

Turmentwicklungen

Konstruktionsmerkmale, aktuelle Herausforderungen

Dr.-Ing. Claus Goralski
Prüfingenieur für Baustatik (Massivbau & Metallbau)
Schweißfachingenieur SFI, IWE

Donnerstag 09.11.2023 14.00 – 14.30

Fest im Wind: Komponente Turm
Das FUCHS Forum - Windenergietage 2023 / Raum 21



- seit 2018 Geschäftsführender Gesellschafter HB+P Ingenieure GmbH
- seit 2015 Prüflingenieur für Baustatik (Fachrichtung Massivbau & Metallbau)
- seit 2014 Geschäftsführender Gesellschafter H+P Ingenieure GmbH
- seit 2011 Referent an der SLV GSI München (Schweißtechnik)
- seit 2011 Schweißfachingenieur (SFI), DVS® - IIW international
- 2006 - 2014 H+P Ingenieure GmbH & Co. KG: Bereichsleiter Windenergie
- 2000 – 2006 Wissenschaftlicher Angestellter am IMB, RWTH Aachen und Promotion
- 1993 – 1999 Studium Bauingenieurwesen an RWTH Aachen

Zertifiziert nach: DIN EN 1090, DIN EN ISO 9712

Projektgruppe Windenergie, Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)

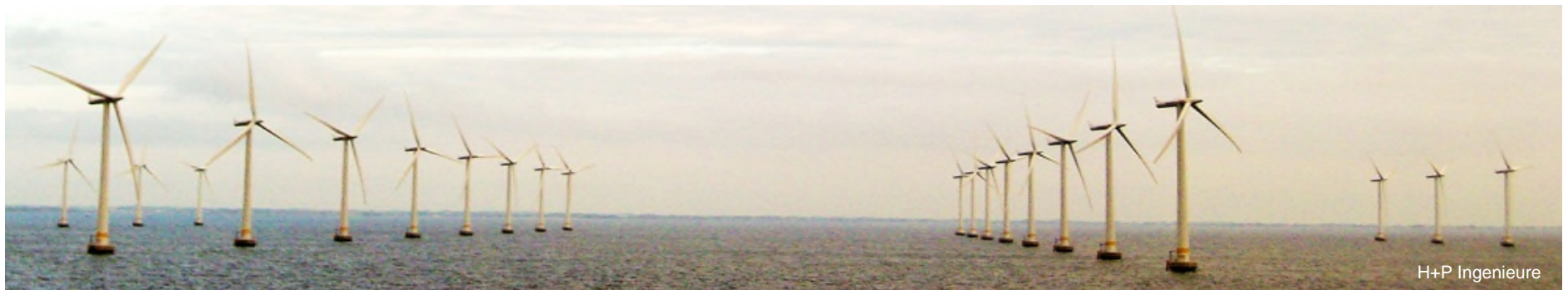
NA 005-51-07-05 Windenergieanlagen: Verbindungen zwischen Stahl und Beton

Stellv. Vorsitzende des Sachverständigen Beirats des Bundesverband Windenergie BWE

Mitglied verschiedener Arbeitskreise Bundesverband Windenergie BWE und Fördergesellschaft Windenergie FGW



Dr.-Ing. Claus Goralski





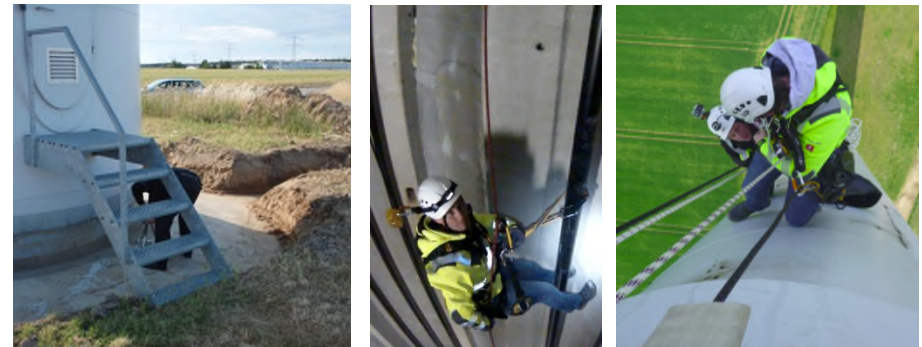
Tragwerksplanung



Statische Prüfung



Produktentwicklung



Wiederkehrende Prüfung
Gutachten Weiterbetrieb 20 + x
Sanierung / Verstärkung

Technische Grundlagen Onshore-Windenergieanlagen

- Konstruktionsarten
- Normen und Richtlinien
- Maßgebende Bauteile und Nachweise

Herausforderungen des Designs

- Konstruktive Beschränkungen
- Leistungsfähigkeit der Berechnungsmodelle
- Leistungsfähigkeit der Materialien und Materialmodelle

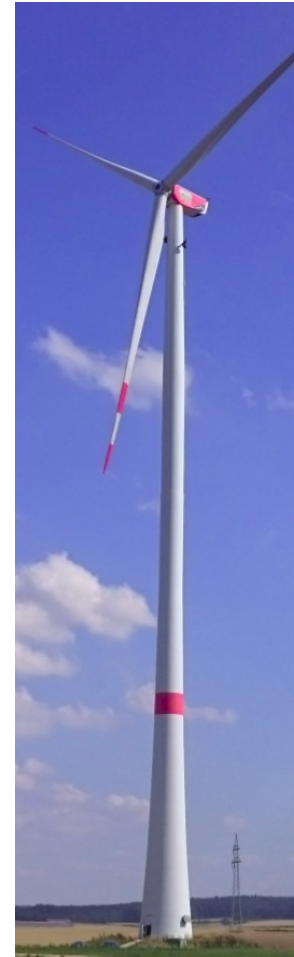
Aktuelle Herausforderungen und Diskussionen

- Transporte
- Wartung und Instandhaltung

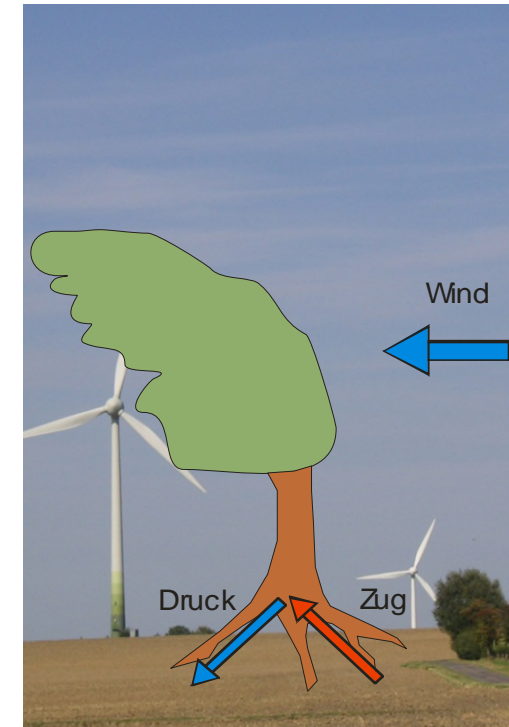


Entwicklung

| 1995 | 2000-2005 | 2016 | 2020 | 2023 |
|----------------|-----------|-------|-------|------|
| Nabenhöhe ~70m | ~100m | ~140m | ~165m | ~170 |
| Rotor ~50m | ~80m | ~120m | ~150m | ~170 |



- + sicherer Lastabtrag (Gebrauchslasten und Extremlasten)
u.a. Betriebslasten, Starkwindereignisse, Erdbeben
- + dauerhafte Konstruktion und Ermüdungswiderstand
Auslegung i.d.R. für 20 + x Jahre
Wirtschaftlichkeit hängt von Nutzungsdauer und Unterhaltungsaufwand ab.
- + Gewährleistung der dynamischen Bauwerkseigenschaften
Einfluss auf die Beanspruchung der Maschine und die Betriebslasten
- + Tragwiderstand auch bei extremen Umgebungsbedingungen
niedrige Temperaturen, korrosive Medien
- + Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit der Konstruktion
optimierter Einsatz von Betonstahl und Beton
Transportabmessungen, Bauzeit und Rückbau



H+P Ingenieure

Die Beanspruchung und die Anforderungen an die Tragstruktur haben stark zugenommen.

Die Windenergie hat wesentlichen Anteil an der Energiewende.

Damit nehmen die Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit aber auch der Robustheit zu

Aus der Natur:

Ein gesunder Baum wächst stets an zwei Seiten,
den Ästen mit den Früchten und am Stamm mit den Wurzeln.

Beton(fertigteil)turm



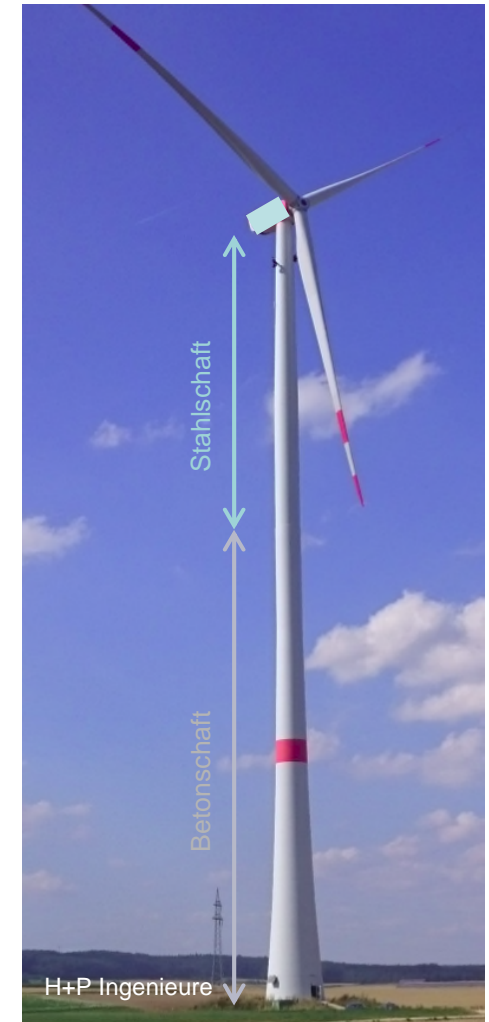
Gittermast



Stahlrohrturm

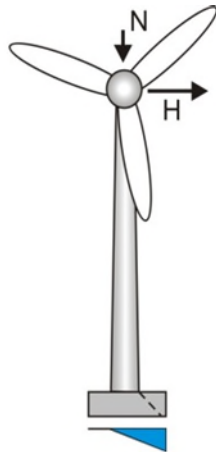


Hybridturm



Status:

- bauaufsichtlich eingeführt seit 1993
aktuell: VV TB Verwaltungsvorschrift
Technische Baubestimmungen
- Fokus liegt auf der Lastermittlung
und der Tragstruktur



**Aktueller Stand der Technik:
DIN 18088 Tragstrukturen für WEA**

Verweis +
Zusatzanforderungen aus

Eurocodes

Status:

- harmonisierte Europäische Norm
- bauaufsichtlich eingeführt
- Fokus liegt auf der Tragstruktur



Praxisempfehlungen für

- Interaktion Maschinenteknik und Tragwerk
- Analytische und praktische Untersuchungen
- Anforderung an Sachverständige
- Bauüberwachung und Bauwerksprüfungen



Bundesverband WindEnergie

BWE – Grundsätze:

- Wiederkehrende Prüfungen
- Weiterbetrieb von WEA
- Tragwerk – Turm und Fundament



Bau-Überwachungsverein e.V.

**BÜV-Empfehlungen für die
Überwachung von WEA**

- Kontrollen der Bauausführung
- Wiederkehrende Prüfung

Status: Anwendungsempfehlungen

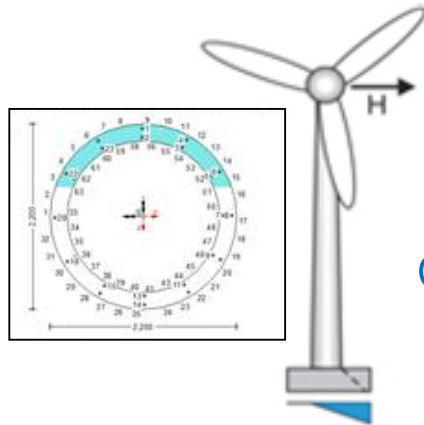
§ 3 Allgemeine Anforderungen

¹Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden; dabei sind die Grundanforderungen an Bauwerke gemäß Anhang I der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 zu berücksichtigen. ²Dies gilt auch für die Beseitigung von Anlagen und bei der Änderung ihrer Nutzung.

Bauteil-Widerstand

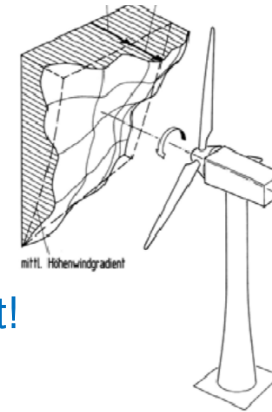
≥

Einwirkende Lasten



Standsicherheit & Lebensdauer!

Gebrauchstauglichkeit & Dauerhaftigkeit!



W-TB

Bautechnische Nachweise

Prüfung 4-Augenprinzip (Prüfamt /Prüfingenieure)

Bauüberwachung (Prüfingenieure)

Wiederkehrende Prüfung im Betrieb



Maschinen Richtlinie CE-Kennzeichen

Struktur-Nachweise

Herstellererklärung (Leistungserklärung)

keine unabhängige Prüfung

Bauüberwachung unklar

Wiederkehrende Prüfung unklar



Stahlurm Rohrturm, geteilter Rohrturm



Hybridturm Ringsegmente / Wandelemente



Hybridturm

maßgebende Bauteile Stahlstruktur

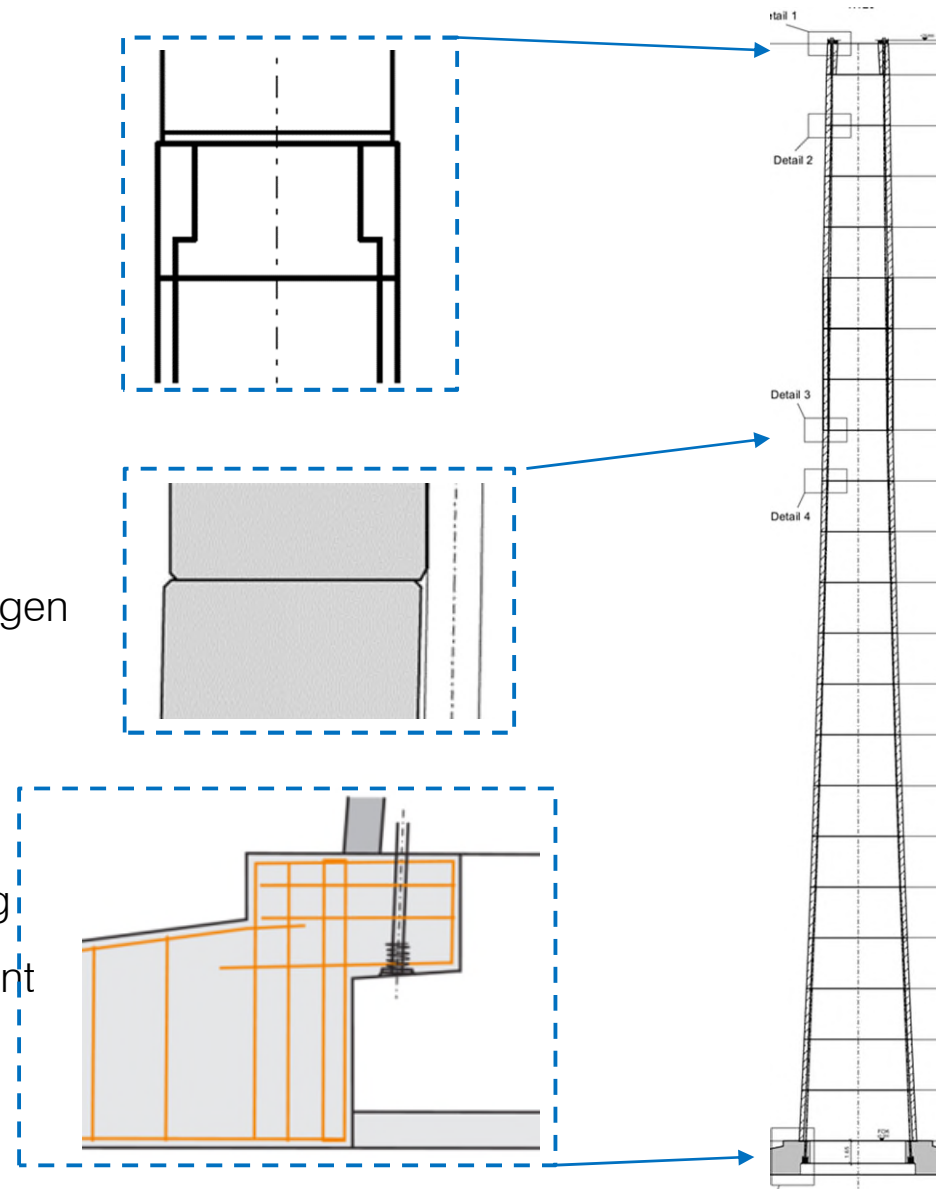
- Öffnungen in der Turmschale
- Tragende Schraubverbindungen

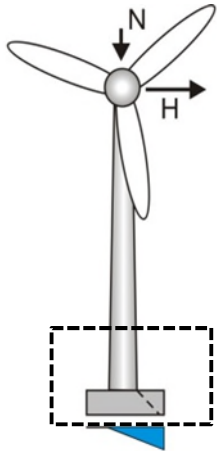
maßgebende Bauteile Betonstruktur

- Übergang Stahlschaft - Spannbetonschaft
- Horizontale Fugen und Querschnittsänderungen
- Vertikale Segmentfugen

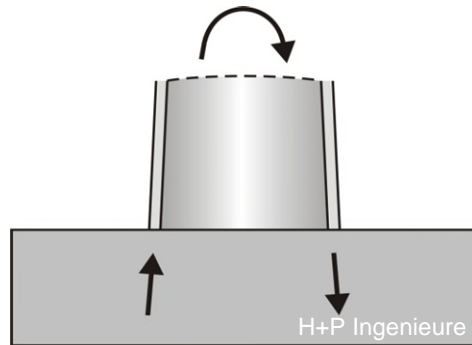
maßgebende Vorspannsystem

- Verankerung der Spannglieder am Übergang
- Verankerung der Spannglieder am Fundament
- Umlenkung der Spannglieder
- Kontakt der Spannglieder zum Bauwerk

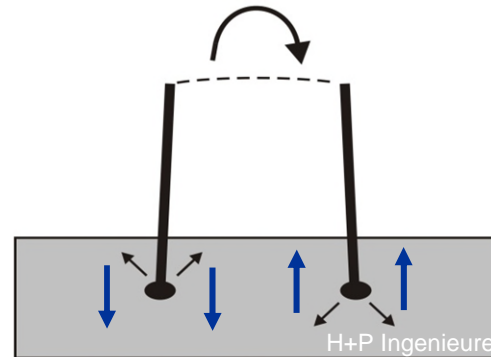




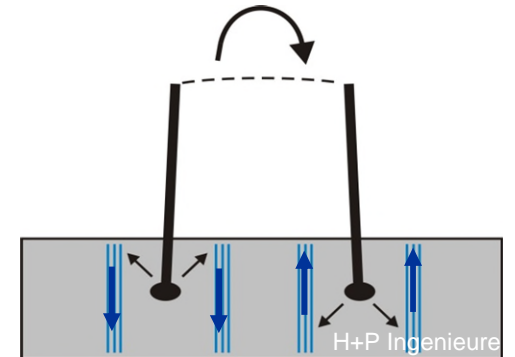
Schnittgrößen



Tragmechanismus

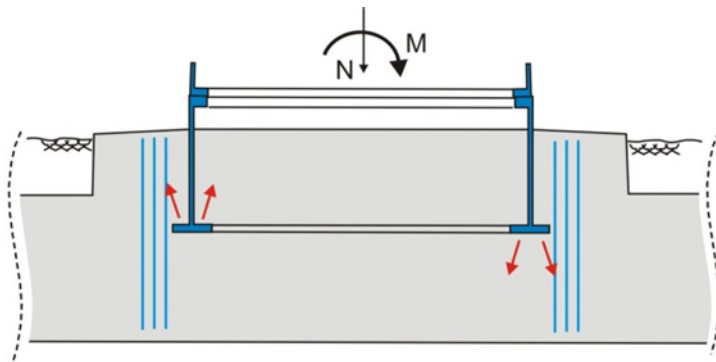


mechanisches Modell



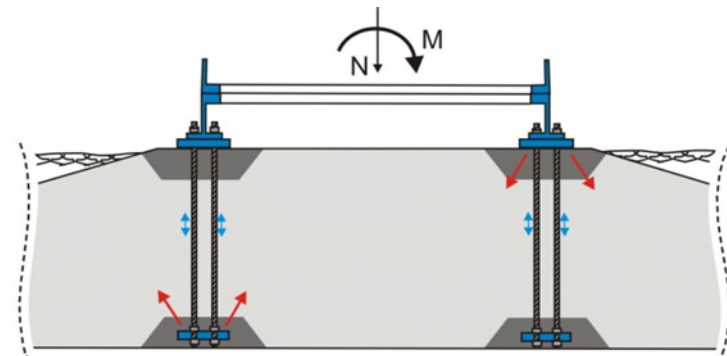
„Stahleinbauteil“

D ~ 4 m; Beton C30/37



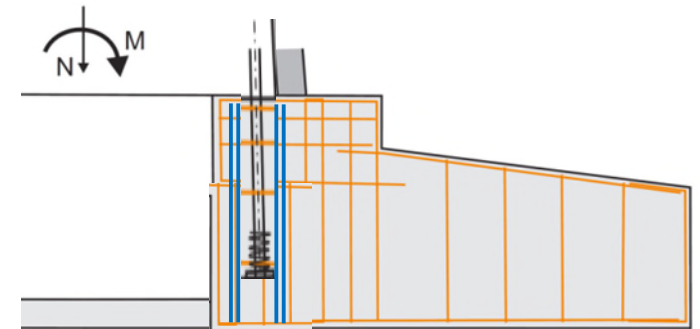
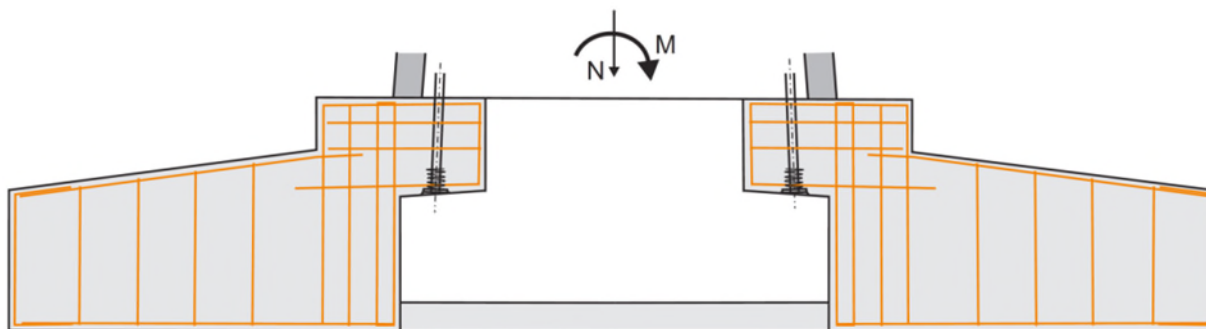
„Ankerkorb“

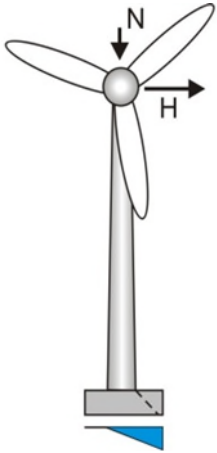
D ~ 5 m (geteilt > 5m); Vergußbeton



„Anbindung Betonturm Spannkeller“

Turmdurchmesser > 7 m; Beton C30/37



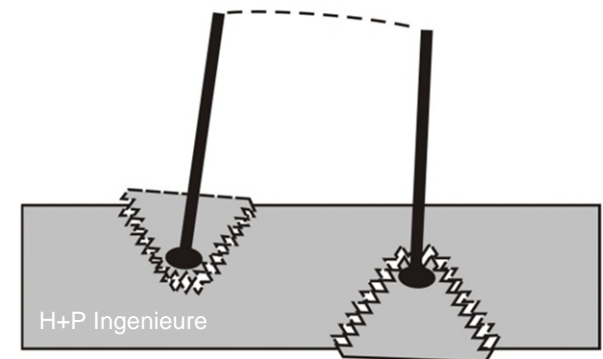


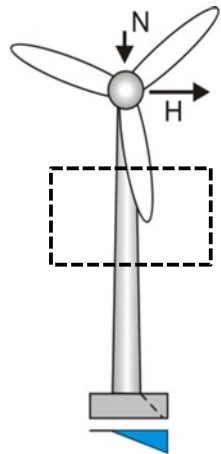
Herausforderung

- Schnittstelle im Material,
in der Planung
in der Ausführung

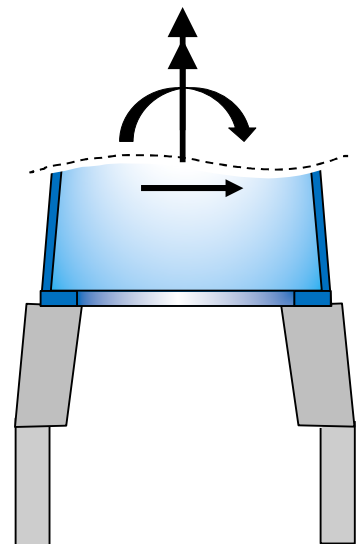
Begrenzende Faktoren

- Vorspannkräfte
- Festigkeiten der verwendeten Betone
und Vergußbetone
- Einbaubarkeit der Betone und Bewehrung

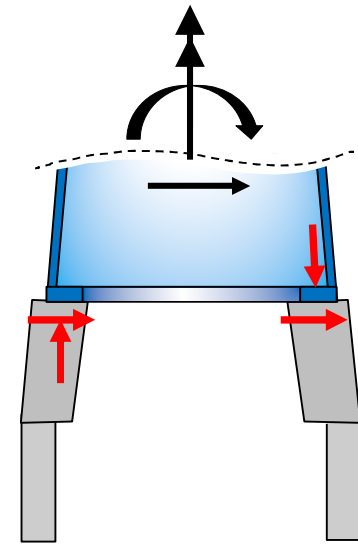




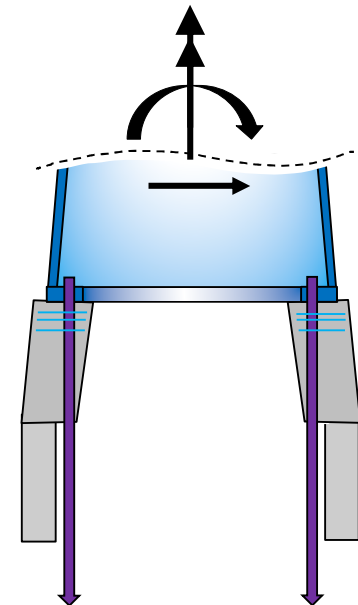
Schnittgrößen



Tragmechanismus

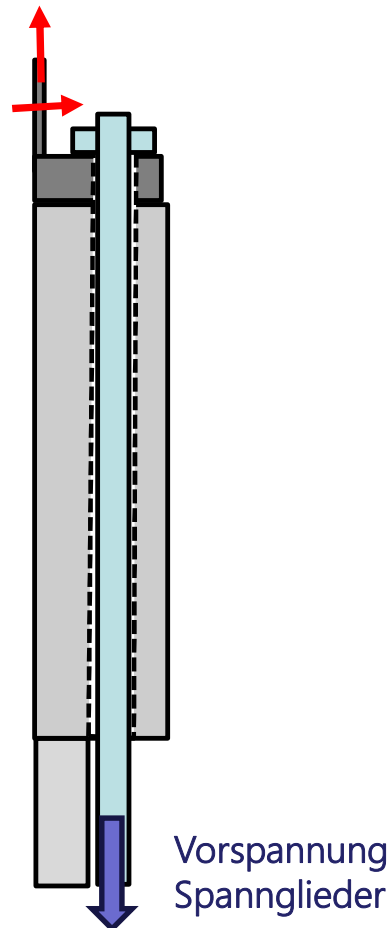


mechanisches Modell



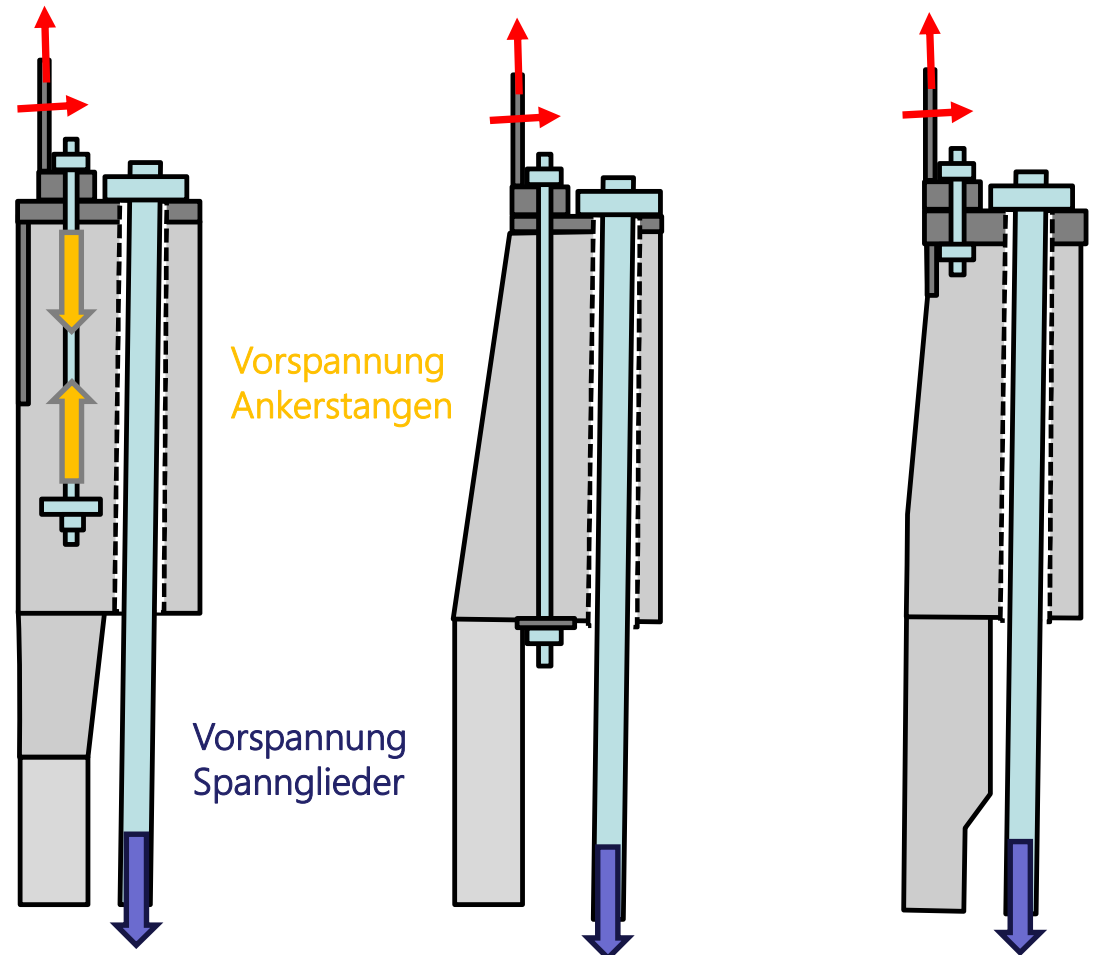
„Aufgespannter Stahlschaft“

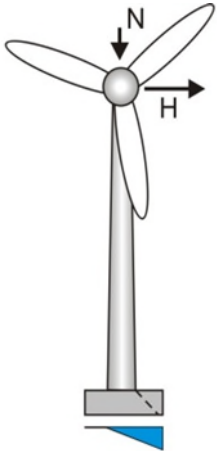
D ~ 4,5 m; Beton C80/95



„Ankerkorb“

D ~ 4,5 m bis 5m; Beton C100/115





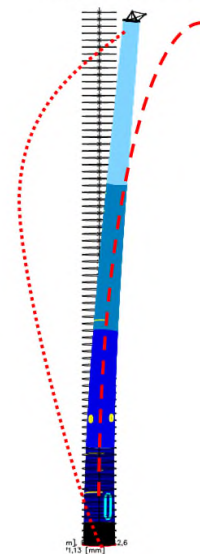
Herausforderung

- Schnittstelle im Material,
in der Planung
in der Ausführung

Begrenzende Faktoren

- Geometriebeschränkungen
infolge Transport und Hebe-Gewichte
Vorgaben aus dem Stahlschaftbereich
- Festigkeiten der verwendeten Materialien
insbesondere Betone
- Einbaubarkeit der Bewehrung
- Imperfektionen und Toleranzen
Geometrische Imperfektionen
- Dynamische Auslegung und Bauwerksfrequenzen

Eigenfrequenz
Bodendrehfeder



Analytische Verfahren, anwendbar für

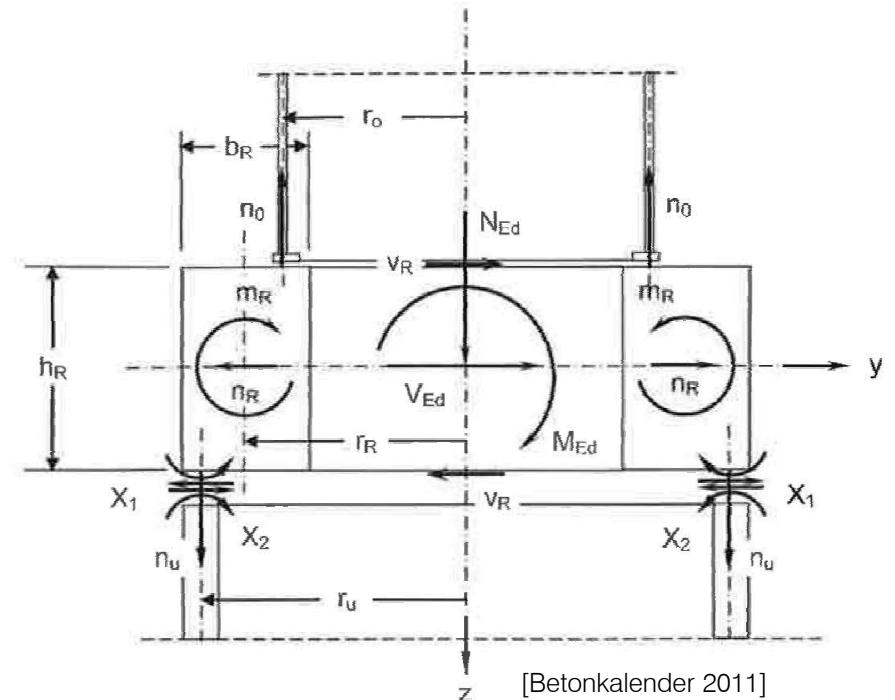
- Vorbemessung
- Ermittlung von Querschnittsbeanspruchungen (globale Beanspruchungen, Schnittgrößen)
- Vergleich verschiedener Geometrien
- Parameter- und Plausibilitäts-Studien

Anwendungsgrenzen, nicht geeignet zur

- Untersuchung des Fugenverhaltens
- Bewertung lokaler Beanspruchungen
- Lebensdaueranalyse
- Verformungsberechnung
- Montage-Toleranzen und Imperfektionen

Randbedingungen zur Anwendung

- Bewertung der Anwendungsgrenzen
- Sicherheitsfaktoren zur Modelgenauigkeit



Finite Elemente Modelle, notwendig zur

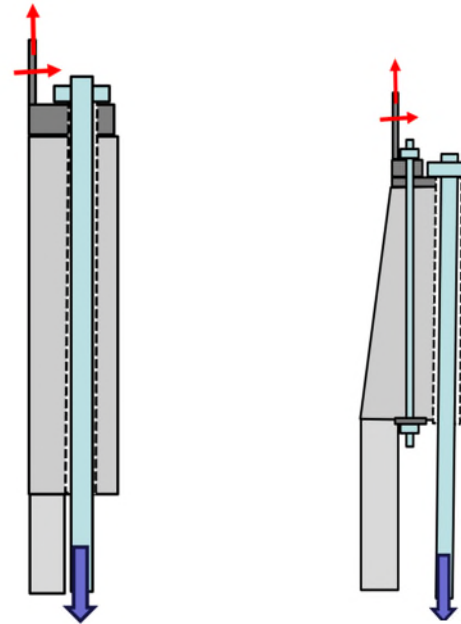
- Untersuchung des Fugenverhaltens
- Verformungsberechnung, insb. lokale Verformungen
- Bewertung lokaler Beanspruchungen
- Lebensdaueranalyse

Anwendungsgrenzen

- Elastische und plastische Berechnung möglich!
- inhomogene Materialien (Beton)
- Montage-Toleranzen und Imperfektionen

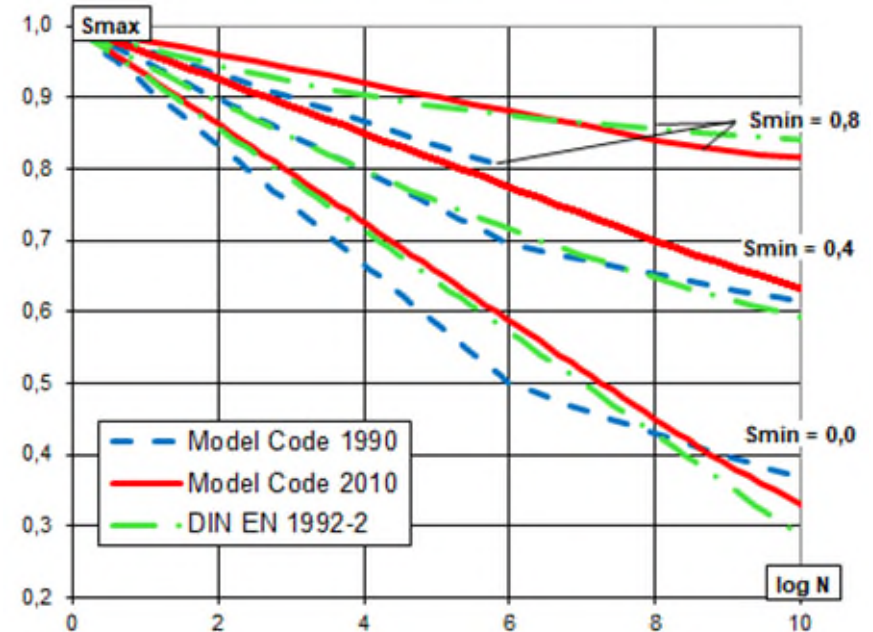
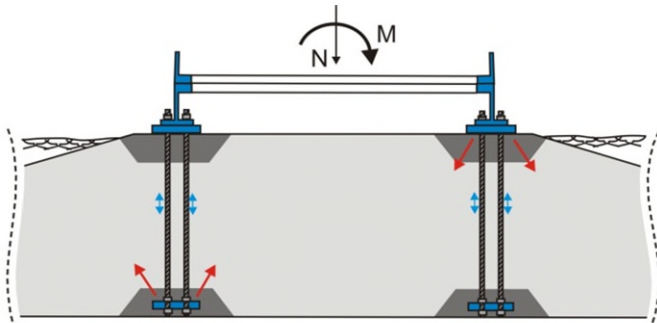
Randbedingungen und Erfordernis

- Bewertung der Anwendungsgrenzen
- Sicherheitsfaktoren zur Modelgenauigkeit



maßgebende Betonspannungen

- Mittelspannung
- Spannungsamplituden



DIBt 2012/2015: Model Code 1990

| | |
|-----------------|------------|
| | D_{Ed} |
| Model Code 1990 | 0,66 |
| Nutzungsdauer | 37,7 Jahre |

DIN 18088-2

| | |
|---------------|-------------|
| | D_{Ed} |
| E DIN 18088-2 | 0,18 |
| Nutzungsdauer | 141,4 Jahre |

DIBt 2012/2015: Model Code 1990

Bemessungswert der Ermüdungsfestigkeit

$$f_{cd,fat} = 0,85 \cdot \beta_{cc}(t) \cdot f_{ck} \cdot (1 - f_{ck}/250) / \gamma_c$$

DIN 18088 bzw. EC2 Teil 2

Bemessungswert der Ermüdungsfestigkeit

$$f_{cd,fat} = 0,85 \cdot \beta_{cc}(t) \cdot f_{ck} \cdot (1 - f_{ck} / 400) / \gamma_c$$

Beschränkende Faktoren der Konstruktion

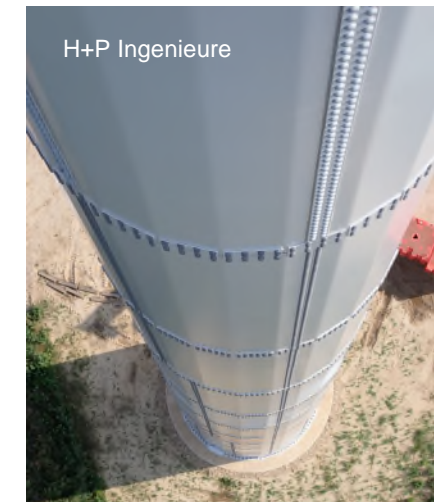
- Transportlängen
- Transportgewichte
- Hebegewichte (Gewicht und Höhe)

Beschränkende Faktoren des Verkehrsweges

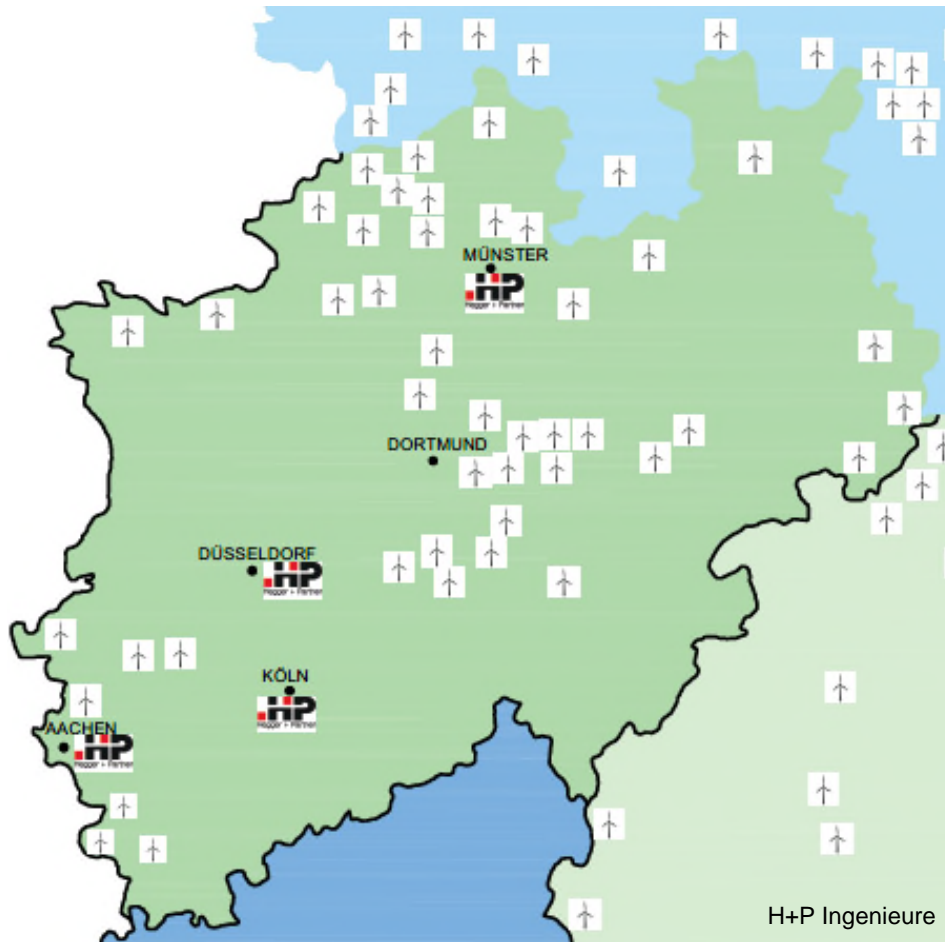
- Durchfahrtshöhen bzw. -breiten
- Tragfähigkeit der Brückenbauwerke

-> Sondergenehmigungen

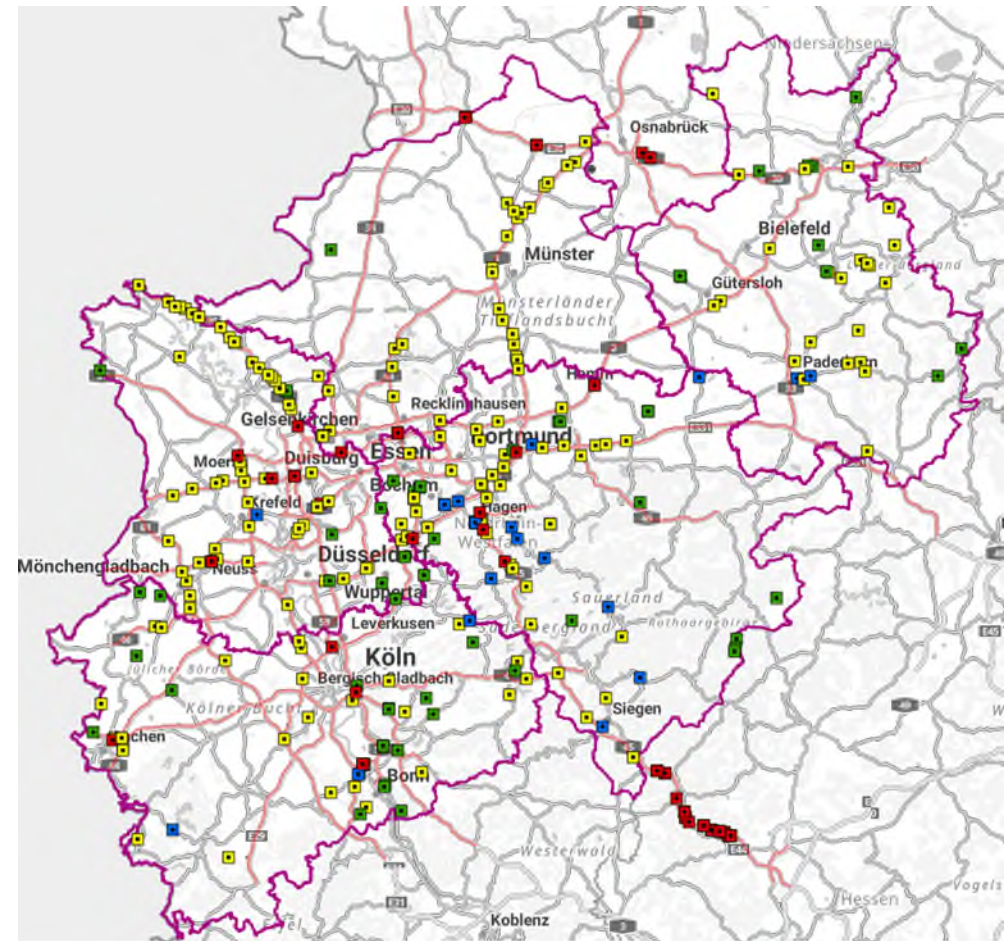
Maßnahmen: geteilte Turmsektionen



NRW Windparks betreut durch H+P

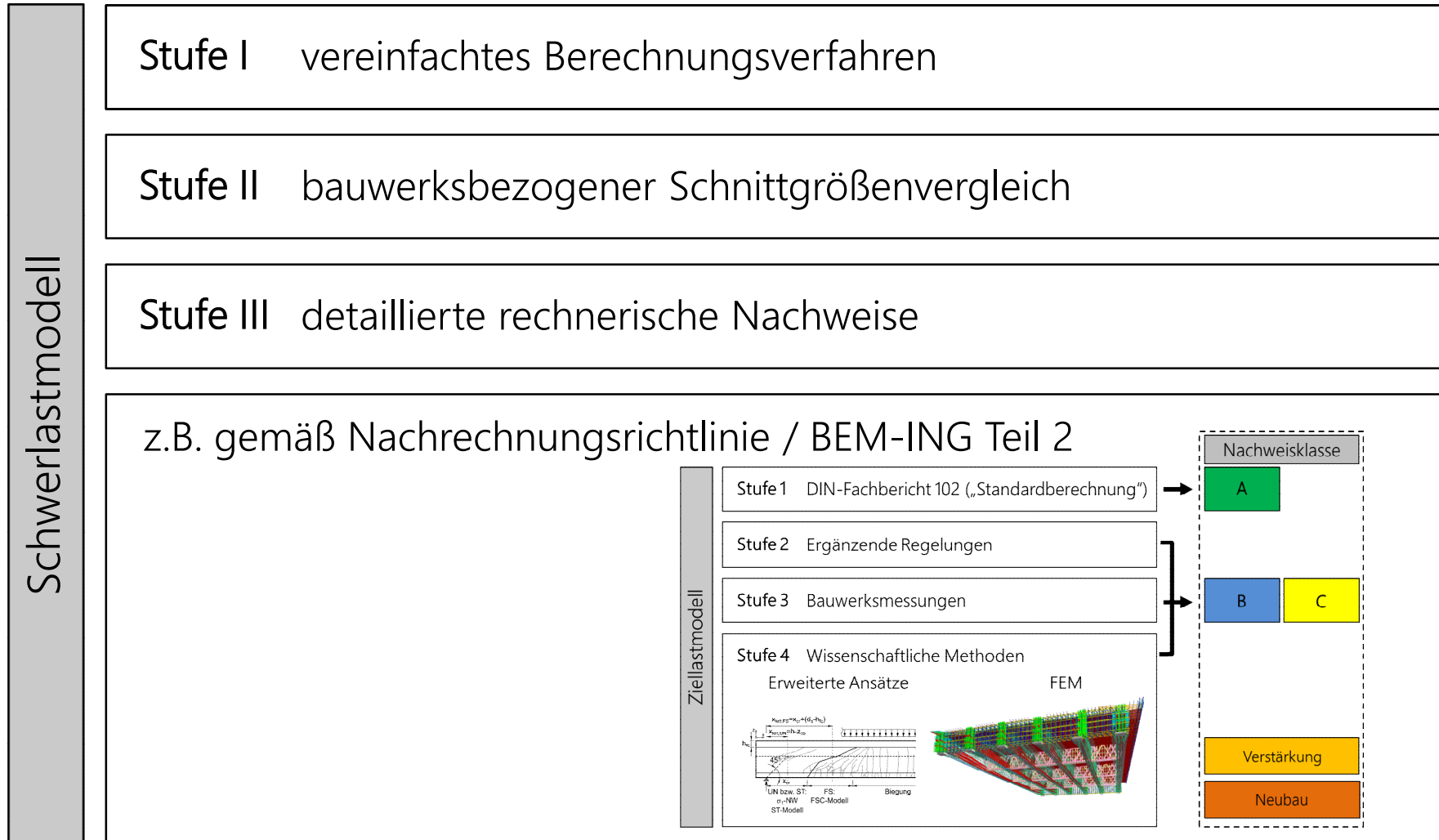


Lastbeschränkte Brücken Strassen.NRW



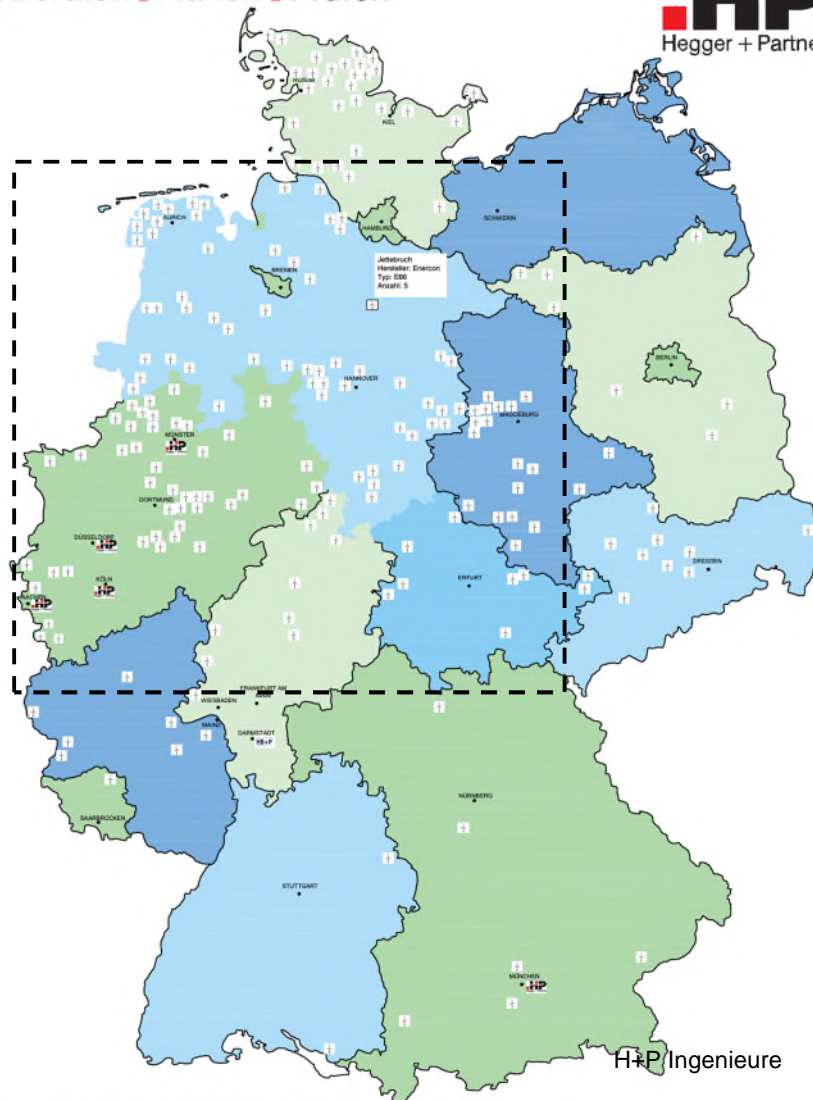
www.giscloud.nrw.de

Mehrstufiges Nachweiskonzept



Stufe II und III kombinierbar mit Überfahrt-Hilfskonstruktion

■ Beraten ■ Planen ■ Prüfen



Der Betrieb von WEA über 20 Jahre Nutzungsdauer und darüber hinaus erfordert:

Wiederkehrende Prüfungen, Wartung und Instandhaltung

der Tragstrukturen und der Maschinentechnischen Bauteile!



VIELEN DANK!

Dr.-Ing. Claus Goralski

| | | | | |
|----------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|----------------------|
| H+P Ingenieure GmbH | ■ Kackertstr. 10 | ■ 52072 Aachen | ■ Tel. 0241- 44 50 30 | ■ Fax 0241 - 4450329 |
| Düsseldorf | Grafenberger Allee 293 | 40237 Düsseldorf | Tel. 0211- 61 02 110 | |
| Köln | Neuenhöfer Allee 49-51 | 50935 Köln | Tel. 0221- 94 10 977 | |
| München | Aschauer Straße 10 | 81549 München | Tel. 089 - 124 705 930 | |
| Münster | Lublinring 12 | 48147 Münster | Tel. 0251- 39 58 04 34 | |
| HB+P Darmstadt | Birkenweg 24 | 64295 Darmstadt | Tel. 06151 - 36 65 0 | |
| HG+P Pullach | Kirchplatz 5 | 82049 Pullach im Isartal | Tel. 089 - 744 198 0 | |
| HF+P Bernkastel-Kues | Mandatstraße 1 | 54470 Bernkastel-Kues | Tel. 06531 - 95 23 10 | |

