6.5.7 Position 1 – gekrümmter Eckgurt

Querschnitt: 16/16 cm², Festigkeitsklasse BS 28h

6.5.7.1 Querschnitts- und Stabilitätsnachweis

Maximale Spannung im Querschnitt bei Biegung und Zug

Maßgebende Schnittgrößen: $N_{t,d}$ = 109,16 kN, $M_{y,d}$ = 3,17 kNm im Stab 38 bei LG 1

 $A = 16 \times 16 = 256 \text{ cm}^2$ $W_{v/z} = 16 \times 16^2 / 6 = 682 \text{ cm}^3$

Die folgende Bedingung nach BEKS, 10.2.7 muss erfüllt sein:

$$\frac{\sigma_{\text{t,0,d}}}{f_{\text{t,0,d}}} + \frac{\sigma_{\text{m,y,d}}}{f_{\text{m,y,d}}} + k_{\text{red}} \cdot \frac{\sigma_{\text{m,z,d}}}{f_{\text{m,z,d}}} \leq 1$$

Nachweis:

$$\frac{109,16/256}{1,05} + \frac{317/682}{1,507} = \frac{0,426}{1,05} + \frac{0,46}{1,507} = 0,41+0,31=0,72 \le 1$$

Knicknachweis für Biegung und Druck

Die Schnittgrößen sind nach Theorie II. Ordnung berechnet worden. Diese schließt eine Stabilitätsbetrachtung mit ein. Der vereinfachte Stabilitätsnachweis nach dem Ersatzstabverfahren wird hier dennoch als Kontrolle geführt.

Vereinfachter Nachweis nach BEKS, 10.3 für Stabzug 44-59

Maßgebende, maximale Schnittgrößen werden vereinfachend zusammenwirkend angenommen: $N_{c,o,d}$ = 107,71 kN, $M_{y,d}$ = 2,38 kNm, $M_{z,d}$ = 1,01 kNm

Die folgende Bedingung nach BEKS, 10.3.3 muss erfüllt sein:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_m \cdot f_{m,y,d}} + k_{red} \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \le 1$$

$$k_c = \min\left\{\frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel,c}^2}}; 1\right\}$$

$$k = 0, 5 \cdot \left[1 + \beta_c \cdot \left(\lambda_{rel,c} - 0, 3\right) + \lambda_{rel,c}^2\right]$$

Angenommen wird konservativ ein Knicklängenbeiwert $\beta = 1,0$; I_{ef} ergibt sich somit zu 335 cm. $\lambda_{rel,c}$ kann dann nach BEKS, 10.3.1 bestimmt werden.

$$k = 0, 5 \cdot [1 + 0, 1 \cdot (1, 159 - 0, 3) + 1, 159^{2}] = 1,215$$
$$k_{c} = min \left\{ \frac{1}{1,215 + \sqrt{1,215^{2} - 1,159^{2}}} ; 1 \right\} = 0,633$$

Tragwerksplanung für den Turm einer Windenergieanlage in Holzbauweise Diplomarbeit von Markus Golinski • SS 2004

 $k_m = 1,0$ nach BEKS, 10.3.2

Nachweis: $\frac{107,7/256}{0,633\cdot 1,426} + \frac{238/682}{1,0\cdot 1,507} + 0,7 \cdot \frac{101/682}{1,507} = 0,47 + 0,23 + 0,07 = 0,77 \le 1$

6.5.7.2 Nachweis des Anschlusses am Fußpunkt

Anschluss Eckgurt – Zugstabdiagonalen - Fußpunkt



Anschluss mit Passbolzen

Maßgebende Schnittgrößen: $F_{c,d}$ = -128,27 kN im Stab 5 bei LG 2

Die Mindestabstände werden gemäß den Empfehlungen für dynamisch belastete Anschlüsse aus der Literatur größer ausgeführt.

Geringes Anschlussmoment und Querkraft aus Zugstabanschluss wird vernachlässigt. Geschätzt Passbolzen M12, Festigkeitsklasse 8.8

Nach BEKS, 12.2.3 (4) gilt für die Tragfähigkeit pro Scherfuge und Verbindungsmittel für Verbindungen mit innenliegenden Stahlblechen:

$$R_{\rm k} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{\rm y,k} \cdot f_{\rm h,1,k} \cdot d}$$

Überprüfen der Mindestholzdicken

$$t_{req} = 1,15 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,k} \cdot d}}$$

$$M_{y,k} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} = 0,3 \cdot 800 \cdot 12^{2,6} = 153490 \text{ Nmm}$$

$$f_{h,o,k} = 0,082 \cdot (1-0,01 \cdot d) \cdot \rho_k = 0,082 \cdot (1-0,01 \cdot 12) \cdot 410 = 29,58 \text{ N/mm}^2$$

$$t_{req} = 1,15 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{153490}{29,58 \cdot 12}} = 95,66 \le 160 \text{ mm}$$

$$R_k = \sqrt{2} \cdot \sqrt{2 \cdot 153490 \cdot 29,58 \cdot 12} = 14762 \text{ N} = 14,76 \text{ kN}$$

Für Passbolzen darf nach 12.3 (8) R_k um ΔR_k erhöht werden:

$$\Delta R_{k} = \min \left\{ 0, 25 \times R_{k} ; 0, 25 \times R_{ax,k} \right\} = 0, 25 \cdot 14, 76 = 3,69 \text{ kN}$$

Die charakteristische Gesamttragfähigkeit des Anschlusses beträgt dann:

$$R_{k,8} = n_{Reihe} \cdot n_{SF} \cdot n_{ef} \cdot (R_k + \Delta R_k) = 2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot (14,76 + 3,69) = 231,73 \text{ kN}$$

Der Bemessungswert der Tragfähigkeit des Gesamtanschlusses ergibt sich zu:

$$R_{\rm d} = \frac{k_{\rm mod} \cdot R_{\rm k}}{\gamma_{\rm M}} = \frac{0.7 \cdot 231.73}{1.1} = 147.47 \ {\rm kN}$$

Nachweis:

$$\frac{F_{c,d}}{R_d} = \frac{128,27}{147,47} = 0,87 \le 1$$

Nachweis Schweißnaht Schlitzblech – Grundblech (Schnitt 1-1)

Maßgebende Schnittgröße: $F_{c,d}$ =120,55 kN, Querkraft in Höhe von 5,73 kN aus Zugstabanschluss kann vernachlässigt werden. Annahme: Schweißnaht überträgt die gesamte Druckkraft.

$$\begin{aligned} A_{w} &= I_{w} \cdot a_{w} = 2 \cdot 13 \cdot 0, 6 = 15, 6 \ cm^{2} \\ \sigma_{\perp} &= \frac{F_{c,d}}{A_{w}} = \frac{120, 55}{15, 6} = 7, 73 \ kN \ / \ cm^{2} \\ \sigma_{Rd} &= \alpha_{w} \cdot f_{y,d} = 0, 95 \cdot 21, 82 = 20, 73 \ kN \ / \ cm^{2} \quad (\alpha_{w} \ wird \ konservativ \ für \ Zug \ angenommen) \end{aligned}$$

Nachweis:

$$\frac{\sigma_{\perp}}{\sigma_{R,d}} = \frac{7,73}{20,73} = 0,37 \le 1$$

Maximale Zugspannung im Eckgurt im Fußpunkt (Schnitt 2-2)

Maßgebende Schnittgrößen: $F_{t,d}$ = 107,29 kN im Stab 5 bei LG 1

$$A_n = 16 \cdot 16 - (2 \cdot 1, 2 \cdot 16 + 1 \cdot 16) = 201, 6 \text{ cm}^2$$

Die folgende Bedingung muss nach BEKS, 10.2.1 erfüllt sein: $\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} \le 1$

Nachweis: $\frac{107, 3/201, 6}{1,05} = \frac{0,53}{1,05} = 0,51 \le 1$

Schweißnaht der Anschlussbleche der Zugstabdiagonalen

Maßgebende Schnittgrößen: F_{t,d} = 11,64 kN im Stab 13 bei LG 13

Rechnerisch wird nur eine Seite für die Schweißnaht wegen eventueller schlechter Zugänglichkeit (im spitzen Winkel des Anschlusses) angesetzt.

$$\begin{aligned} A_{w} &= I_{w} \cdot a_{w} = 15 \cdot 0, 4 = 6,00 \ cm^{2} \\ \tau_{\parallel} &= \sigma_{w,v} = \frac{F_{t,d}}{A_{w}} = \frac{11,64}{6,00} = 1,94 \ kN \ / \ cm^{2} \\ \sigma_{Rd} &= \alpha_{w} \cdot f_{y,d} = 0,95 \cdot 21,82 = 20,73 \ kN \ / \ cm^{2} \end{aligned}$$

Nachweis:

$$\frac{\sigma_{\rm w,v}}{\sigma_{\rm R,d}} = \frac{1,94}{20,73} = 0,09 \le 1$$

Gewählt:	8 x Passbolzen M12 x 220, Güte 8.8 + 2 x 8 Unterlegscheiben Ø 58 x 6
	+ Schlitzblech 10 x 220 x 370, S 235, Kehlnaht a = 6 mm umlaufend
	+ 2 x Anschlussbleche 8 x 60 x 174, S 235, Kehlnaht a = 4 mm + HV-Naht innens.

6.5.7.3



Abbildung 6-20: Lage der maximal beanspruchten Stäbe für Betriebsfestigkeitsnachweise

Die Betriebsfestigkeitswerte für BS 28h werden wie im Kapitel 3.7.2 beschrieben in die Material-Datenbank von RS-HOLZ eingegeben und mit diesen die Spannungsnachweise geführt. Die gesamten Nachweise für den Eckgurt sind im Anhang 8.2 einsehbar. Exemplarisch sollen hier zwei Nachweise kurz dargestellt werden.

6.6.3 Ausgewählte Betriebsfestigkeits-Nachweise

6.6.3.1 Nachweis des Eckgurt-Querschnitts

Maximale Spannung im Querschnitt bei Biegung und Zug

Maßgebende Schnittgrößen: $\Delta N_{t,d} = 25,82$ kN, $\Delta M_{y,d} = 0,99$ kNm, $\Delta M_{z,d} = 0,92$ kNm

 $A = 16 \times 16 = 256 \text{ cm}^2$ $W_{v,z} = 16 \times 16^2 / 6 = 682 \text{ cm}^3$

Die folgende Bedingung nach BEKS, 10.2.7 muss erfüllt sein:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_{red} \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \le 1$$

Berechnung der Betriebsfestigkeiten mit Beiwert k_{fat} nach Tabelle 3-3, Seite 42

$$f_{t,0,fat,d} = \frac{k_{fat} \cdot f_{t,0,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_{M,fat}} = \frac{0.5 \cdot 1.95 \cdot 0.7}{1.0} = 0.6825 \text{ kN / cm}^2$$
$$f_{m,y,fat,d} = f_{m,z,fat,d} = \frac{k_{fat} \cdot f_{m,y,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_{M,fat}} = \frac{0.3 \cdot 2.80 \cdot 0.7}{1.0} = 0.588 \text{ kN / cm}^2$$

Nachweis:

$$\frac{\Delta N_{t,0,d} / A}{f_{t,0,fat,f}} + \frac{\Delta M_{y,d} / W}{f_{m,fat,d}} + k_{red} \cdot \frac{\Delta M_{z,d} / W}{f_{m,fat,d}} \le 1$$

$$\frac{25,82 / 256}{0,6825} + \frac{0,99 \cdot 10^2 / 682}{0,588} + 1,0 \cdot \frac{0,92 \cdot 10^2 / 682}{0,588} = 0,148 + 0,247 + 0,229 = 0,62 \le 1$$

6.6.3.2 Nachweis des Schlitzblech-Anschlusses am Fußpunkt

Für Stabdübel- bzw. Passbolzenverbindungen sind weder in DIN V ENV 1995-2 noch in [28] k_{fat} -Werte aufgeführt. Nach [28] sind nur sehr wenige Versuche zum Ermüdungsverhalten von Stabdübeln bekannt. Die Untersuchungen von MÖHLER UND MAIER (1973) deuten jedoch auf gute Zeitfestigkeitseigenschaften dieses Verbindungsmittels hin. Eine Vielzahl von gebauten, dynamisch belasteten Holzbauten beweist diese Aussage (siehe z.B. [29] und [36]).

Das Ermüdungsverhalten von Stabdübeln und Passbolzen wird ähnlich dem Ermüdungsverhalten anderer stiftförmiger Verbindungsmittel eingeschätzt und deshalb mit dem k_{fat}-Wert von Nagelverbindungen gerechnet.

Maßgebende Schnittgrößen: $\Delta F_{t,d}$ = 18,41 kN im Stab 6 bei LF 1

Geringes Anschlussmoment und Querkraft aus Zugstabanschluss wird vernachlässigt. Aus der Bemessung in 6.5.7.2 ergibt sich: Passbolzen M12, Festigkeitsklasse 8.8

$$R_{\rm k} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{2 \cdot 153490 \cdot 29,58 \cdot 12} = 14762 \text{ N} = 14,76 \text{ kN}$$

Für Passbolzen darf nach 12.3 (8) R_k um ΔR_k erhöht werden:

$$\Delta R_{k} = min\{0, 25 \times R_{k}; 0, 25 \times R_{axk}\} = 0, 25 \cdot 14, 76 = 3,69 \text{ kN}$$

Die charakteristische Gesamttragfähigkeit des Anschlusses beträgt dann:

$$R_{k,8} = n_{Reihe} \cdot n_{SF} \cdot n_{ef} \cdot (R_k + \Delta R_k) = 2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot (14,76 + 3,69) = 231,73 \text{ kN}$$

Der Bemessungswert der Betriebs-Tragfähigkeit des Gesamtanschlusses ergibt sich zu:

$$R_{\text{fat,d}} = \frac{k_{\text{fat,Nagel}} \cdot k_{\text{mod}} \cdot R_{\text{k}}}{\gamma_{\text{M,fat}}} = \frac{0,15 \cdot 0,7 \cdot 231,73}{1,0} = 24,33 \text{ kN}$$

Nachweis:

$$\frac{\Delta F_{t,d}}{R_{fat,d}} = \frac{18,41}{24,33} = 0,76 \le 1$$

6.7 Nachweis der dynamischen Stabilität

6.7.1 Annahmen

Wie bereits im Kapitel 3.3.2 "Dynamische Eigenschaften des Baustoffes Holz" erläutert, herrschen insbesondere bei der Bestimmung eines dynamischen E-Moduls Unklarheiten. Auch inwiefern freie Bewitterung Einfluss auf den dynamischen E-Modul hat, ist der vorliegenden Literatur nicht zu entnehmen.

Verwendet wird deshalb der charakteristische Steifigkeitskennwert nach BEKS, Tabelle M9 für BS 28h parallel zur Faser: $E_{0,05} = 10500 \text{ N/mm}^2$. Dieser Wert entspricht in etwa dem nach "alter" DIN 1052 verwendetem E-Modul für vergleichbares, homogenes BS 14 bei freier Bewitterung: $12000 \times 5/6 = 10000 \text{ N/mm}^2$. Die Richtigkeit dieser Annahme wird durch ein Telefonat [35] mit Dipl. Ing. Mathias Gerold bestätigt.

Auf eine 1,1-fache Erhöhung des E-Moduls $E_{0,05}$ bei dynamischer Belastung nach GÖRLACHER (1984), wie zum Beispiel in [36] beschrieben, wird hier aufgrund des unsicheren Wissensstands verzichtet. Bei der Verwendung des Schubmoduls *G* wird analog verfahren.

Für den Verbundquerschnitt im oberen Turmbereich wurde die Steifigkeit des Block-verleimten Querschnitts angenommen.

6.7.2 Eigenfrequenzanalyse

Die Ergebnisse aus RS-DYN, unter den im Abschnitt 6.3 und oben aufgeführten Annahmen, sind in Tabelle 6-11 zu sehen. Weitere Eigenfrequenzen und Angaben können dem Anhang 8.3 entnommen werden.

Biege- Eigenform	Eigenfrequenz aus RS-DYN	Eigenfrequenzbereich ± 5%	Erregerfrequenzbereiche nach Tabelle 4-4 (± 5%)
Nr.	[Hz]	[Hz]	[Hz]
1	3,66	3,48 – 3,85	2,11 - 2,33 (133 min⁻¹) 3,16 - 3,50 (200 min⁻¹)
2	12,41	11,79 – 13,03	6,33 - 6,99 (133 min⁻¹) 9,50 - 10,49 (200 min⁻¹)

Tabelle 6-11: Eigenfrequenzbereiche der bemessenen Variante

Wie in der Zeile der 1.Biegeeigenform zu erkennen ist, kommt es zu einem geringfügigen Überschneiden der rechnerischen Frequenzbereiche. Bedenkt man die Vielzahl an ungünstigen Annahmen (Bodendrehfeder, E-Modul u.a.) so ist diese ca. 0,5 %-Überschreitung im Rahmen des Vertretbaren.

Als zusätzliche Sicherheit zu dem beinnahe eingehaltenen, nach [6] geforderten 10 %-Abstand zwischen Eigen- und Erregerfrequenz, verfügt die Gondel aeroSmart über einen so genannten Schüttelschalter. Das hieße, im Resonanzfall würde durch das Aufschwingen der Turmkonstruktion die Sicherheitsbremse ausgelöst und der Rotor mit dem 4-fachen Bremsmoment zum

Stillstand gebracht werden. Dies sollte jedoch verständlicherweise möglichst vermieden werden.

Letzte Gewissheit über die Höhe der Eigenfrequenzen und somit über die dynamische Stabilität kann über eine problemlos durchzuführende Frequenzmessung am erstellten Bauwerk erlangt werden.

Der Einfluss der Verschieblichkeit von Verbindungsmitteln und der Bodendrehfederung der Fundamentplatte ist bei einem Vergleich der Eigenfrequenzen der Vorbemessungs-Variante mit der hier besprochenen Variante gut zu erkennen. Der in Tabelle 5-13 angegebene Wert für die beispielsweise 1.Biegeeigenfrequenz ergibt sich zu 4,13 Hz. Unter Berücksichtigung der Verbindungsmittel-Verschieblichkeit und der Bodendrehfederung ergibt sich nach Tabelle 6-11 ein Wert von 3,66 Hz und somit eine um ca. 12 % niedrigere Eigenfrequenz. Dies bedeutet eine erhebliche Reduzierung, die besonders auf die Verschieblichkeit der Verbindungsmittel zurückzuführen ist.

Zur Veranschaulichung werden die Ergebnisse in ein Resonanzdiagramm, wie im Abschnitt 2.3 beschrieben, eingetragen.



Diagramm 6-1: Resonanzdiagramm der bemessenen Variante

Der anhand eines Kreises gekennzeichnete Bereich zeigt die leichte Überschneidung der 1-P Erregerfrequenz mit der 1.Biegeeigenfrequenz.

Die Strich-Markierungen an den Kreuzungspunkten Biegefrequenzlinie und Nenndrehzahlengerade zeigen dabei die anzunehmende ± 5%-Schwankung der Biege-Eigenformen an.

Die beiden Eigenformen der Biegeschwingungen sind abschließend in Abbildung 6-21 zu sehen.



Abbildung 6-21: 1. und 2. Biegeeigenform der bemessenen Variante