

## 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





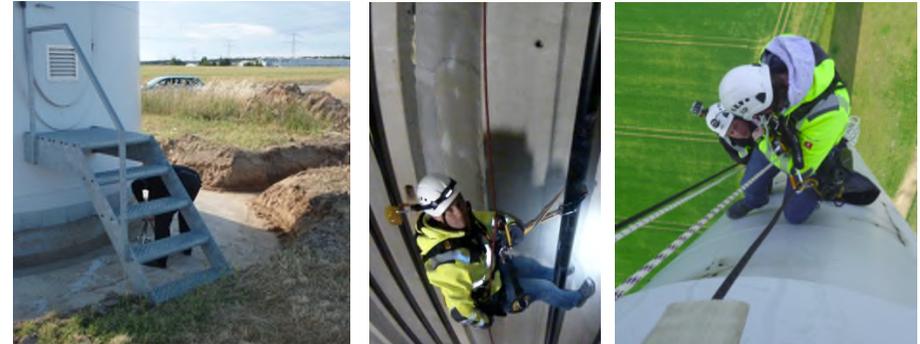
Tragwerksplanung



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

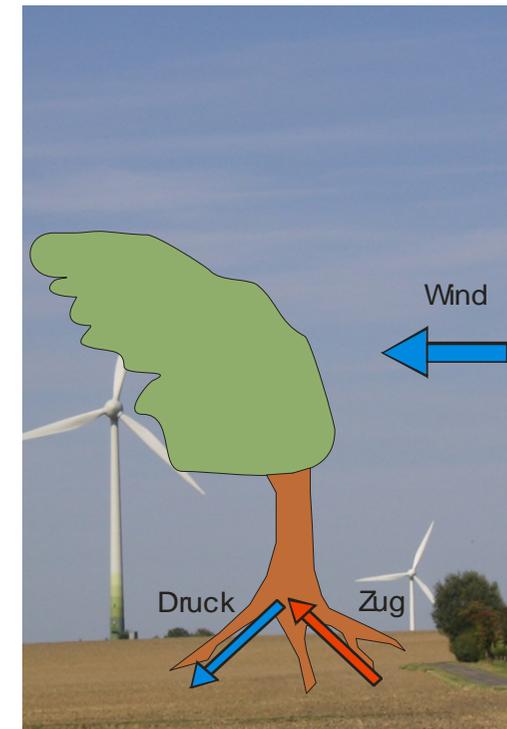


# Entwicklung

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



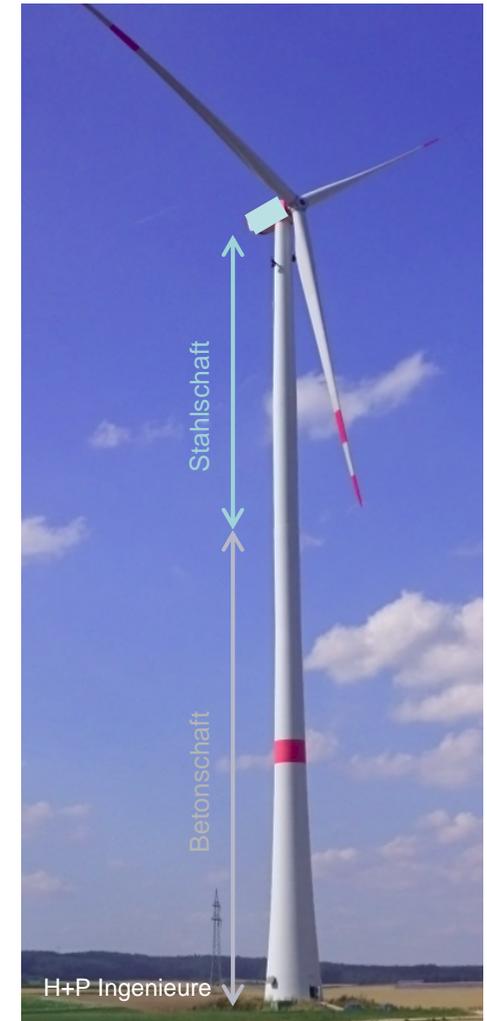
Gittermast



Stahlrohrturm

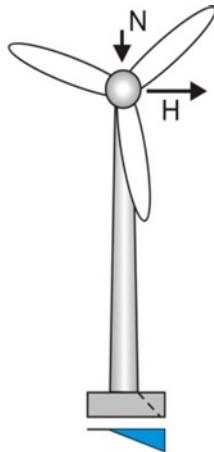


Hybridturm



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

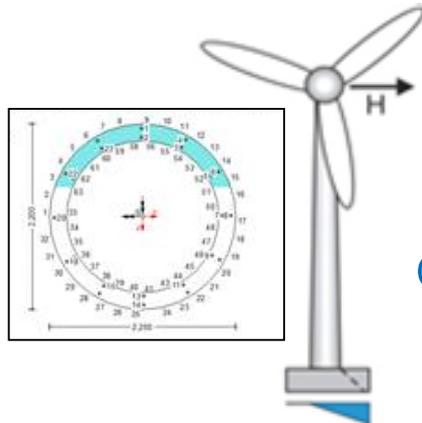
## § 3 Allgemeine Anforderungen

<sup>1</sup>Anlagen 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. <sup>2</sup>Dies gilt auch für die Beseitigung von Anlagen und bei der Änderung ihrer Nutzung.

Bauteil-Widerstand

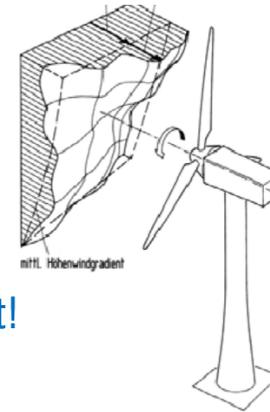
≥

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

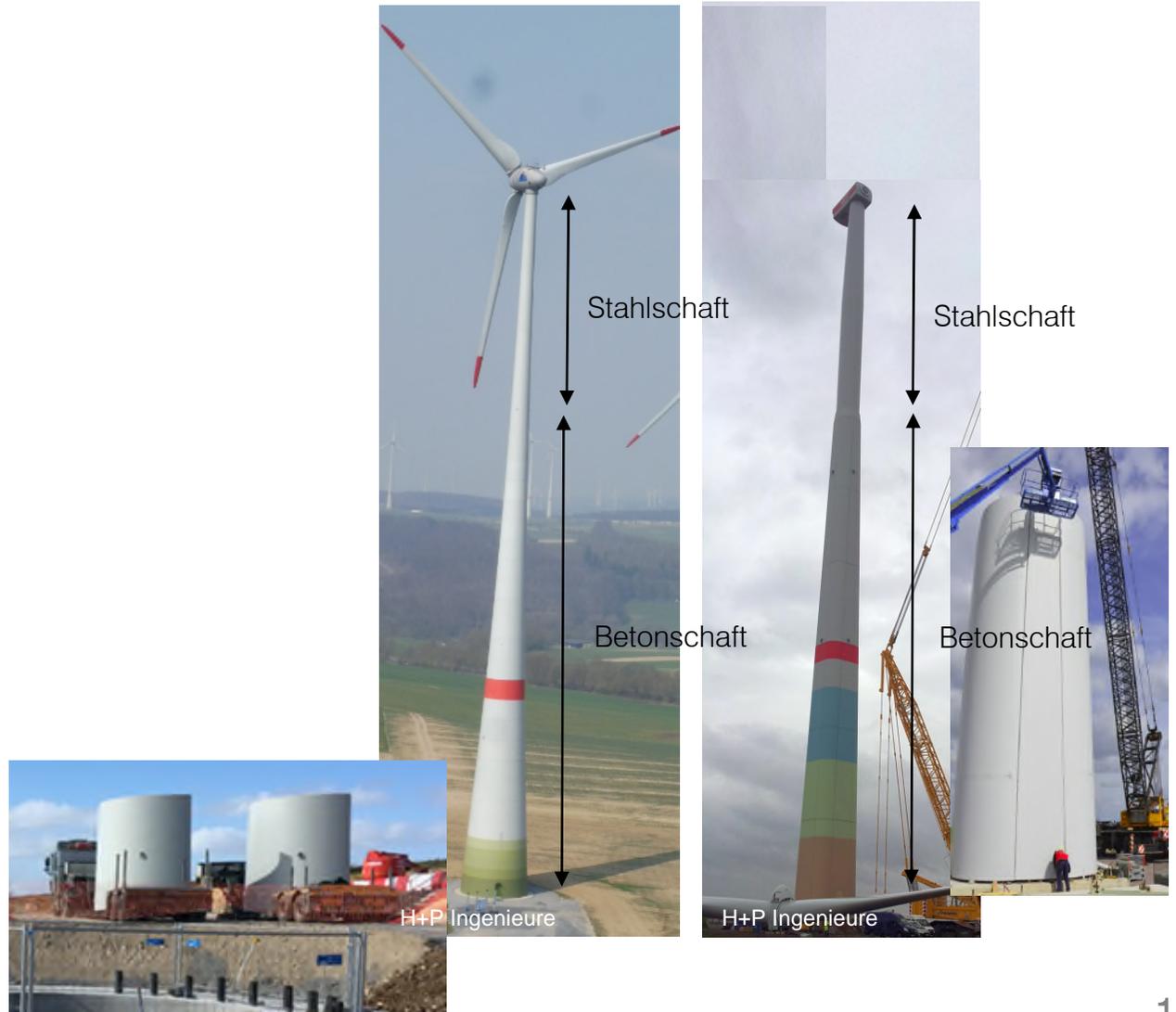
Wiederkehrende Prüfung unklar



## Stahlurm Rohrturm, geteilter Rohrturm



## Hybridturm Ringsegmente / Wandelemente



## Hybridturm

### maßgebende Bauteile Stahlstruktur

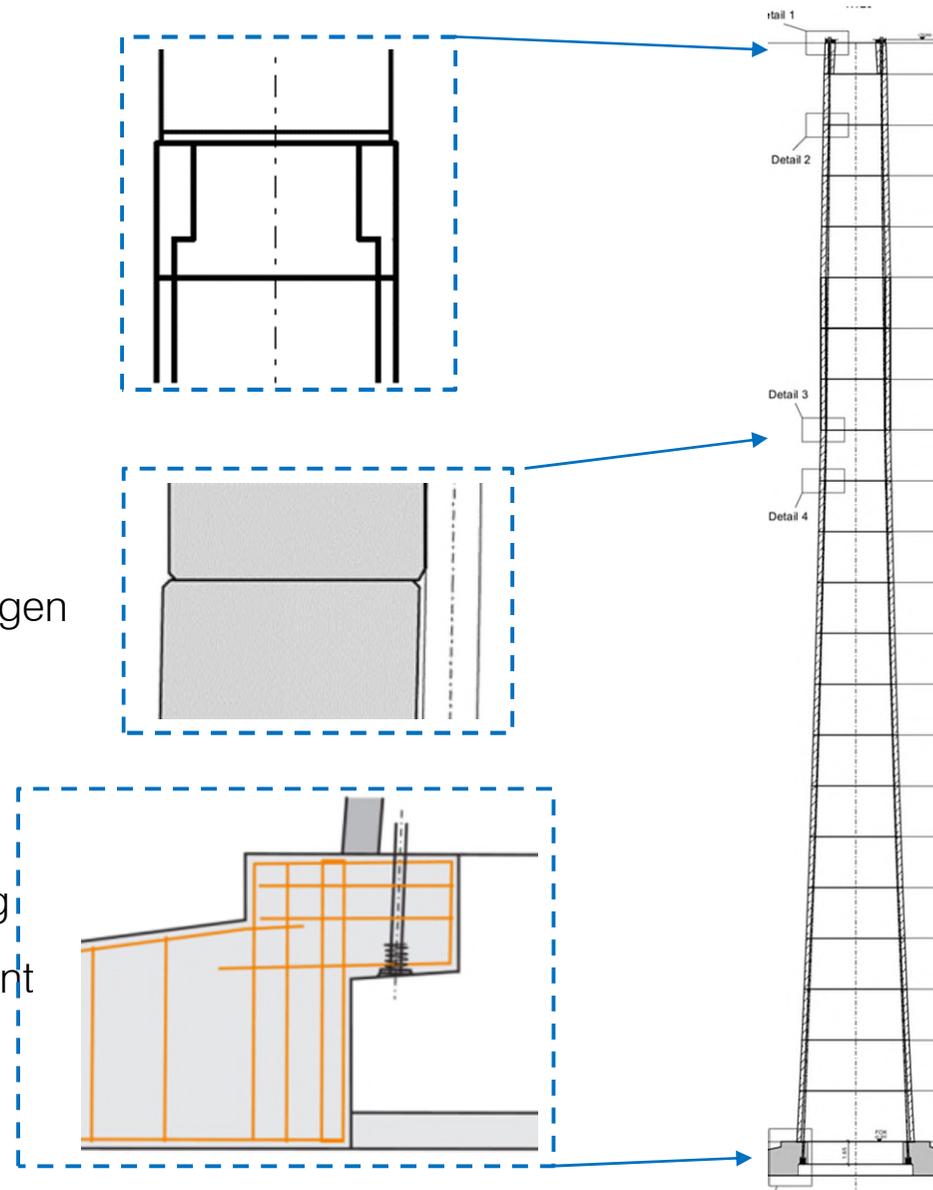
- Öffnungen in der Turmschale
- Tragende Schraubverbindungen

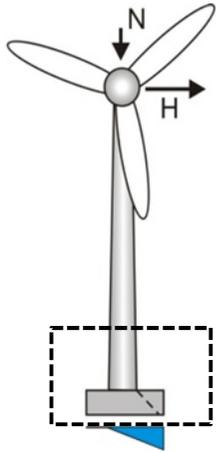
### maßgebende Bauteile Betonstruktur

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

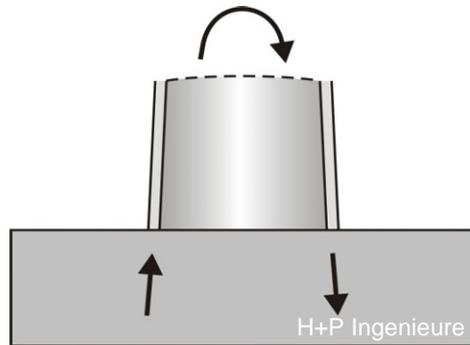
### maßgebende Vorspannsystem

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

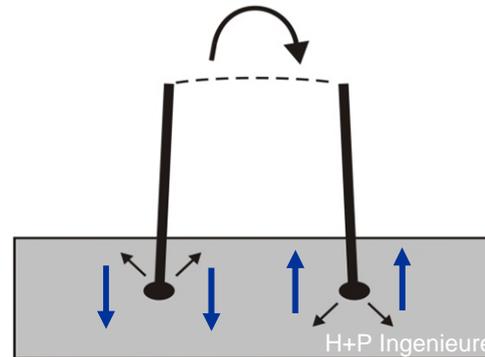




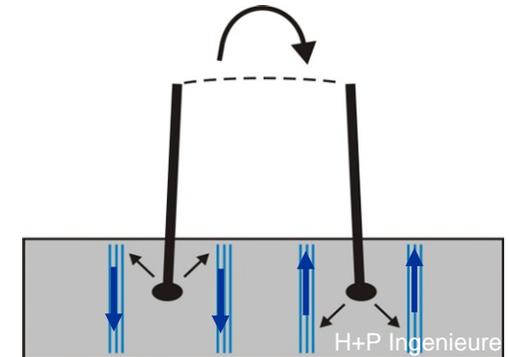
Schnittgrößen



Tragmechanismus

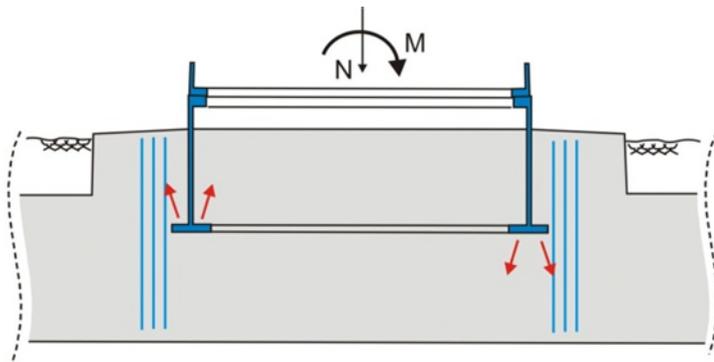


mechanisches Modell



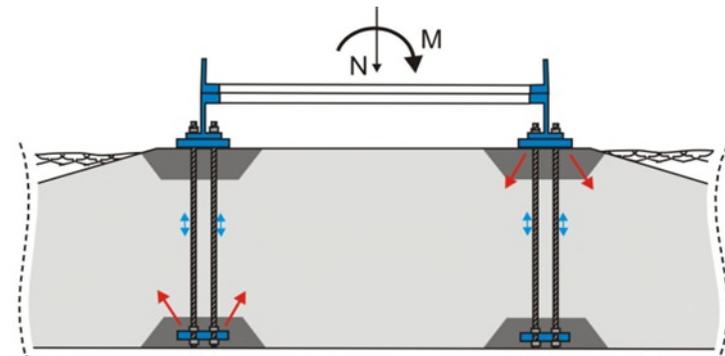
„Stahleinbauteil“

D ~ 4 m; Beton C30/37



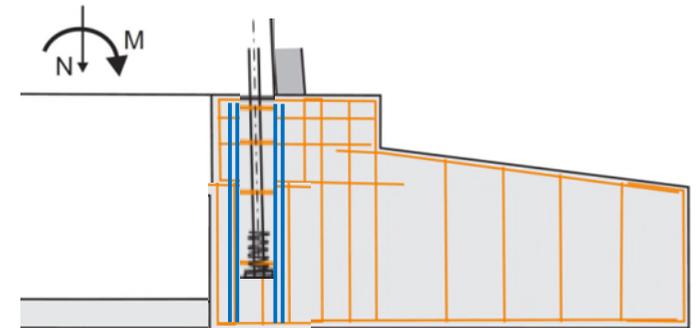
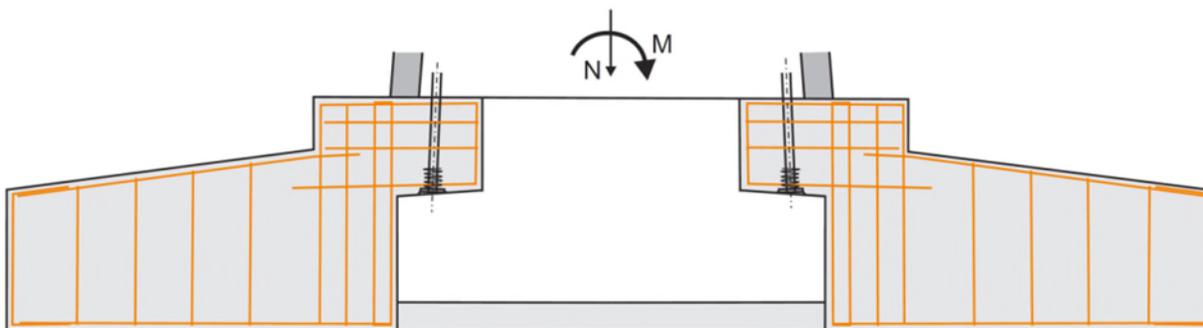
„Ankerkorb“

D ~ 5 m (geteilt > 5m); Vergußbeton



„Anbindung Betonturm Spannkeller“

Turmdurchmesser > 7 m; Beton C30/37



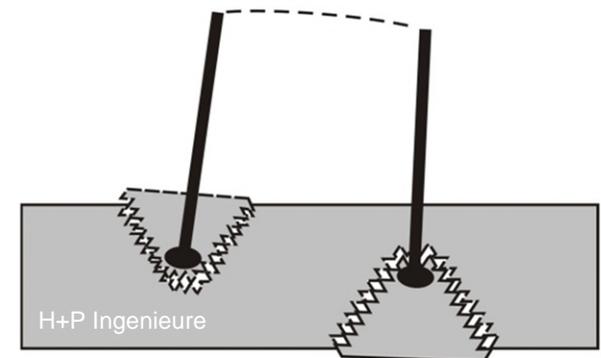


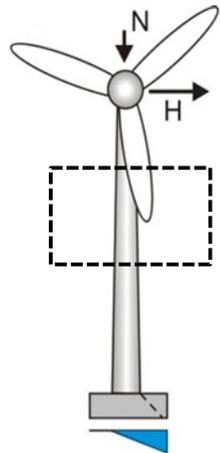
## Herausforderung

- Schnittstelle im Material,  
in der Planung  
in der Ausführung

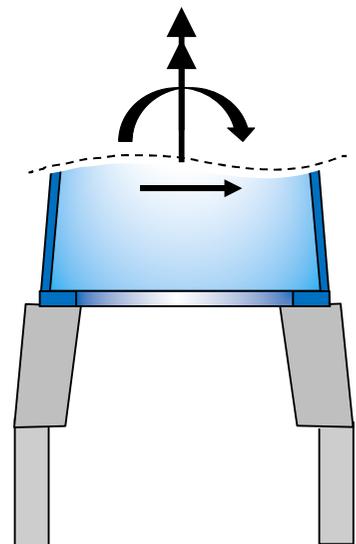
## Begrenzende Faktoren

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

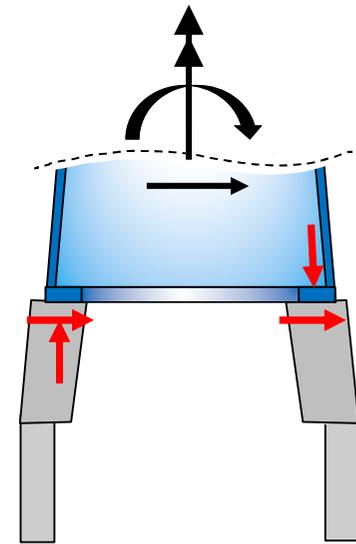




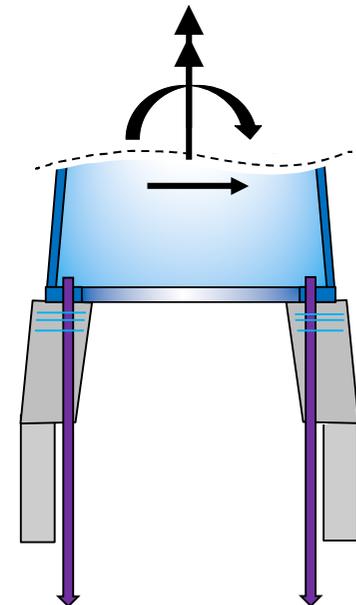
Schnittgrößen



Tragmechanismus

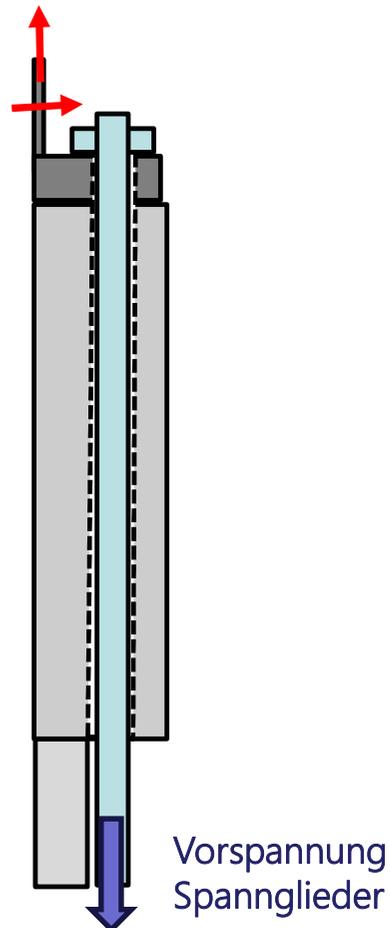


mechanisches Modell



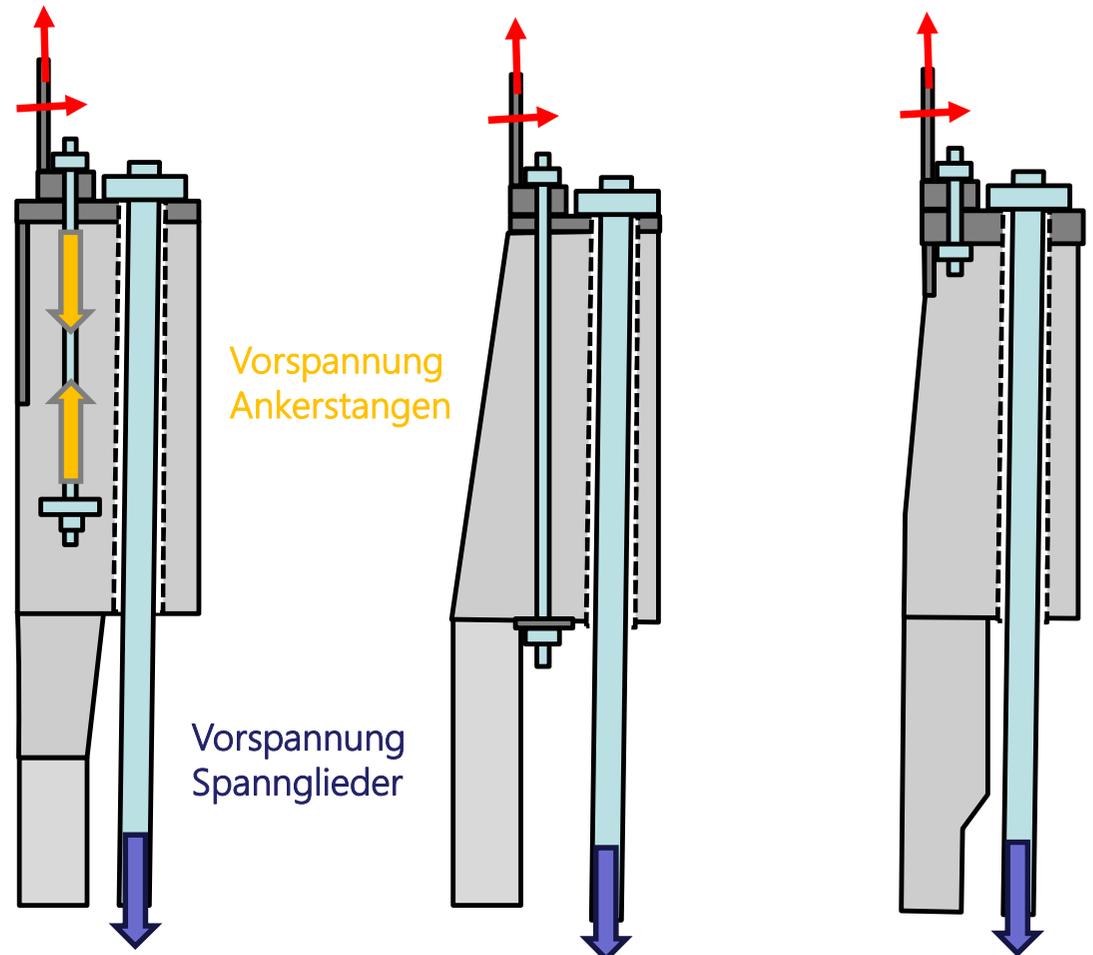
„Aufgespannter Stahlschaft“

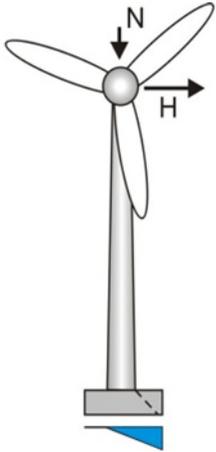
D ~ 4,5 m; Beton C80/95



„Ankerkorb“

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





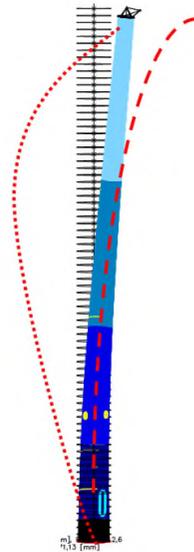
## Herausforderung

- 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





Finite Elemente Modelle, notwendig zur

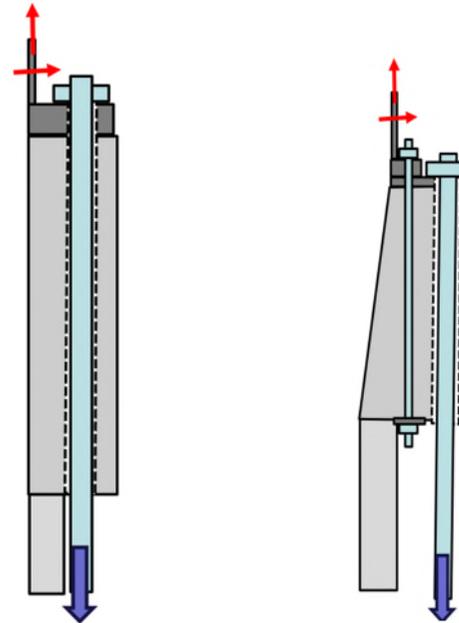
- Untersuchung des Fugenverhaltens
- Verformungsberechnung, insb. lokale Verformungen
- Bewertung lokaler Beanspruchungen
- Lebensdaueranalyse

Anwendungsgrenzen

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

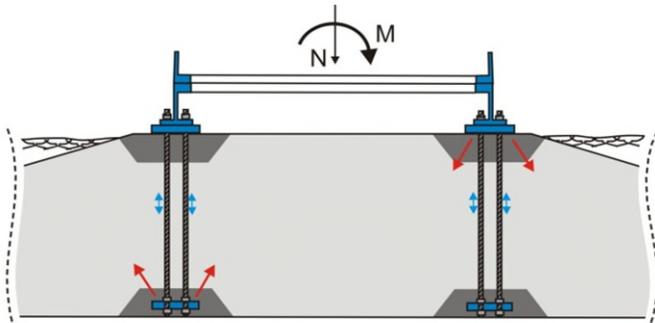
Randbedingungen und Erfordernis

- Bewertung der Anwendungsgrenzen
- Sicherheitsfaktoren zur Modelgenauigkeit



maßgebende Betonspannungen

- Mittelspannung
- Spannungsamplituden

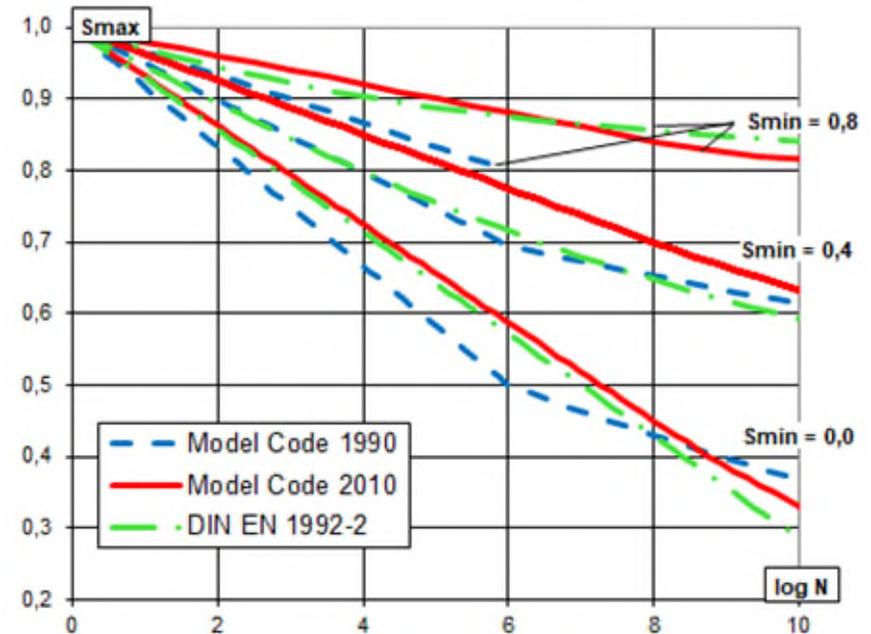


DIBt 2012/2015: Model Code 1990

	$D_{Ed}$
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

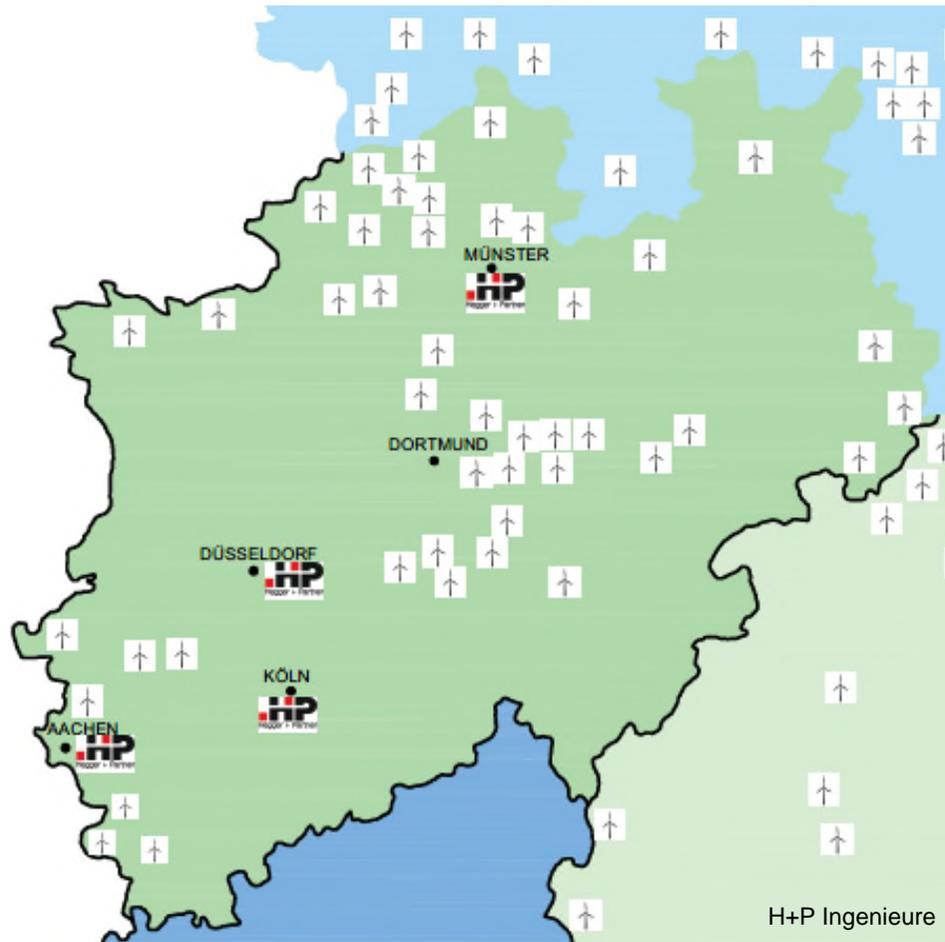
- Durchfahrtshöhen bzw. -breiten
- Tragfähigkeit der Brückenbauwerke

-> Sondergenehmigungen

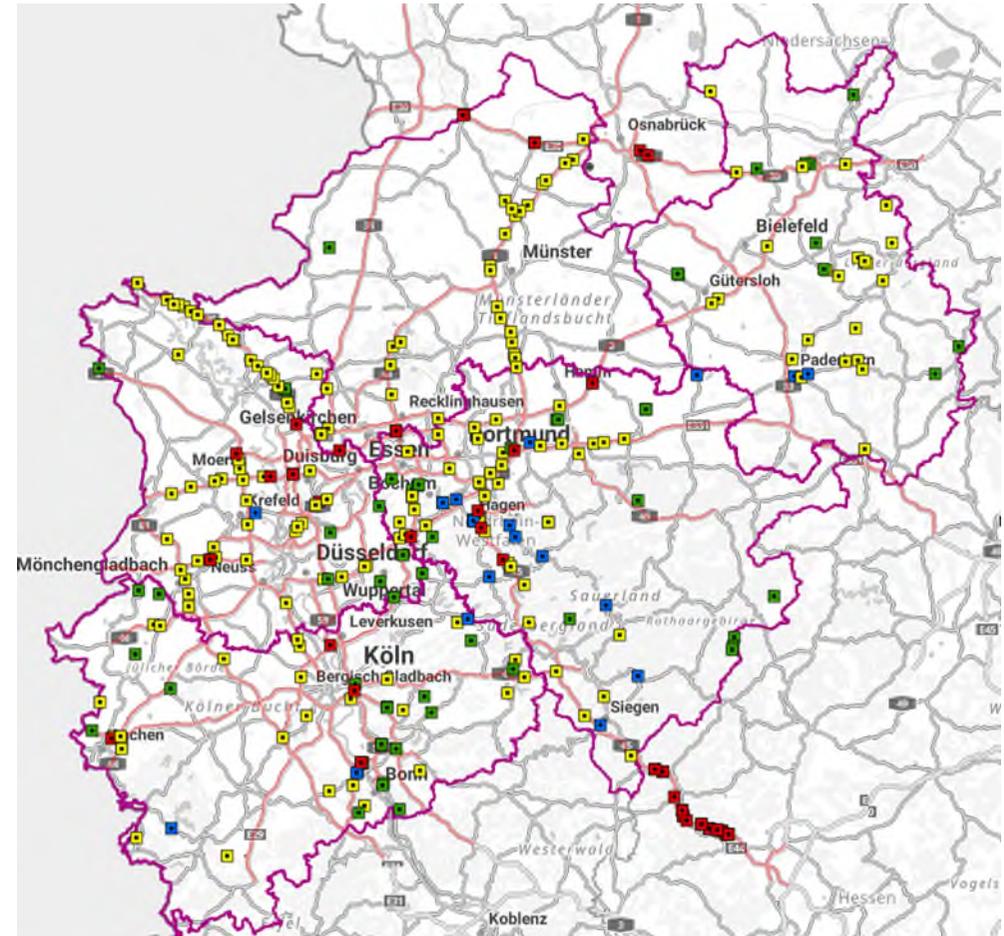
Maßnahmen: geteilte Turmsektionen



## NRW Windparks betreut durch H+P

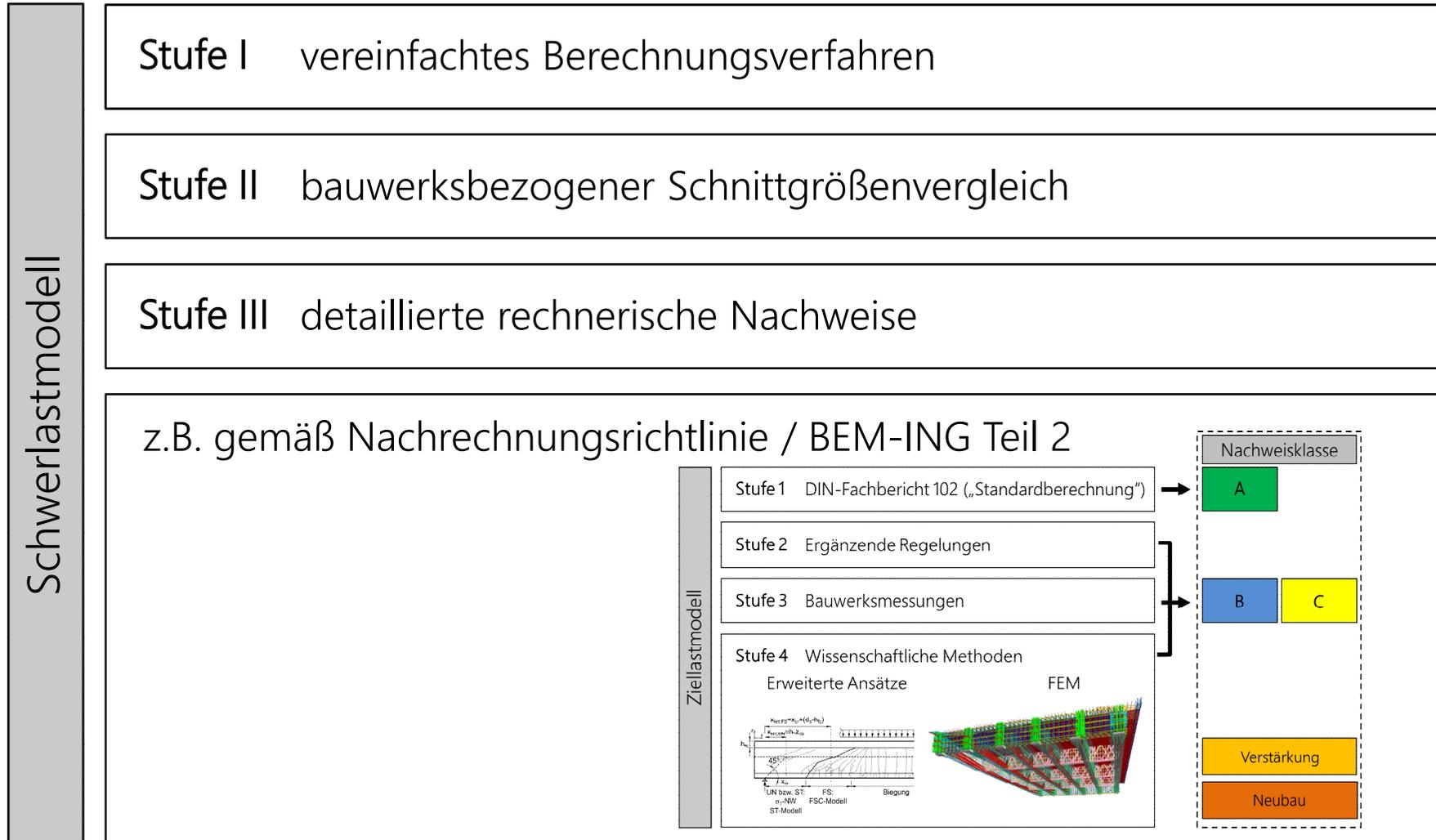


## Lastbeschränkte Brücken Strassen.NRW

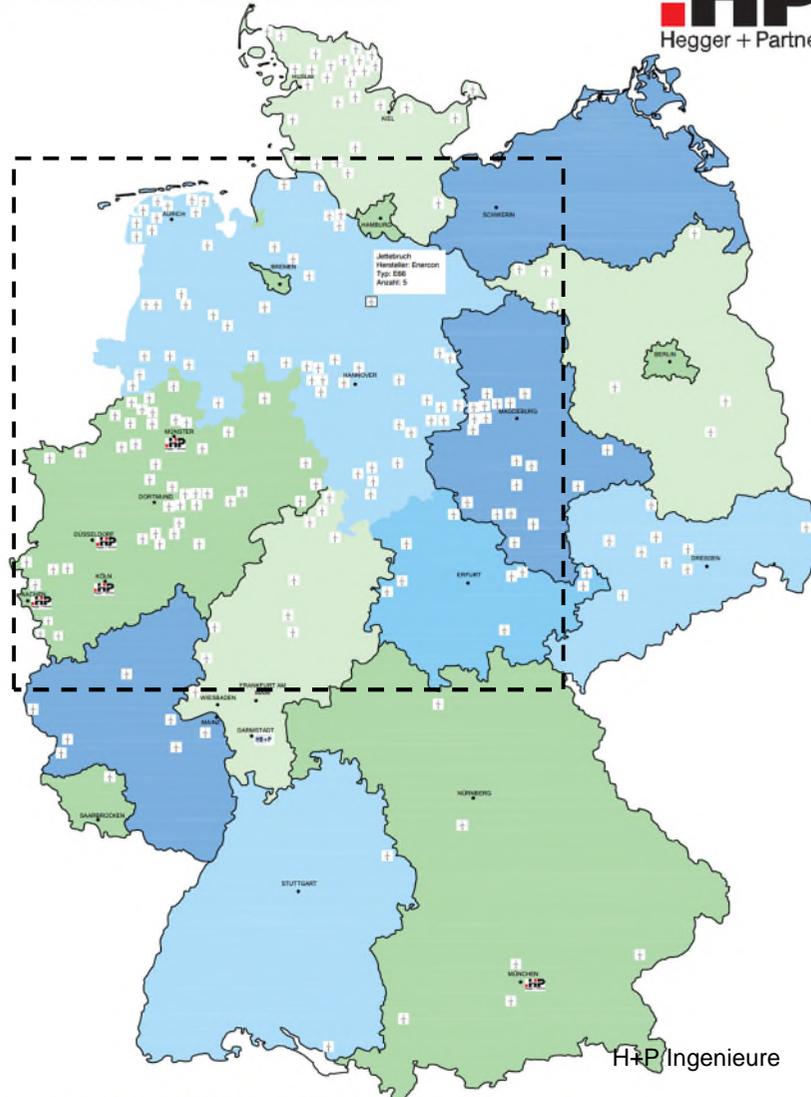


[www.giscloud.nrw.de](http://www.giscloud.nrw.de)

## Mehrstufiges Nachweiskonzept



■ 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	

