

**Windenergieanlagen –  
Teil 6: Auslegungsanforderungen an Türme und Fundamente**

**Inhalt**

|                                                                                                                                | Seite |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Nationales Vorwort .....                                                                                                       | 2     |
| Einleitung .....                                                                                                               | 9     |
| 1 Anwendungsbereich .....                                                                                                      | 10    |
| 2 Normative Verweisungen .....                                                                                                 | 10    |
| 3 Begriffe .....                                                                                                               | 11    |
| 4 Symbole und Abkürzungen .....                                                                                                | 15    |
| 4.1 Symbole .....                                                                                                              | 15    |
| 4.2 Abkürzungen .....                                                                                                          | 17    |
| 5 Grundlage für die Auslegung einschließlich Belastung.....                                                                    | 18    |
| 5.1 Anwendungsbereich.....                                                                                                     | 18    |
| 5.2 Grundlage für die Auslegung .....                                                                                          | 18    |
| 5.2.1 Grundlegende Prinzipien.....                                                                                             | 18    |
| 5.2.2 Dauerhaftigkeit .....                                                                                                    | 19    |
| 5.2.3 Prinzipien der Grenzzustandsauslegung .....                                                                              | 19    |
| 5.2.4 Strukturanalyse .....                                                                                                    | 19    |
| 5.2.5 Beurteilungen durch Prüfungen .....                                                                                      | 20    |
| 5.3 Materialien.....                                                                                                           | 20    |
| 5.4 Lasten.....                                                                                                                | 20    |
| 5.4.1 Anwendung der Lastfälle und von $ps_{fl}$ nach IEC 61400-1 oder IEC 61400-2 .....                                        | 20    |
| 5.4.2 Ersetzen von Teilsicherheitsbeiwerten für Materialien nach IEC 61400-1 oder IEC 61400-2.....                             | 20    |
| 5.4.3 Lastniveaus der Gebrauchstauglichkeit .....                                                                              | 21    |
| 5.4.4 Lastkombinationen im ULS .....                                                                                           | 22    |
| 5.4.5 Bei Lastberechnungen zu verwendende Werte für die Strukturdämpfung .....                                                 | 22    |
| 5.4.6 Definitionen und Verfahren zur Anwendung innerer Lasten .....                                                            | 23    |
| 5.4.7 Definition erforderlicher Lastdaten für eine Betriebsfestigkeitsanalyse .....                                            | 23    |
| 5.4.8 Definition erforderlicher Lastdaten für extreme Lastniveaus .....                                                        | 23    |
| 5.4.9 Wirbelerregte Schwingung .....                                                                                           | 24    |
| 5.4.10 Lasten aufgrund geometrischer Toleranzen und elastische Verformungen bezüglich des senkrechten Standes des Turmes ..... | 24    |
| 5.5 Anforderungen an die Berichterstattung zu Lastdaten und Schnittstellen .....                                               | 25    |
| 5.5.1 Zweck .....                                                                                                              | 25    |
| 5.5.2 Spezifikation einer Windenergieanlage.....                                                                               | 25    |
| 5.5.3 Daten zum zeitlichen Verlauf .....                                                                                       | 26    |
| 5.5.4 Lastursprung .....                                                                                                       | 26    |
| 5.5.5 Lastkomponenten.....                                                                                                     | 26    |

|       | Seite                                                                                       |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5.6   | Allgemeine Anforderungen an die strukturelle Auslegung ..... 26                             |
| 5.6.1 | Einfluss der Sekundärkonstruktion ..... 26                                                  |
| 5.6.2 | Betriebsfestigkeitsanalyse ..... 26                                                         |
| 5.7   | Lieferdokumentation ..... 27                                                                |
| 6     | Stahltürme ..... 27                                                                         |
| 6.1   | Anwendungsbereich ..... 27                                                                  |
| 6.2   | Grundlage für die Auslegung ..... 27                                                        |
| 6.3   | Materialien ..... 27                                                                        |
| 6.3.1 | Allgemeines ..... 27                                                                        |
| 6.3.2 | Baustähle ..... 27                                                                          |
| 6.3.3 | Schrauben und Fundamentanker ..... 30                                                       |
| 6.4   | Tragfähigkeitsnachweis für Türme und Öffnungen ..... 30                                     |
| 6.4.1 | Allgemeines ..... 30                                                                        |
| 6.4.2 | Teilsicherheitsbeiwerte ..... 30                                                            |
| 6.4.3 | Nachweis der Tragfähigkeit ..... 30                                                         |
| 6.4.4 | Beurteilung des Turmes ..... 30                                                             |
| 6.4.5 | Beurteilungen von Konstruktionselementen ..... 31                                           |
| 6.5   | Stabilität ..... 31                                                                         |
| 6.5.1 | Allgemeines ..... 31                                                                        |
| 6.5.2 | Teilsicherheitsbeiwert ..... 32                                                             |
| 6.5.3 | Bewertung ..... 32                                                                          |
| 6.5.4 | Türrahmen/Versteifungen ..... 32                                                            |
| 6.6   | Grenzzustand der Betriebsfestigkeit ..... 33                                                |
| 6.6.1 | Allgemeines ..... 33                                                                        |
| 6.6.2 | Teilsicherheitsbeiwert für Materialien ..... 33                                             |
| 6.6.3 | Bewertung ..... 34                                                                          |
| 6.6.4 | Elemente ..... 34                                                                           |
| 6.7   | Ringflanschverbindungen ..... 34                                                            |
| 6.7.1 | Auslegungsannahmen und –anforderungen, Ausführung von Ringflanschen ..... 35                |
| 6.7.2 | Analyse des Grenzzustandes der Tragfähigkeit von Flansch und Schraubenverbindungen ..... 36 |
| 6.7.3 | Analyse des Grenzzustandes der Betriebsfestigkeit von Schraubenverbindungen ..... 37        |
| 6.8   | Schraubenverbindungen, die durch Reibung scherfest sind ..... 38                            |
| 6.8.1 | Allgemeine Anforderungen ..... 38                                                           |
| 6.8.2 | Durch Prüfung unterstützte Auslegung ..... 39                                               |
| 6.8.3 | Auslegung ohne Prüfung ..... 40                                                             |
| 7     | Türme und Fundamente aus Beton ..... 40                                                     |
| 7.1   | Anwendungsbereich ..... 40                                                                  |
| 7.2   | Grundlage für die Auslegung ..... 41                                                        |

|        | Seite                                                               |    |
|--------|---------------------------------------------------------------------|----|
| 7.2.1  | Bezugsnorm für die Auslegung von Beton.....                         | 41 |
| 7.2.2  | Teilsicherheitsbeiwerte.....                                        | 41 |
| 7.2.3  | Basisvariablen.....                                                 | 42 |
| 7.3    | Materialien.....                                                    | 44 |
| 7.4    | Dauerhaftigkeit.....                                                | 44 |
| 7.4.1  | Anforderungen an die Dauerhaftigkeit.....                           | 44 |
| 7.4.2  | Expositionsklassen.....                                             | 44 |
| 7.4.3  | Betondeckung.....                                                   | 44 |
| 7.5    | Strukturanalyse.....                                                | 44 |
| 7.5.1  | Finite-Element-Analyse.....                                         | 44 |
| 7.5.2  | Fundamentplatten.....                                               | 45 |
| 7.5.3  | Bereiche mit geometrischen oder lastbezogenen Diskontinuitäten..... | 46 |
| 7.5.4  | Anordnungen von einbetonierten Ankerschrauben.....                  | 46 |
| 7.6    | Beton-Beton-Fugen.....                                              | 46 |
| 7.7    | Grenzzustand der Tragfähigkeit.....                                 | 47 |
| 7.7.1  | Allgemeines.....                                                    | 47 |
| 7.7.2  | Schubbeanspruchung und Stoßscherung.....                            | 47 |
| 7.8    | Grenzzustand der Betriebsfestigkeit.....                            | 47 |
| 7.8.1  | Allgemeines.....                                                    | 47 |
| 7.8.2  | Ermüdungsversagen von Bewehrung und Spannstahl.....                 | 48 |
| 7.8.3  | Ermüdungsversagen von Beton.....                                    | 48 |
| 7.9    | Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.....                         | 48 |
| 7.9.1  | Lastabhängige Verringerung der Steifigkeit.....                     | 48 |
| 7.9.2  | Begrenzung der Spannungen.....                                      | 48 |
| 7.9.3  | Begrenzung der Rissbreiten.....                                     | 49 |
| 7.9.4  | Verformungen.....                                                   | 49 |
| 7.10   | Bauausführung.....                                                  | 49 |
| 7.10.1 | Anwendungsbereich.....                                              | 49 |
| 7.10.2 | Normative Verweisungen.....                                         | 50 |
| 7.10.3 | Inspektion von Materialien und Erzeugnissen.....                    | 50 |
| 7.10.4 | Traggerüst und Schalung.....                                        | 50 |
| 7.10.5 | Bewehrung und eingebetteter Stahl.....                              | 50 |
| 7.10.6 | Vorspannen.....                                                     | 50 |
| 7.10.7 | Betonfertigteile.....                                               | 50 |
| 7.10.8 | Geometrische Toleranzen.....                                        | 51 |
| 8      | Fundamente – Geotechnische Auslegung.....                           | 51 |
| 8.1    | Anwendungsbereich.....                                              | 51 |
| 8.2    | Grundlage für die Auslegung.....                                    | 51 |

|                                                                                                    | Seite |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 8.2.1 Allgemeines .....                                                                            | 51    |
| 8.2.2 Geotechnische Grenzzustände .....                                                            | 52    |
| 8.3 Geotechnische Daten .....                                                                      | 52    |
| 8.3.1 Allgemeines .....                                                                            | 52    |
| 8.3.2 Besondere Betrachtungen .....                                                                | 54    |
| 8.4 Bauaufsicht, Bauüberwachung und Instandhaltung von Bauwerken .....                             | 55    |
| 8.5 Schwerkraftgründungen .....                                                                    | 55    |
| 8.5.1 Allgemeines .....                                                                            | 55    |
| 8.5.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) .....                                                   | 56    |
| 8.5.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) .....                                           | 59    |
| 8.6 Pfahlfundamente .....                                                                          | 61    |
| 8.6.1 Allgemeines .....                                                                            | 61    |
| 8.6.2 Pfahlbelastungen .....                                                                       | 61    |
| 8.6.3 Grenzzustand der Tragfähigkeit .....                                                         | 62    |
| 8.6.4 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit .....                                                 | 63    |
| 8.7 Im Fels verankerte Fundamente .....                                                            | 64    |
| 8.7.1 Allgemeines .....                                                                            | 64    |
| 8.7.2 Arten von Felsankerfundamenten .....                                                         | 64    |
| 8.7.3 Geotechnische Daten .....                                                                    | 65    |
| 8.7.4 Korrosionsschutz .....                                                                       | 65    |
| 8.7.5 Inspektion und Wartung von Ankern .....                                                      | 65    |
| 8.7.6 Nachspanntoleranzen und -verluste .....                                                      | 65    |
| 8.7.7 Grenzzustand der Tragfähigkeit .....                                                         | 66    |
| 8.7.8 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit .....                                                 | 67    |
| 8.7.9 Prüfung auf Robustheit .....                                                                 | 67    |
| 8.7.10 Auslegung des Felsankers .....                                                              | 67    |
| 9 Anforderungen an Betrieb, Wartung und Instandhaltung .....                                       | 70    |
| 9.1 Betrieb, Instandhaltung und Kontrollmessungen .....                                            | 70    |
| 9.2 Regelmäßige bautechnische Inspektionen .....                                                   | 70    |
| 9.3 Inspektionen von eingebetteten Stahlschalungen .....                                           | 70    |
| 9.4 Erhaltung der Schraubenspannung .....                                                          | 70    |
| 9.5 Strukturzustandsüberwachung .....                                                              | 71    |
| Anhang A (informativ) Liste von geeigneten Regelwerken in Bezug auf die Berechnungsgrundlage ..... | 72    |
| A.1 Allgemeines .....                                                                              | 72    |
| A.2 Bezugsdokumente .....                                                                          | 72    |
| Anhang B (informativ) Liste von Werkstoffen für Baustahl .....                                     | 73    |
| B.1 Allgemeines .....                                                                              | 73    |
| B.2 Baustahl .....                                                                                 | 73    |

|                                                                                                   | Seite |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Anhang C (informativ) Schrauben .....                                                             | 74    |
| C.1 Allgemeines .....                                                                             | 74    |
| C.2 Bezugsdokumente .....                                                                         | 75    |
| Anhang D (informativ) Z-Werte für Baustahl .....                                                  | 76    |
| D.1 Definition des Z-Wertes nach dem Eurocode .....                                               | 76    |
| Anhang E (informativ) Vereinfachter Beulsicherheitsnachweis für Öffnungen in Stahlrohtürmen ..... | 77    |
| E.1 Allgemeines .....                                                                             | 77    |
| Anhang F (informativ) Ermüdungssicherheitsnachweis .....                                          | 80    |
| F.1 Allgemeines .....                                                                             | 80    |
| Anhang G (informativ) Verfahren zur Verifizierung von Ringflanschen .....                         | 81    |
| G.1 Verfahren nach Petersen/Seidel .....                                                          | 81    |
| G.1.1 Grundlagen .....                                                                            | 81    |
| G.1.2 Berechnungsverfahren .....                                                                  | 81    |
| G.1.3 Erweiterung nach Tobinaga .....                                                             | 84    |
| G.2 Verfahren nach Schmidt/Neuper .....                                                           | 86    |
| G.2.1 Grundlagen .....                                                                            | 86    |
| G.2.2 Gleichungen für die trilineare Näherung .....                                               | 87    |
| G.3 Bezugsdokument .....                                                                          | 88    |
| Anhang H (informativ) Begrenzung der Rissbreiten – Leitfaden zu 7.9.3 .....                       | 89    |
| H.1 Europa – Begrenzung der Rissbreiten auf der Grundlage von Eurocode 2 .....                    | 89    |
| H.2 Japan – Begrenzung der Rissbreiten auf der Grundlage Japanischer Normen .....                 | 89    |
| H.3 USA – Begrenzung der Rissbreiten auf der Grundlage von ACI 318 .....                          | 90    |
| H.4 Bezugsdokumente .....                                                                         | 90    |
| Anhang I (informativ) Finite-Element-Analyse für Beton .....                                      | 91    |
| I.1 Zielsetzungen der Analyse .....                                                               | 91    |
| I.2 Reihenfolge und Art der Elemente: .....                                                       | 91    |
| I.3 Konstitutive Modellierung .....                                                               | 92    |
| I.4 Lösungsverfahren .....                                                                        | 92    |
| I.5 Implizierter Ansatz .....                                                                     | 92    |
| I.6 Schritte bei der Durchführung einer Finite-Element-Analyse .....                              | 93    |
| I.7 Überprüfung der Ergebnisse .....                                                              | 93    |
| I.8 Verweisungen .....                                                                            | 93    |
| Anhang J (normativ) Verankerung zwischen Turm und Fundament .....                                 | 95    |
| J.1 Allgemeines .....                                                                             | 95    |
| J.2 Eingebettete Verankerungen .....                                                              | 95    |
| J.3 Verschraubte Verankerungen .....                                                              | 96    |
| J.4 Verpressmörtel .....                                                                          | 96    |
| J.5 Ankerschrauben .....                                                                          | 96    |

|                                                                                                              | Seite |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| J.6 Eingebetteter Ring .....                                                                                 | 96    |
| J.7 Lastübertragung der Verankerung .....                                                                    | 97    |
| Anhang K (informativ) Stabwerkprofil .....                                                                   | 98    |
| K.1 Allgemeines .....                                                                                        | 98    |
| K.2 Bezugsdokumente .....                                                                                    | 102   |
| Anhang L (informativ) Leitfaden zur Auswahl des Bodenmoduls und der Rotationssteifigkeit des Fundaments..... | 104   |
| L.1 Allgemeines .....                                                                                        | 104   |
| L.2 Bodenmodell.....                                                                                         | 104   |
| L.3 Dynamische Rotationssteifigkeit .....                                                                    | 107   |
| L.4 Statische Rotationssteifigkeit .....                                                                     | 108   |
| Anhang M (informativ) Leitfaden für die Auslegung von im Fels verankerten Fundamenten .....                  | 110   |
| M.1 Allgemeines .....                                                                                        | 110   |
| M.2 Korrosionsschutz .....                                                                                   | 110   |
| M.2.1 Standardanker .....                                                                                    | 110   |
| M.2.2 Korrosionsschutz von Stabankern.....                                                                   | 111   |
| M.3 Produktzulassung .....                                                                                   | 111   |
| M.4 Auslegung von Felsankern .....                                                                           | 112   |
| M.5 Auslegung von Verpressmörtel .....                                                                       | 112   |
| M.6 Prüfung und Ausführung.....                                                                              | 112   |
| M.7 Eignungs-/Leistungsprüfung.....                                                                          | 112   |
| M.8 Abnahmeprüfung .....                                                                                     | 113   |
| M.9 Ergänzende erweiterte Zugversuche .....                                                                  | 113   |
| Anhang N (informativ) Innere Lasten – Erläuterung von inneren Lasten .....                                   | 114   |
| N.1 Allgemeines .....                                                                                        | 114   |
| Anhang O (informativ) Schätzung der Erdbebenlast für Türme und Fundamente von Windenergieanlagen.....        | 115   |
| O.1 Allgemeines .....                                                                                        | 115   |
| O.2 Vertikale Bodenbewegung .....                                                                            | 115   |
| O.3 Strukturmodell .....                                                                                     | 115   |
| O.4 Bodenverstärkung .....                                                                                   | 116   |
| O.5 Simulation im Zeitbereich .....                                                                          | 117   |
| O.6 Bezugsdokumente .....                                                                                    | 117   |
| Anhang P (informativ) Strukturdämpfungsgrad für Türme von Windenergieanlagen .....                           | 118   |
| P.1 Allgemeines .....                                                                                        | 118   |
| P.2 Strukturdämpfungsgrad der ersten Eigenform .....                                                         | 118   |
| P.3 Strukturdämpfungsgrad der zweiten Eigenform .....                                                        | 119   |
| P.4 Dämpfung von höheren Eigenformen .....                                                                   | 119   |
| P.5 Bezugsdokument.....                                                                                      | 120   |

|                                                                                                                                          | Seite |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Anhang Q (informativ) Leitfaden für Teilsicherheitsbeiwerte für geotechnische Grenzzustände .....                                        | 121   |
| Q.1 Allgemeines .....                                                                                                                    | 121   |
| Q.2 Gleichgewicht .....                                                                                                                  | 121   |
| Q.3 Tragfähigkeit .....                                                                                                                  | 121   |
| Q.4 Gleitwiderstand .....                                                                                                                | 122   |
| Q.5 Gesamtstabilität .....                                                                                                               | 122   |
| <b>Bilder</b>                                                                                                                            |       |
| Bild 1 – Flanschbezeichnungen am Beispiel eines L-Flansches .....                                                                        | 29    |
| Bild 2 – Geometrie der Türöffnung .....                                                                                                  | 33    |
| Bild 3 – Flanschklaffungen $k$ im Bereich der Turmwand .....                                                                             | 35    |
| Bild 4 – Schraubenkraft als Funktion der Wandkraft .....                                                                                 | 37    |
| Bild 5 – S/N-Kurve für die Kerbfallklasse 36 .....                                                                                       | 38    |
| Bild 6 – Temperaturentwicklungen um den Turmquerschnitt herum .....                                                                      | 42    |
| Bild 7 – Veranschaulichung der Felsankerlänge .....                                                                                      | 69    |
| Bild E.1 – Umlaufend randversteifte Öffnung .....                                                                                        | 78    |
| Bild E.2 – Definition von $W_s$ und $t_s$ nach JSCE .....                                                                                | 79    |
| Bild G.1 – Vereinfachung des Systems auf ein Segmentmodell .....                                                                         | 81    |
| Bild G.2 – Lage von Fließgelenken bei verschiedenen Versagensarten .....                                                                 | 83    |
| Bild G.3 – Geometrische Parameter .....                                                                                                  | 83    |
| Bild G.4 – Anpassungsbeiwert $\lambda$ für verschiedene $\alpha$ [1] .....                                                               | 86    |
| Bild G.5 – Trilineare Annäherung des nichtlinearen Verhältnisses zwischen Schraubenkraft und<br>Zugkraft der Schraubenverbindung .....   | 87    |
| Bild K.1 – Beispiel für die Auslegung eines wandartigen Trägers unter Anwendung des<br>Stabwerkverfahrens .....                          | 98    |
| Bild K.2 – Einfache Formen von Stabwerkmodellen .....                                                                                    | 98    |
| Bild K.3 – Drei Beispiele für das Aufnehmen einer Last in einem wandartigen Träger .....                                                 | 99    |
| Bild K.4 – Stabwerkmodelle für ein Felsankerfundament .....                                                                              | 101   |
| Bild K.5 – Obere Zugstrebenbewehrung in einem Felsankerfundament .....                                                                   | 102   |
| Bild L.1 – Beispiel einer Spannungs-Dehnungs-Beziehung für Boden .....                                                                   | 105   |
| Bild L.2 – Belastungs- und Entlastungsverhalten von Boden .....                                                                          | 105   |
| Bild L.3 – Änderung des Schermoduls in Abhängigkeit von der Bodendehnung .....                                                           | 106   |
| Bild L.4 – Verringerung der Rotationssteifigkeit aufgrund einer Lastausmitte .....                                                       | 108   |
| Bild L.5 – Erläuterndes Beispiel für die Verringerung der Rotationssteifigkeit des Fundaments<br>aufgrund zunehmender Lastausmitte ..... | 109   |
| Bild M.1 – Schnitt durch Fels und Anker .....                                                                                            | 110   |
| Bild M.2 – Typische Ankerkonfiguration mit Korrosionsschutz .....                                                                        | 111   |
| Bild O.1 – Strukturmodell für das Antwortspektrumverfahren .....                                                                         | 116   |
| Bild P.1 – Dämpfungsgrad der ersten Eigenform für Stahltürme von Windenergieanlagen .....                                                | 119   |

**Tabellen**

|                                                                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabelle 1 – Toleranzen für den Flansch .....                                                                                               | 35  |
| Tabelle 2 – Zusammenfassung geotechnischer Grenzzustände .....                                                                             | 52  |
| Tabelle B.1 – Nationale und regionale Stahlnormen und -sorten.....                                                                         | 73  |
| Tabelle E.1 – Beiwerte für Gleichung (E.2) .....                                                                                           | 78  |
| Tabelle H.1 – Grenzwert der Rissbreite auf der Grundlage Japanischer Normen [1].....                                                       | 89  |
| Tabelle P.1 – Dämpfungskoeffizienten .....                                                                                                 | 118 |
| Tabelle Q.1 – Mindest-Teilsicherheitsbeiwerte für den Grenzzustand der Lagesicherheit (für<br>Anwendungen in Europa und Nordamerika) ..... | 121 |
| Tabelle Q.2 – Mindest-Teilsicherheitsbeiwerte für den Grenzzustand der Lagesicherheit (JSCE) .....                                         | 121 |
| Tabelle Q.3 – Mindest-Teilsicherheitsbeiwerte für Materialien und Widerstände für den<br>Grenzzustand der Tragfähigkeit, ULS .....         | 122 |
| Tabelle Q.5 – Mindest-Teilsicherheitsbeiwerte für Materialien und Widerstände für den<br>Grenzzustand der Gesamtstabilität, ULS .....      | 123 |