Eurocode

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Werte | Nettowerte |
| A | 0,00408 | 0,0017575 |
| Iy | 9,685E-05 | 5,536E-05 |
| Iz | 5,839E-05 | 2,852E-05 |

Es werden die Werte des ungeschwächten Querschnitts und die Fläche des effektiven Querschnittes benötigt.

Nachweisformat

< 1 Eurocode 1993-1-1 Gleichung 6.46

Nb,Rd= χ∙Aeff∙fyd/γM1 Eurocode 1993-1-1 Gleichung 6.48

Um mit der DIN vergleichen zu können, werden diese beiden Gleichungen zu einem einheitlichen Nachweis verschmolzen.

Biegeknicknachweis

< 1

**Nachweis gegen Biegeknicken um die schwache Achse**

Ncr=

wobei Ncr und Iy nach Eurocode 1993-1-1 Gl. 6.49 mit Bruttoquerschnittsgrößen berechnet werden.

Ncr=

Ncr= 2,469MN

Eurocode 1993-1-1 Gleichung 6.51

= 0,503

α= 0,34 für geschweiße Kastenquerschnitte Eurocode 1993-1-1 Tabelle 6.2

Φ= 0,5∙(1+α∙()

Φ= 0,5∙(1+ 0,34∙(0,503-0,2)+0,503²)

Φ= 0,678

χ= Eurocode 1993-1-1 Gleichung 6.49

χ=

χ= 0,88306

Nachweis

< 1 Eurocode 1993-1-1 Gleichung 6.46

0,7861 < 1

Nachweis erfüllt

**Nachweis gegen Biegeknicken um die starke Achse**

Ncr=

wobei Ncr und Iy nach Eurocode 1993-1-1 Gl. 6.49 mit Bruttoquerschnittsgrößen berechnet werden.

Ncr=

Ncr= 4,097MN

Eurocode 1993-1-1 Gleichung 6.51

= 0,3903

Φ= 0,5∙(1+α∙(²)

Φ= 0,5∙(1+0,34∙(0,39-0,2) + 0,39²)

Φ= 0,608

χ= Eurocode 1993-1-1 Gleichung 6.49

χ=

χ= 0,92992

Nachweis

< 1 Eurocode 1993-1-1 Gleichung 6.46

0,7463 < 1

Nachweis erfüllt

**Biegung mit Normalkraft**

cmy= 0,95 für ψ=0 (ψ ≠ Randspannungsverhältnis) und αn=0 mit ψ und αn nach Tabelle B.3

kyy= cmy∙(1 + 0,6∙MIN(1;)∙ Eurocode 1993-1-1 Tabelle B.1

kyy= 0,95∙(1+0,6∙0,39∙0,7463)

kyy= 1,116

My,Rk= Weff∙ fyd Eurocode 1993-1-1 Tabelle 6.7

My,Rk= 96,11kN

Nachweis

+ kyy∙< 1 Eurocode 1993-1-1 Gleichung 6.61

0,7463+ 1,116∙

0,7463+ 0,2536

1 < 1

Nachweis erfüllt

### Schubbeulen und Interaktion

Der Schubnachweis ist erfüllt, wird aber nicht gezeigt. Bei Einfeldträgern leisten die Flansche einen Beitrag zur Schubtragfähigkeit, aber laut Eurocode 1993-1-5 Kapitel 7.1.5 ist für Kastenträger Mf,Rd=0. Damit können Kastenträger keinen Beitrag zur Schubtragfähigkeit leisen.

Der Interaktionsnachweis wird nicht geführt, weil Schub und Biegung an unterschiedlichen Stellen sind.

## Modell der wirksamen Spannungen nach dem Eurocode 1993-1-5

Bei dem Spannungsnachweis fließen die Abminderungsfaktoren für Beulen und Knicken ein.

ρc= 0,38895

χ= 0,92992

Spannungsnachweis

<1

< 1

1,505 1

Nachweis nicht erfüllt

## Modell der wirksamen Breiten nach der DIN 18800-2

### Geometrie

Belastung und Geometrie sind gleich.

Hilfsgröße ε

ε =

ε = 0,8165

**Grenz c/t**

DIN 18800-1 Tabelle 12

90, 37,8∙ε

Beulnachweis erforderlich

kσ= 4 DIN 18800-1 Tabelle 12

= hergeleitete Gleichung 1

=

= 1,974

κ = =

κ = 0,45006

Einschub Querschnittswerte:

As= 4080mm²

hs = hw/2= 195mm

Iy= 9,685∙10-5m4

Iz= 5,839∙10-5m4

wirksame Flanschbreite

bf:= κ·(bf –6·tw)+6·tw

bf:= 0,45006·(0,29-6·0,003)+6·0,003

bf:= 0,1404

Vereinfachend wird mit der kürzeren Länge beider Flansche weiter gerechnet.

### Bruttoquerschnittswerte

Die Formeln zur Berechnung der Querschnittswerte sind mit der Berechnung nach dem Eurocode gleich.

As= 3182,5mm²

hs =195mm

I= 6,219∙10-5m4

σ2= –193,6N/mm²

σ1= – 78,4N/mm²

### Berechnung von κpx

b= 0,39m

Randspannungsverhältnis ψ

ψ= =

ψ= 0,405

Beulwert kσ

kσ=

kσ= 5,635

Beulschlankheitsgrad

= Hergeleitete Gleichung

=

= 2,385

Abminderungsfaktor ρ

κP= DIN 18800-2 GL 81 Tabelle 27

κP=

κP= 0,3794

Bruttobreiten

k1= – 0,04∙ψ² + 0,12∙ψ + 0,42 (oben) DIN 18800-2 Tabelle 27

k1= – 0,04∙0,405² + 0,12∙0,405 + 0,42

k1= 0,462

k2= + 0,04∙ψ² – 0,12∙ψ + 0,58 (unten)

k2= + 0,04∙0,405² – 0,12∙0,405 + 0,58

k2= 0,538

b12= b∙k12

bo= 0,39∙k1= 0,39∙0,462

bo= 0,1802

bu= 0,39∙k2= 0,39∙0,538

bu= 0,2098

wirksame Breiten

bu1,eff= bu∙ρ = 0,1802∙0,3794

bu1,eff= 0,0684

bo1,eff= bo∙ρ = 0,2098∙0,3794

bo1,eff = 0,0796

Σbeff = 0,0684 + 0,0796

Σbeff = 0,1479

Verlust= b – Σbeff

Verlust= 0,39 – 0,1479

Verlust= 0,2421m

Knickstabähnliches Verhalten ist ausgeschlossen, weil das Beulfeld wesentlich länger ist als es hoch ist.

Abminderungsfaktor κpx für Plattenbeulen

κpx= 0,3794

### Wirksame Querschnittswerte

Die Berechnung der wirksamen Querschnittswerte wird übersprungen.

Aeff= 0,0017291m²

heff= 0,1997

Iy,eff= 5,499∙10-5 m4

Iz,eff=

Iz,eff=

Iz,eff= 10–5∙(5,839 – 0,1687 – 2,868)

Iz,eff= 2,805∙10-5m4

Widerstandsmoment oben Widerstandsmoment unten

Weff,o= = Weff,u= =

Weff,o= Weff,u=

Weff,o= 2,733∙10–4m³ Weff,u= 2,867∙10– 4m³

MRd= Weff,o∙fyd MRd,u= Weff,u∙fyd

MRd= 2,733∙10–4∙360000/1,1 MRd,u= 2,867∙10– 4∙360000/1,1

MRd= 89,43kNm MRd,u= 93,83kNm

Der verschobene Schwerpunkt erhöht das Moment.

MEd,N= MEd + NEd∙(Hs,eff – Hs)

MEd,N= 18,375 + ( – 433,1)∙(0,195 – 0,1997)= 18,375+ 2,039

MEd,N= 20,41kNm

Nachweis

η1=

η1=

η1= 0,2282 + 0,7654

η1= 0,9936

Nachweis erfüllt

Querschnittsnachweis unten

η1u=

η1u=

η1u= – 0,2176 + 0,6958

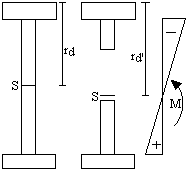
η1u= 0,4782

Nachweis erfüllt

### Biegeknicknachweis

Tabelle 42 Querschnittswerte DIN

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Brutto | Nettowerte |
| A | 0,00408 | 0,0017291 |
| Iy | 9,685E-05 | 5,499E-05 |
| Iz | 5,839E-05 | 2,805E-05 |

**Nachweis gegen Biegeknicken um die schwache Achse**

'= bezieht sich auf dem wirksamen Querschnitt

rd und r= Abstand des Biegedruckrandes vom Schwerpunkt

rd = 0,145

r= 0,145

i'= = DIN 18800-2 Gleichung 94

i'= 0,1274m

i= =

i= 0,1196m

λa= π∙= π∙

λa= 75,87

= DIN 18800-2 Gleichung 93

= 0,724

α'= α∙ mit α=0,34 DIN 18800-2 Gleichung 92

α'= 0,34∙

α'= 0,319

Δwo= |hs-heff|

Δwo= 0,195-0,195

Δwo= 0

k'= 0,5∙(1+α'∙(-0,2)+ +Δw0∙/i² DIN 18800-2 Gleichung 91

k'= 0,5∙(1+0,319∙(0,724-0,2)+ 0,724²+ 0)

k'= 0,846

κ' = DIN 18800-2 Gleichung 90

κ' =

κ' = 0,7793

Nachweis

η= <1 DIN 18800-2 Gleichung 89 und 3

η=

η= 0,9821

**Nachweis gegen Biegeknicken um die starke Achse**

rd = hs+tf= 0,195+ 0,003

rd = 0,198

r= hs,eff+ tf= 0,1997+ 0,003

r= 0,2027

i'= = DIN 18800-2 Gleichung 94

i'= 0,1783m

i= =

i= 0,1541m

λa= π∙ = π∙

λa= 75,87

DIN 18800-2 Gleichung 93

= 0,517

α'= α∙ mit α=0,34 DIN 18800-2 Gleichung 92

α'= 0,34∙

α'= 0,3007

Δwo= |hs-heff| = 0,1997-0,195

Δwo= 0,00471

k'= 0,5∙(1+α'∙(-0,2)+ +Δw0∙/i² DIN 18800-2 Gleichung 91

k'= 0,5∙(1+0,3∙(0,517-0,2)+ 0,517²+ 0,00471∙0,2027/0,1541²)

k'= 0,702

κ' = DIN 18800-2 Gleichung 90

κ' =

κ' = 0,8506

Nachweis für die Normalkraft

η= <1 DIN 18800-2 Gleichung 89 und 3

η=

η= 0,8998

Nach DIN 18800-2 Element 719 sind in dem Biegeknicknachweis folgende Größen aus zu wechseln:

Npl,d → N'Pl,d

Mpl,d → M'pl,d

κ → κ'

→

NPl,d= A'∙fyd DIN 18800-2 Gleichung 96

MPl,d= I'∙fyd/ DIN 18800-2 Gleichung 97

**Berechnung des plastischen Momentes**

image47.wmfBei doppelsymmetrischen Querschnitten, die durch ein positives Moment verbeult werden, liegt die Flächenhalbierende immer unter dem Loch. Für Stegteile, die an der Flächenhalbierenden angren- zen, ist Abstand zur Flächenhalbierenden halb so groß wie die Länge des Stegteils.

Die Ergebnisse werden in einer Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 43 Querschnittsdaten zur Berechnung des plastischen Momentes

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Stegteile | Länge | Abstand | Breite |
| o Flansch | 0,003 | 0,318 | 0,14 |
| oben | 0,0684 | 0,282 | 0,006 |
| unterm Loch | 0,0056 | 0,0028 | 0,006 |
| unter | 0,074 | 0,037 | 0,006 |
| u Flansch | 0,003 | 0,0755 | 0,14 |

WPl=

WPl= 2,977∙10-4m³

Grafik 28 wirksame Querschnittsteile

MPl= WPl∙fyd= 2,977∙10-4∙360/1,1

MPl= 0,097MN

MPl= 97,42kN

Nachweis

Δn = η∙(1-η)∙ κ²∙

Δn = 0,8998∙(1-0,8998) ∙0,8506²∙0,517²

Δn = 0,01746

< 1 DIN 18800-2 Gleichung 24

+0,01746

0,8998+ 0,2096+ 0,01746

1,127 1

Nachweis nicht erfüllt

### Schubbeulen und Interaktion

Für Schubbeulen wird der schnelle Nachweis verwendet

V= 10,5kN

kτ= 5,34 für lange Felder

< 1 Hergeleitete Formel 5

0,0526 < 1

Neben dem Beulnachweis ist noch der reguläre Querkraftnachweis zu führen.

0,0237 < 1

Nachweis erfüllt

Die Interaktion mindert die Stegdicken ein weiteres Mal ab. Da aber Schub und Biegung an verschiedenen Stellen auftreten, muss die Interaktion nicht geführt werden.

## Modell der wirksamen Spannungen nach der DIN 18800-3

Für den Knicknachweis werden die beiden Abminderungsfaktoren für Knicken und Beulen multipliziert. Bei der DIN wird nicht wie im Eurocode gefordert, dass mit wirksamen Breiten gerechnet wird. Der Knicknachweis wird daher mit Bruttobreiten geführt.

Es werden folgende Werte übernommen:

σ2= –193,6N/mm²

κpx= 0,3794

iz= 0,1196

iy= 0,1541

Knicken um die schwache Achse Knicken um die starke Achse

λa= 75,87 λa= 75,87

= =

= 0,771 = 0,599

k= 0,5∙(1+α∙(-0,2)+ ) k= 0,5∙(1+α∙(-0,2)+ )

k= 0,5∙(1+ 0,34∙(0,771-0,2)+ 0,771²) k= 0,5∙(1+ 0,34∙(0,599-0,2)+ 0,599²)

k= 0,894 k= 0,747

κ = κ =

κ = κ =

κ = 0,74206 κ = 0,83766

Von den beiden Abminderungsfaktoren ist der kleinste maßgebend.

aufnehmbare Spannung σP,Rd

σP,Rd= κ∙κpx∙fyd

σP,Rd= 0,74206·0,3794·360/1,1

σP,Rd= 92,13N/mm²

Nachweis

2,102 1

Nachweis nicht erfüllt

Wo befindet sich ?

Dieser Nachweis muss nicht geführt werden, weil die Spannung aus dem Moment schon im Beulfeld enthalten ist. σEd ist die größte Randspannung.

## Zusammenfassung

### Ergebnisse

Tabelle 44 Abminderungsfaktoren

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Eurocode | DIN |
| Abminderungsfaktor für Beulen | 0,38895 | 0,3794 |
| Abminderungsfaktor für Knicken | 0,92992 | 0,8506 |
| Verlusthöhe | 0,2383 | 0,2421 |

Tabelle 45 Zusammenfassung der Nachweise

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Nachweise | EuroB | DINS | EuroS | DINB |
| η1 | 0,9213 | 1,5597 | 1,4001 | 0,9936 |
| Knicken um die starke Achse | 1 | 2,1019 | 1,505 | 1,127 |
| Knicken um die schwache Achse | 0,7861 |  |  | 0,9821 |

Auch hier liefern der Eurocode und vor allem das Modell der wirksamen Breiten größere Tragfähigkeiten.

### Stahlverbrauch

Für den Eurocode nach dem Modell der wirksamen Breiten ist der Nachweis erfüllt und die Blechdicke ist 3mm. Für die anderen Rechenmöglichkeiten wird die Blechdicke der Stege und Flansche erhöht. Die Stege und Flansche sind gleich dick. Die Dicken sind Mikrometer genau. Auch wenn in der Praxis keine Stege mikrometergenau hergestellt werden können, so können 10µm bei anderen Maßen mit 1% Wahrscheinlichkeit über einen Millimeter entscheiden. Es wird kein Unterschied gemacht, ob nun 1% Stahl verbraucht wird oder 100% Stahl mit 1% Wahrscheinlichkeit.

Tabelle 46 Das Gewicht des Trägers und die erforderliche Blechdicke

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Stahlverbrauch | Blechdicke |
| EuroB | 224kg | 3mm |
| DINB | 241kg | 3,22mm |
| EuroS | 272kg | 3,64mm |
| DINS | 297kg | 3,98mm |

Der Eurocode nach dem Modell der wirksamen Breiten benötigt am wenigsten Stahl.

Da es keine Schubbeanspruchung gibt, wird nach der DIN nach dem Modell der wirksamen Breiten der Steg nicht durch Schub geschwächt. Dadurch unterscheidet sich das Ergebnis gegenüber den anderen Rechenbeispielen besonders wenig vom Eurocode. Die DIN 18800-3 benötigt am meisten Stahl. Im Gegensatz zu den anderen Rechenbeispielen ist dies besonders wenig Zusatzstahl. Das liegt zum einen daran, dass mit zunehmender Blechdicke mehr Breiten im Steg und auch im Flansch mitwirken. Des Weiteren musste keine Interaktion geführt werden, da nach der DIN 18800-3 alle Spannungen nahezu linear addiert werden. Und drittens erhöht sich für unausgesteife Gesamtfelder die Tragfähigkeit, da die Formel in der DIN 18800-3 verwendet werden kann.

Statt ρ= in DIN 18800-2 GL 81 Tabelle 27

wurde κp= MIN(1,25; 1,25 – 0,25∙ψ)∙ in DIN 18800-3 Tabelle 1

verwendet.

### Rechenaufwand

Tabelle 47 Anzahl der benötigten Seiten für jede Rechenmöglichkeit

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Abschnitt | EuroB | DINS | EuroS | DINB |
| 1 | II | II | II | II |
| 2 | I | I | I | I |
| 3 | I' | ' | I' | I' |
| 4 | II' |  | II | II' |
| 5 | II | I' | II | IIII |
| 6 | I | ' | I | ' |
| Summe | 10 | 5,5 | 9,5 | 11,5 |

Der Eurocode benötigt nicht wie in den anderen Rechenbeispielen den größten Auswand. Beim Modell der wirksamen Breiten unterscheiden sich DIN und Eurocode im Knicknachweis. Die DIN hat viel größere und längere Formelapparate und es wird zusätzlich MPl benötigt.

Die beidem Modelle des Eurocodes unterscheiden sich in der Berechnung der Querschnittswerte. Das Modell der wirksamen Spannungen benötigt das Flächenträgheitsmoment nicht und spart so eine halbe Seite. Besonders sparsam im Umgang mit Papier ist die DIN 18800-3. Da im Knicknachweis mit Bruttobreiten gerechnet wird, müssen keine wirksamen Breiten berechnet werden. Es wird im Abschnitt 3 nur der Beulwert benötigt, da keine wirksamen Breiten berechnet werden müssen.

### Vergleich zwischen Aufwand und Stahlverbrauch

Aufwandeinsparverhältnis E =

E(EuroB)= = 0,729

E(DINB)= = 0,589

E(EuroS)= = 0,632

E(DINS)= = 1

Besonders ineffizient ist die DIN 18800-2. Sie benötigt mehr Rechenaufwand als der Eurocode nach dem Modell der wirksamen Breiten und bringt dabei weniger Tragfähigkeit. Im Eurocode benötigt das Modell der wirksamen Spannungen gegenüber dem Modell der wirksamen Breiten eine halbe Seite weniger benötigt aber verhältnismäßig mehr Stahl, sodass dieser Rechenweg fast genauso wenig Tragfähigkeit pro Seite aufbaut wie die DIN 18800-2.

Mit der DIN 18800-3 ist der Beulnachweis sehr schnell geführt und der Stahlverbrauch ist nur mäßig höher, sodass diese Norm pro Seite die meiste Tragfähigkeit erzeugt.

### Variation der Belastung

Es wird untersucht, wie groß die Streckenlast q maximal bei einer bestimmten Normalkraft sein darf. Das Rechenmodell hat eine Schwäche. Die wirksame Flanschbreite des geringer beanspruch- ten Flansches ist größer als des höher beanspruchten Flansches. Dies kann berücksichtigt werden, indem die Schlankheit reduziert wird. Allerdings muss dann iteriert werden. Um die Iteration zu sparen wurden vereinfachend beide Flansche gleich abgemindert. Das hat zur Folge, dass es im Übergang zu negativen Randspannungsverhältnissen einen Sprung gibt. Da dieser Sprung nicht vorhanden ist, wurden nur positive Randspannungsverhältnisse untersucht. Die Stütze steht immer vollständig unter Druck.

Diagramm 20 Aufnehmbare Streckenlast in Abhängigkeit von der Normalkraft

Nach allen Rechenbeispielen besteht ein fast linearer Zusammenhang zwischen Normalkraft und Streckenlast.

Nach dem Eurocode nach dem Modell der wirksamen Breiten kann die größte Normalkraft aufge- nommen werden und nach der DIN 18800-3 kann die kleinste Normalkraft aufgenommen werden. Der Unterschied der aufnehmbaren Normalkraft ist zwischen den beiden Modellen doppelt so groß wie zwischen den Normen. Dadurch haben alle Geraden etwa den gleichen Abstand.

Über die Größe des aufnehmbaren Momentes kann keine Aussage getroffen werden, da nur überdrückte Träger untersucht wurden.

Die Werte nach dem Modell der wirksamen Breiten schneiden nicht die x-Achse. Das liegt daran, dass Knicken um die schwache Achse maßgebend wird. Berücksichtigt man nur das Knicken um die starke Achse, so kann die Gerade bis zur X-Achse verlängert werden.

# Auswertung

Die Normen werden anhand der Ergebnisse der 4 Rechenbeispiele ausgewertet. Um die Werte vergleichen zu können, werden alle Werte auf die DIN 18800-3 bezogen. Die Normen werden auf 2 Hauptkriterien untersucht: Rechenaufwand und Tragfähigkeit.

Wert=

oder Wert=

Je größer der Wert, desto besser ist das Rechenmodell. Was durch wen geteilt wird hängt davon ab.

Für diese Werte werden Formelzeichen in diesem Kapitel eingeführt.

S= relativer Stahlverbrauch

R= relativer Rechenaufwand

X= Wert aus dem Rechenmodell

Index= bezieht sich auf X und D. S= Stahlverbrauch und R= Rechenaufwand

D= Wert nach der DIN 18800-3

A= Abwägung zwischen Stahlverbrauch und Rechenaufwand

## Kriterium: Stahlverbrauch

Der Materialbedarf hat im früheren Stahlbau die wichtigste Rolle gespielt. Auch heute kann das Gewicht noch von Bedeutung sein und in Zukunft im Hinblick auf eine Materialknappheit.

Tabelle 48 Absoluter Stahlverbrauch nach allen Rechenbeispielen

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | EuroB | DINS | EuroS | DINB |
| Rechenbeispiel 1 | 2272 | 4913 | 4478 | 3370 |
| Rechenbeispiel 2 | 2,64 | 5,04 | 3,44 | 3,66 |
| Rechenbeispiel 3 | 194 | 323 | 278 | 269 |
| Rechenbeispiel 4 | 224 | 297 | 272 | 241 |

Der absolute Stahlverbrauch ist nicht aussagekräftig, da sich System und Einheiten unterscheiden.

Der Stahlverbrauch wird dabei auf die DIN 18800-3 bezogen

S=

Tabelle 49 Relativer Stahlverbrauch nach allen Rechenbeispielen

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | EuroB | DINS | EuroS | DINB |
| Rechenbeispiel 1 | 2,162 | 1 | 1,097 | 1,458 |
| Rechenbeispiel 2 | 1,909 | 1 | 1,465 | 1,377 |
| Rechenbeispiel 3 | 1,665 | 1 | 1,162 | 1,201 |
| Rechenbeispiel 4 | 1,326 | 1 | 1,092 | 1,232 |

Das Modell der wirksamen Breiten ermöglicht immer schlankere Träger als das Modell der wirksamen Spannungen. Das Gleiche gilt für den Vergleich zwischen Eurocode und DIN.

Nach der DIN 18800-3 werden daher immer die dicksten und größten Querschnitte benötigt, während nach dem Eurocode nach dem Modell der wirksamen Breiten sich immer die schlanksten und dünnsten Querschnitte konstruieren lassen. Der Stahlbedarf kann sich um bis das doppelte unterscheiden. Im vierten Rechenbeispiel hat die DIN 18800-3 durch viele Boni einige Schwächen kompensieren können. Da diese Rechenmethode keinen anderen Wert als 1 annehmen kann, sinken die Werte der anderen Rechenmethoden.

Nach dem Kriterium Stahlverbrauch ist die DIN völlig verzichtbar.

## Kriterium: Rechenaufwand

Dieses Kriterium gewinnt immer mehr an Bedeutung. Während die Tragfähigkeiten mit jeder neuen Norm steigen, stagnieren die Steifigkeiten schon seit Jahrzehnten. Ist der Gebrauchstauglichkeits- nachweis maßgebend, so zählt nur noch der Rechenaufwand. Nicht nur der Stahl verursacht Kosten, sondern auch der Lohn.

Tabelle 50 Absoluter Seitenverbrauch nach allen Rechenbeispielen

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | EuroB | DINS | EuroS | DINB |
| Rechenbeispiel 1 | 12,5 | 3,5 | 6 | 6 |
| Rechenbeispiel 2 | 18 | 13 | 16 | 13,5 |
| Rechenbeispiel 3 | 30,5 | 18 | 25 | 22 |
| Rechenbeispiel 4 | 10 | 5,5 | 9,5 | 11,5 |

Zwar sind die Einheiten gleich, aber die Geometrie unterscheidet sich in der Anzahl der Steifen.

Die Formel für den relativen Rechenaufwand lautet.

R=

Tabelle 51 Relativer Seitenverbrauch nach allen Rechenbeispielen

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | EuroB | DINS | EuroS | DINB |
| Rechenbeispiel 1 | 0,28 | 1 | 0,583 | 0,583 |
| Rechenbeispiel 2 | 0,722 | 1 | 0,813 | 0,963 |
| Rechenbeispiel 3 | 0,59 | 1 | 0,72 | 0,818 |
| Rechenbeispiel 4 | 0,55 | 1 | 0,579 | 0,478 |

Das Modell der wirksamen Breiten benötigt immer mehr Rechenaufwand, als das Modell der wirksamen Spannungen. Die Beulnachweise benötigen nach dem Eurocode immer mehr Zeit als nach der DIN. Im vierten Rechenbeispiel kam das Knicken hinzu, für das die DIN 18800-2 besonders lange Formelapparate bietet. Beulnachweise nach DIN 18800-3 sind für unversteifte Querschnitte mit weitem Abstand am schnellsten gerechnet. Die Seitenzahl unterscheidet sich meist im Faktor 2. Der Eurocode nach dem Modell der wirksamen Breiten hingegen ist für einen einfachen I-Träger besonders langsam, da das ganze Programm durchlaufen werden muss.

Mit dem Abtreten der DIN werden Beulnachweise groß und lang werden. Die DIN 18800-3 ist in diesem Punkt unersetzbar. Dieser immense Aufwand schreckt Ingenieure immer wieder vor dem Eurocode ab, sodass der Träger am Ende in einem FEM-Programm landet.

Für die Zukunft muss der Eurocode ein Sparprogramm enthalten!

## Kriterium Abwägung von Rechenaufwand und Stahlverbrauch

In den meisten Fällen muss zwischen den beiden Kriterien abgewogen werden. Man erwartet, dass bei größerem Rechenaufwand auch mehr Tragfähigkeit entsteht. Wie dies gegeneinander gewichtet wird, wird in einer Zahl A dargestellt. Je größer A, desto besser ist die Rechenmethode.

In den Rechenbeispielen wurde das proportionale Kriterium verwendet:

A = R∙ S

Damit wird beschrieben, wie viel Tragfähigkeit pro Seite entsteht. Je mehr man rechnet, desto mehr Tragfähigkeit erhält man.

Tabelle 52 Relative Tragfähigkeit pro Seite

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | EuroB | DINS | EuroS | DINB |
| Rechenbeispiel 1 | 0,605 | 1 | 0,640 | 0,850 |
| Rechenbeispiel 2 | 1,379 | 1 | 1,190 | 1,326 |
| Rechenbeispiel 3 | 0,983 | 1 | 0,837 | 0,982 |
| Rechenbeispiel 4 | 0,729 | 1 | 0,632 | 0,589 |

Nach diesem Kriterium nähern sich alle Rechenmethoden aneinander an. Wird mehr gerechnet, so wird mehr Stahl gespart. Bei unversteiften Trägern bringt die DIN 18800-3 mit Abstand die besten Resultate. Der Eurocode schneidet im zweiten Rechenbeispiel besonders gut ab, weil keine sonstigen Nachweise geführt wurden. Nimmt man diese mit hinzu, so sinken diese Werte.

Es gibt allerdings auch noch viele andere Kriterien mit denen zwischen Rechenaufwand und Stahlverbrauch abgewogen werden kann.

Man kann die Kriterien mit den Exponenten N und M stärker wichten.

A= RN∙ SM

Exponenten größer als 1 wichten das eine Kriterium stärker und Exponenten kleiner als 1 weisen ihm eine geringere Bedeutung zu.

Wählt man beispielsweise A= R∙ S2/3, so ist der geometrische Mittelwert aller Zahlen 1. Das bedeutet, dass man für mehr Tragfähigkeit überproportional mehr Rechnen muss.

Eine andere Möglichkeit ist das Additionskriterium.

A= Xs∙€s+ Xr∙€s+ C∙€c

Dabei werden die beiden absoluten Größen mit einem Wichtungsfaktor € versehen. Weiterhin gibt es eine Konstante, die ebenfalls gewichtet wird.

Für die Herstellung eines Trägers macht dieses Kriterium am meisten Sinn. Dabei werden das Material und der Lohn in Kosten umgerechnet und sonstige Dinge wie z.B. Steifen. Eine Steife verursacht nicht nur Materialkosten, sondern auch Montagekosten.

Weitere Möglichkeiten sind der Quotient, um ein Verhältnis zu bilden, oder der Differenzen- quotient, mit dem man die Veränderung beschreibt. Beide Größen sind allerdings nicht dimensionslos.

## Weitere Eigenschaften der Normen

**Normgröße**

Der Text in der DIN ist etwas kürzer als im Eurocode, da die DIN 18800-3 deutlich weniger Seitenzahlen hat als der Eurocode. Die 67 Seiten im Eurocode schrecken gegenüber 14 Seiten in der DIN 18800-3 viele Ingenieure vor der Benutzung des Eurocodes ab.

Allerdings ist die DIN unvollständig, der Text sehr kompakt und einige Teile befinden sich in der DIN 18800-2. Beim Eurocode sind nicht 2 Spalten pro Seite angelegt, Schrift, Zeilenabstand und vor allem Grafiken sind größer. Eine Formel hat im Eurocode viel Platz und beansprucht eine breite Zeile für sich und die Formelzeichen sind voluminös erklärt, während Gleichungen in der DIN Platz sparen und nur eine halbe Zeile benötigen. Weiterhin gibt es viele Erklärungen im Eurocode. Komprimiert man den Eurocode + Anwendungsdokument auf das DIN-Format, so sind das etwa 35 Seiten. Addiert man die notwendige DIN 18800-2 hinzu, so hat das Normenwerk 22 Seiten. Das ist die Hälfte mehr, aber nicht das Fünffache!

**Vollständigkeit**

Die DIN 18800-3 enthält keine Beulwerte. Für unausgesteife Platten sind sie in DIN 18800-2 zu finden. Für ausgesteifte Platten ist man auf Literatur angewiesen. Der Eurocode bietet Formeln an. Diese sind allerdings nicht präzise und liegen häufig auf der sicheren Seite. Zumindest können schnell mehrere Varianten untersucht werden. Das dicke Buch „Beulwerte ausgesteifter Rechteck- platten“ [6] bietet nur für einige Fälle einen Beulwert an. Meist muss man dort aus 4 abgelesenen Werten doppelinterpolieren.

Aber auch der Eurocode ist unvollständig. Es wird noch das jeweilige nationale Anwendungs- dokument benötigt. Damit ist das Ergebnis nicht mehr unabhängig vom Ort der Berechnung. Während 1+1 überall auf der Welt zu jeder Zeit immer 2 ergibt, liefert der Eurocode ein Ergebnis in Abhängigkeit des Berechnungsortes.

**Widerspruchsfreiheit**

Formeln müssen an ihren Grenzwerten festgemacht sein und für alle möglichen Parameter plausible und widerspruchsfreie Ergebnisse liefern. Eine Theorie hat sich diesem Kriterium bedingungslos zu unterwerfen, es wird jedoch mit Normen gerechnet, nicht mit Theorien. Beide Normen enthalten aber Widersprüche. Es macht einen großen Unterschied, ob man nun 0 Längssteifen, unendlich kleine Längssteifen oder keine Längssteifen verwendet. Einem Anfänger können da schnell unbemerkt schwere Fehler passieren. Es wird meist auf den Verstand des Ingenieurs verwiesen, doch ab welcher Steifengröße beginnt dieser? Auch einige Prüfingenieure werden nicht auf die Idee kommen, dass ein Bauwerk trotz richtigster Berechnung nach der Norm in den beschriebenen grenzwertigen Fällen in der Realität nicht halten wird. Daher muss auch eine Norm widerspruchsfrei sein.

**Verständlichkeit**

Der Eurocode ist durch die vielen Anmerkungen leichter zu verstehen als die DIN und die erforder- lichen Nachweise sind übersichtlicher gestaltet. In der DIN gibt es seitenweise Bedingungen für die kein Beulnachweis geführt werden muss, sodass man die wichtigen Formen schwerer findet. Viele benötigte Größen finden sich sowohl im Eurocode als auch in der DIN in der Nähe. In der DIN stehen viele Größen am Anfang des Dokuments und im Eurocode finden sich einige Beulwerte im Anhang.

**Tragfähigkeitsboni**

Der Eurocode bietet die Möglichkeit auf Kosten des Rechenaufwandes die Tragfähigkeit zu erhöhen. Da gibt es 5 kleine Möglichkeiten:

1. Der Interaktionsnachweis darf in einem Abstand von der Auflagersteife geführt werden. Stützmomente lassen sich dadurch abmindern. Dafür muss man allerdings am Auflager einen Querschnittsnachweis führen.

2. Für diesen Querschnittsnachweis am Auflager darf der Zugbereich so lange plastifizieren, bis im Druckbereich die Streckgrenze erreicht ist.

3. Für die Schubtragfähigkeit darf bei hohen Schlankheiten eine bessere Formel verwendet werden. Dafür muss allerdings ein starres Auflager ausgeführt werden.

4. Die Querkrafttragfähigkeit der Flansche darf angesetzt werden.

5. Die ideale Beulspannung darf am Ort der Steife und nicht am Rand berechnet werden.

Jede dieser Optionen benötigt etwa eine Seite und bringt rund 5% bis 10% Tragfähigkeit.

## Forderungen für die Zukunft

**Vereinfachung**

Der Eurocode benötigt ein Sparprogramm, sodass Nachweise auf Kosten der Tragfähigkeit wesentlich schneller geführt werden können und Lohnkosten gespart werden können. Zwar gibt es für eine zusammengefasste Formel, aber die meisten Formelapparate sind zu umfangreich. Nicht alle Ingenieure sind im reinen Stahlbau tätig, sondern kombinieren Holz, Stahl und Beton je nach Bedarf. Bei kleineren Bauwerken, bei denen ein dünnes Blech vorkommt, ist es unverhältnismäßig, wenn dieses kleine Blech 40% der gesamten Statik ausmacht. Für solche Fälle wünscht sich der Ingenieur eine möglichst einfache Lösung. Anstatt lange zu rechnen, wird das System schnell in ein FEM-Programm eingegeben und der Ingenieur hat volles Vertrauen in seinen Computer. Kleine Eingabefehler sind in einem FEM-Programm nur schwer zu sehen, denn auch falsche Ergebnis- bilder sehen schön bunt aus. In Excel hingegen fällt ein kleiner Fehler beim schnellen Probieren mehrerer Werte schnell auf.

Das Sparprogramm könnte z.B. etwa so aussehen:

* Die wirksamen Breiten werden pauschaler berechnet. z.B. die Hälfte links und rechts.
* Schubverzerrung wird mit einer einzigen Formel erledigt.
* Die aufwändigen Abstände e1 und e2 werden in einer konstanten Zahl zusammengefasst.
* Es gibt Möglichkeiten, bei denen die Querschnittswerte der Steifen mit wirksamen Breiten umgangen werden können.
* Der Interaktionsnachweis kommt ohne MPl,N aus. Für MPL,N gibt es eine Faustformel.
* Der Nachweis einer lokalen Einzellast bietet alternativ eine unwirtschaftliche Faustformel.
* Der Schubbeulnachweis ist wie in der DIN mit einer Formel erledigt.

**Verständlichkeit**

Da viele Tragwerksplaner mit Holz, Stahl und Beton planen, muss neues Wissen schnell zugänglich sein. Dieses Kriterium ist weitestgehend umgesetzt. Während die DIN noch Fachwissen voraussetzt und nur eine Ergänzung ist, kann der Eurocode von einem neu anfangenden Ingenieur bereits angewendet werden. Im Eurocode ist alles enthalten, was für einen Beulnachweis benötigt wird. Schwer verständlich hingegen ist der Kommentar [7] zum Eurocode. Soll Englisch als Austauschsprache dienen, so muss sie einfach gehalten werden. Dazu können Sätze geteilt und weniger grammatikalisch ausgeschmückt werden. Die Rechenbeispiele hingegen sind verständlich.

Mit „As however the distribution of action effects along a structure is governed by the integral of stiffness along the length and not so much by local stiffness reduction when local buckling occurs, there is a variation of the strains along the supported edges that leads to an increased stiffness compared to the lowest local value that corresponds to effective areas for resistance valid at the peak of the buckles, see section 14.” verlangt der Kommentar viel zu hohe Englischkenntnisse vom ausländischen Leser.

**FEM**

Da zunehmend mit der finiten Elementmethode gerechnet wird, müssen auch klare Regeln geschaffen werden, was alles berücksichtigt werden muss. Der Eurocode macht in Anhang C einen Anfang. Früher war FEM nur Professoren zugänglich, während die FEM-Programme heute so nutzerfreundlich geworden sind, dass selbst ein Abiturient ohne Studium und Statikkenntnisse eine Statik vom Computer rechnen lassen kann. Statikkenntnisse, die über einen Einfeldträger hinaus gehen, sind schon heute überflüssig geworden. Während damals noch jeder FEM-Nutzer wusste, was im Computer passierte, besteht heute zwischen Anwender und Computer ein blindes Vertrauen. FEM-Ergebnisse sind abhängig vom Programm, vom Nutzer und diversen Bugs. Hier muss die Norm dafür sorgen, dass weniger FEM eingesetzt wird und dass FEM-Ergebnisse unabhängig vom Nutzer sind. Der Einsatz der undurchsichtigen FE-Methode kann reduziert werden, indem ein Sparprogramm im Eurocode eingeführt wird. Für nutzerunabhängige Ergebnisse muss Anhang C weiter ausgebaut werden.

**Eingabefreundlichkeit**

Die Formelzeichen wechseln mit der Zeit. Doch der Wechsel ist im Zeitalter des Computers meist nicht eingabefreundlich. Viele Ingenieure benötigen deutlich mehr Zeit einen kyrillischen oder griechischen Buchstaben ein zu tippen, als einen lateinischen. Weiterhin gibt es Zeichen, die als normales Ascii-Zeichen nicht verfügbar sind. Koptische Zeichen wie stellen für Viele eine schwer überwindbare Barriere dar und jeder erfindet dafür sein eigenes Symbol. Das ist aber nicht der Sinn von Formelzeichen, die in jedem Dokument die gleiche Bedeutung haben sollen.

So ließe sich das Problem eingabefreundlich lösen:

* Das lateinische Alphabet muss vollständig belegt sein.
* Häufige Größen bekommen einen lateinischen Buchstaben, seltene einen Buchstaben aus einem anderen Alphabet.
* Zeichen, die nicht auf der Tastatur vorhanden sind und nicht im Symbolsatz vorkommen, werden nicht verwendet. Das betrifft vor allem Hieroglyphen und koptische Zeichen.
* Es gibt 4 alternative Formelzeichenbelegungen. Für russische Tastaturen werden alle häufigen Zeichen mit kyrillischen Buchstaben belegt.

# Verzeichnisse

## Tabellen

Tabelle 1 Zahlen mit 2 Nachkommastellen 18

Tabelle 2 Zahlen mit 3 signifikanten Stellen 18

Tabelle 3 Zahlen im Standardzahlenformat 19

Tabelle 4 Eigenschaften der Zahlen 19

Tabelle 5 Maßeinheiten in der Diplomarbeit 69

Tabelle 6 Beulwerte für α und ß 76

Tabelle 7 Zielwert zwischen 4 bekannte Werte 77

Tabelle 8 Zwischenwerte 77

Tabelle 9 Maße des Querschnitts für das erste Rechenbeispiel 98

Tabelle 10 Formeln in Excel zur Berechnung der wirksamen Querschnittswerte 101

Tabelle 11 tabellarische Berechnung der wirksamen Querschnittswerte 102

Tabelle 12 wirksame Flächen 114

Tabelle 13 Abminderungsfaktoren 114

Tabelle 14 Nachweise 115

Tabelle 15 Anzahl der benötigten Seiten 116

Tabelle 16 Größe des erforderlichen Stahlquerschnittes. 116

Tabelle 17 Momententragfähigkeit in Abhängigkeit von der Normalkraft und Maßgebende Nachweise 117

Tabelle 18 Alle Eingangsdaten für das zweite Rechenbeispiel 123

Tabelle 19 Auszug aus Tabelle 2 Beulwerte für α und ß 146

Tabelle 20 wirksame Breiten und Querschnittswerte 151

Tabelle 21 Abminderungsfaktoren für das zweite Rechenbeispiel 152

Tabelle 22 Nachweise für alle 4 Rechenmöglichkeiten 153

Tabelle 23 Erforderlicher Rechenaufwand nach dem zweiten Rechenbeispiel 154

Tabelle 24 Vergleich der Nachweisergebnisse, wenn mit und ohne Längssteife auf dem Flansch gerechnet wird 156

Tabelle 25 Vergleich der Ergebnisse, wenn mit und ohne Längssteife auf der Spannungsnulllinie gerechnet wird 157

Tabelle 26 Vergleich der Nachweisergebnisse, wenn die Widersprüche ignoriert werden. 160

Tabelle 27 Interaktionsnachweis in Abhängigkeit vom Ort der Steife 160

Tabelle 28 Eingangsdaten für das dritten Rechenbeispiel 162

Tabelle 29 Zusammenfassung des Rechengangs für alle 3 Beulfelder 164

Tabelle 30 wirksame Breiten 164

Tabelle 31 Zusammenfassung der Steifenquerschnittswerte 167

Tabelle 32 Auszug aus Tabelle 2 Beulwerte für α und ß 187

Tabelle 33 wirksame Breiten der Beulfelder 192

große Tabelle 34 Alle Daten zur tabellarischen Berechnung der wirksamen Querschnittswerte 192

Tabelle 35 wirksame Breiten der einzelnen Felder 194

Tabelle 36 Die Abminderungsfaktoren des dritten Rechenbeispiels 194

Tabelle 37 Nachweise des dritten Rechenbeispiels 195

Tabelle 38 Anzahl der benötigten Seiten für jede Rechenmethode 195

Tabelle 39 Maximale Momententragfähigkeit in Abhängigkeit von der Normalkraft nach allen Rechenmodellen 200

Tabelle 40 Maße des Querschnitts 202

Tabelle 41 Querschnittswerte Eurocode 207

Tabelle 42 Querschnittswerte DIN 214

Tabelle 43 Querschnittsdaten zur Berechnung des plastischen Momentes 217

Tabelle 44 Abminderungsfaktoren 219

Tabelle 45 Zusammenfassung der Nachweise 219

Tabelle 46 Das Gewicht des Trägers und die erforderliche Blechdicke 219

Tabelle 47 Anzahl der benötigten Seiten für jede Rechenmöglichkeit 220

Tabelle 48 Absoluter Stahlverbrauch nach allen Rechenbeispielen 222

Tabelle 49 Relativer Stahlverbrauch nach allen Rechenbeispielen 222

Tabelle 50 Absoluter Seitenverbrauch nach allen Rechenbeispielen 223

Tabelle 51 Relativer Seitenverbrauch nach allen Rechenbeispielen 223

Tabelle 52 Relative Tragfähigkeit pro Seite 224

## Bilder

Bild 1 drei Möglichkeiten des Ausbeulens 71

Bild 2 Formelzeichen für Maße 73

Bild 3 wirksame Breiten 80

Bild 4 86

Bild 5 ∙ – (ψ + b)∙ f(ψ) 89

Bild 6 93

Bild 7 96

Bild 8 mögliche Hyperbelformen 96

Bild 9 Längen für b0 124

Bild 10 181

Bild 11 winzige Steifchen 198

## Grafiken

Grafik 1 verschiedene Querschnitte 6

Grafik 2 Verformung eines Knickstabes bei unterschiedlicher Last 8

Grafik 3 drei verschiedene Versagensformen 8

Grafik 4 verschiedene statische Systeme 9

Grafik 5 ausgesteifer Träger mit Bezeichnung 9

Grafik 6 Bezeichnung der Trägerteile 10

Grafik 7 allgemeine Formelzeichen für alle Rechenbeispiele 70

Grafik 8 Träger mit wirksame Breiten 101

Grafik 9 Notwendige Maße zur Berechnung des plastischen Momentes 107

Grafik 10 Spannungsverteilungen von elastisch bis plastisch 119

Grafik 11 Kräfte im semiplastischen Spannungszustand 119

Grafik 12 Kräfte im semiplastischen Spannungszustand mit Normalkraft 121

Grafik 13 Richtung von Moment und Normalkraft 122

Grafik 14 Zweifeldträger mit Maße und Last 123

Grafik 15 Maße des Trägers 123

Grafik 16 wirksame Breiten an der Steife 127

Grafik 17 Definition der Abstände 129

Grafik 18 notwendige Maße für die Querschnittswerte 131

Grafik 19 wirksame Breiten für Schubbeulen 134

Grafik 20 Maße zur Berechnung von Mpl 138

Grafik 21 Träger mit wirksame Breiten und Dicken 143

Grafik 22 Stahlverbrauch zum zweiten Rechenbeispiel 155

Grafik 23 Träger 162

Grafik 24 Zweifeldträger mit allen Maßen und Lasten 162

Grafik 25 wichtige Maße zur Berechnung der plastischen Momententragfähigkeit 177

Grafik 26 Stahlverbrauch zum dritten Rechenbeispiel 196

Grafik 27 Stütze mit Maßen, Last und Abmessungen 202

Grafik 28 wirksame Querschnittsteile 217

## Diagramme

Diagramm 1 zur Ermittlung des Beulwertes 76

Diagramm 2 ohne Breitenbegrenzung Diagramm 3 mit Breitenbegrenzung 82

Diagramm 4 Abminderungsfaktor in Abhängigkeit von der Schlankheit. Kurvenscharparameter ist ψ. 85

Diagramm 5 Beulwertfunktionen in Abhängigkeit vom Randspannungsverhältnis. 88

Diagramm 6 Beulwert in Abhängigkeit vom Randspannungsverhältnis 88

Diagramm 7 Einfluss des Randspannungsverhältnisses auf die wirksame Breite für ψ < -1 89

Diagramm 8 Einfluss von ψ auf die wirksame Breite nach dem Eurocode für alle ψ 90

Diagramm 9 Einfluss von ψ auf die wirksame Breite nach der DIN für alle ψ 91

Diagramm 10 Verhältnis der wirksamen Breite nach Eurocode und DIN 91

Diagramm 11 Abminderungsfaktor für Schubbeulen nach beiden Normen in Abhängigkeit von der Schlankheit 92

Diagramm 12 Schubtragfähigkeit in Abhängigkeit von der Steghöhe 95

Diagramm 13 97

Diagramm 14 maximale Momententragfähigkeit in Abhängigkeit von der Normalkraft 118

Diagramm 15 Interaktionsnachweis in Abhängigkeit vom Ort der Steife 160

Diagramm 16 161

Diagramm 17 Beulwert 184

Diagramm 18 Einfluss der Steifengröße auf dem Abminderungsfaktor 200

Diagramm 19 Aufnehmbare Streckenlast in Abhängigkeit von der Normalkraft für 2 Längssteifen 201

Diagramm 20 Aufnehmbare Streckenlast in Abhängigkeit von der Normalkraft 221

## Herkunft der Tabellen, Bilder, Grafiken, Diagramme

Grafik 7: Formelzeichen auf der Grundlage von Commentary and worked examples to EN 1993-1-5 Plated structural elements

Bild 1: auf der Grundlage von Commentary and worked examples to EN 1993-1-5 Plated structural elements

Diagramm 1 und Tabelle 2: aus dem Buch Seeßelberg Krahnbahnen Bemessung und konstruktive Gestaltung; 3., aktualisierte und erweiterte Auflage Februar 2009 ISBN 978-3-89932-218-7

Bild 3: Auszug aus der DIN 18800-2 11-90 Stahlbauten Stabilitätsfälle, Knicken von Stäben und Stabwerken

Bild 9: Auszug aus DIN EN 1993 Eurocode 3 Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten

Teil 1-5 2006 Plattenförmige Bauteile

Diagramm 17: aus Klöppel/Scheer/Möller; Beulwerte ausgesteifter Rechteckplatten; Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn Berlin ∙ München

Alle nicht aufgelisteten Tabellen, Bilder, Grafiken und Diagramme stammen von Simon Pie.

Für die Erstellung wurden die Programme Microsoft Word, Microsoft Excel, Paint, Infranview, Corel Draw, AutoCAD und Inkscape verwendet.   
Die Grafiken sind entweder Word Autoformen oder WMF-Dateien. Die Bilder sind PNG-Dateiformate (2 oder 16 Farben).

## Quellen und Literatur

[1]DIN EN 1993 Eurocode 3 Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten

Teil 1-5 2006: Februar 2007 Plattenförmige Bauteile

[2]DIN EN 1993 Eurocode 3 Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten

Teil 1-1 2005: Juli 2005 Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau

[3]DIN 18800-1 11-90 Stahlbauten Bemessung und Konstruktion

[4]DIN 18800-2 11-90 Stahlbauten Stabilitätsfälle, Knicken von Stäben und Stabwerken

[5]DIN 18800-3 11-90 Stahlbauten Stabilitätsfälle, Plattenbeulen

[6]Klöppel/Scheer/Möller; Beulwerte ausgesteifter Rechteckplatten; Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn Berlin ∙ München

[7]Kommentar zum Eurocode 1993-1-5; Commentary and worked examples to EN 1993-1-5 Plated structural elements; Professor Bernt Johansson, Luleå University of Technology; Professor René Maquoi, University of Liege; Professor Gerhard Sedlacek, RWTH; Dr. Christian Müller, RWTH; Professor Darko Beg, University of Ljubljana;

[8]ESSC Technical Committee 8 – Stability; Rules for Member Stability in EN 1993-1-1 Background documentation and design guidelines

[9]W. Habermann; Skript Arbeitshilfen zu Stahlbau 4 Kapitel 9

[10]Seeßelberg Kranbahnen Bemessung und konstruktive Gestaltung; 3., aktualisierte und erweiterte Auflage Februar 2009 ISBN 978-3-89932-218-7

http://www.kastenmaier.de/vba/vba-word/202-dokumentenstruktur-reparieren