

Schwerbetonfundamente für On-Shore Windkraftanlagen

Prof. Dr. Wolfgang Finckh



Werk- und Prüfstellenleiter-Schulung
20. / 21. Januar 2026 in Leipzig

Schwerbetonfundamente für On-Shore Windkraftanlagen

1 Einleitung

2 Schwerbetonmischung

3 Fundamentberechnung
Windkraftanlagen

4 Einsparpotential Fundamente

5 Ausblick weiteres
Einsparpotential mit
Schwerbeton

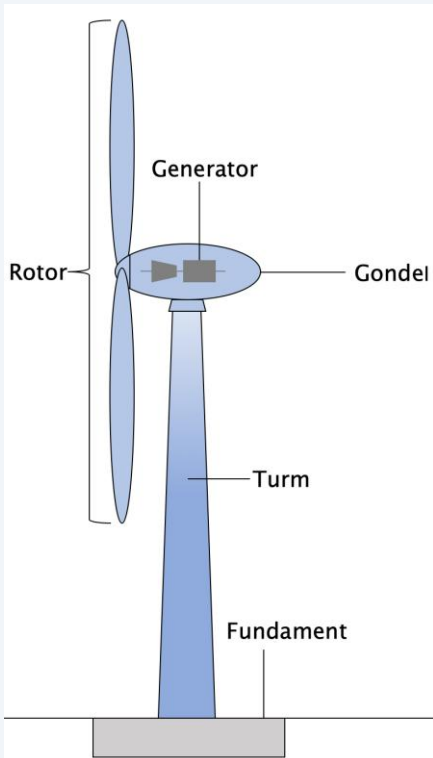
Ausgangslage



- Schwerzuschlag LKAB-MagnaDense ist ein bei der Eisenerzgewinnung anfallender „Reststoff“.
- Durch den Einsatz von Schwerzuschlag können Schwerbetone mit speziellen Anforderungen und hohen Festigkeiten hergestellt werden.
- Schwerbeton ist derzeit in der Baupraxis wenig bekannt und wird entweder als Strahlenschutzbeton oder als „reines“ Gewicht eingesetzt.
- Fragestellung: Weitere sinnvolle Anwendungsgebiete für den Schwerbeton?

Bildquelle: Bachelorarbeit F.-X. Webhofer

Ausgangslage



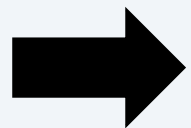
Bildquelle: Bachelorarbeit Aigner, Pichler

- Bei der Bemessung von On-Shore Windkraftanlagen ist für die Bemessung der Fundamente meist der Nachweis der Lastexzentrizität maßgebend.
- Hohe Fundamentgewichte wirken auf diesen Nachweis positiv.
- **Wieviel Fundamentvolumen kann durch den Einsatz von Schwerbeton eingespart werden?**
- Untersuchung in drei Bachelorarbeiten:
 - Franz-Xaver Webhofer: Herstellung und Optimierung einer Schwerbetonrezeptur für die Anwendung bei Windkraftfundamenten
 - Franziska Aigner: Optimierung von Fundamenten von Windkraftanlagen mithilfe von Schwerbeton - Statik
 - Josef Pichler: Optimierung von Fundamenten von Windkraftanlagen mithilfe von Schwerbeton - Ökobilanz



Bildquelle: SÜLZLE Stahlpartner GmbH

- C35/45
- Festbetonrohddichte größer 4000 kg/m^3
- Mindestens Konsistenz F3
- Verarbeitbarkeit und gute Ausführungsergebnisse bei enger Bewehrung



Entwicklung von geeigneten Mischungen:

1. Schritt: Optimierung der Frischbetoneigenschaften bei Rohddichte größer 4000 kg/m^3
2. Schritt Optimierung der Festigkeiten

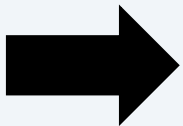
Schwerbetonmischung

Optimierungsstufe 1a Mischungen M0 bis M2



Bildquelle: Bachelorarbeit F.-X. Webhofer

Bei Mischung M2



- Rohdichte von 4050 bis 4120 kg/m³
- Festigkeit OK
- Konsistenz OK,
- Ausbreitmaß OK

- **Ausgangsmischung M0** aus der Literatur:
Probleme mit Konsistenz
- **Mischung M1**: Zugabewasser und Fließmittelgehalt wurden erhöht:
Bluten des Betons, ungleichmäßiger Betonkuchen; Festigkeit $f_{cm,cube} = 28 \text{ MPa}$
- **Mischung M2**: Fließmittelgehalt auf 8kg/m³ erhöht
Konsistenz OK, Ausbreitmaß 400mm;
Festigkeit $f_{cm,cube} = 38 \text{ MPa}$

Allerdings zu viel Fließmittel
=> Optimierung der Kornverteilung

Schwerbetonmischung

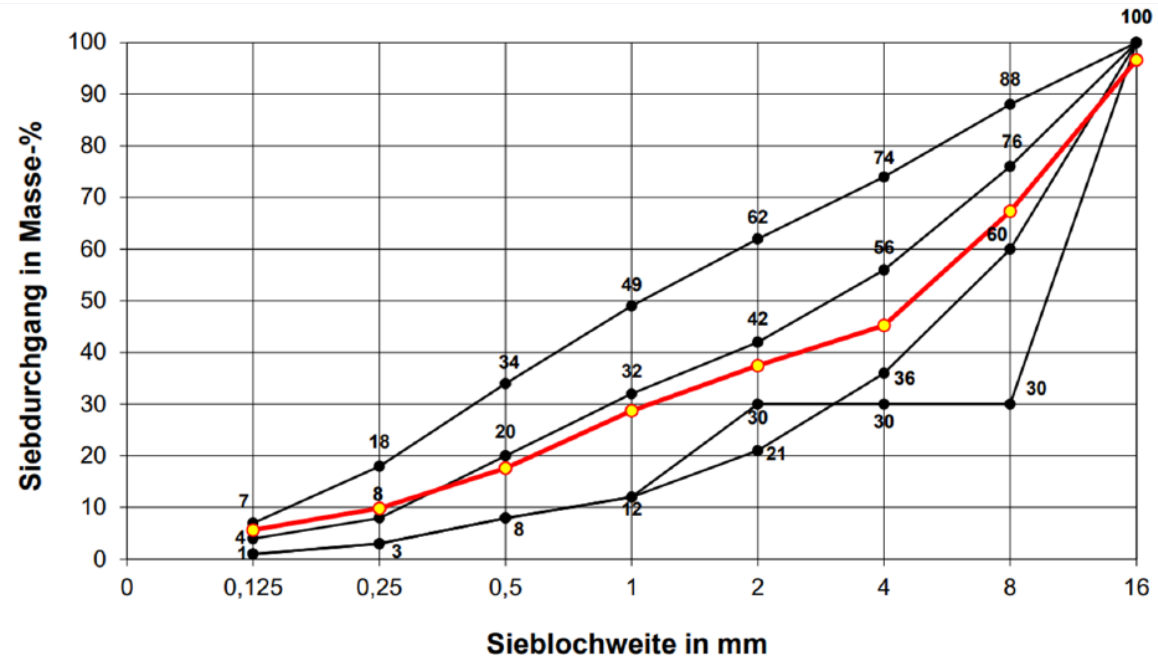
Optimierung der Sieblinie



Bildquellen: Bachelorarbeit F.-X. Webhofer

**Eigene Siebung ergab
Anpassungsbedarf**

Ausgangsrezeptur M 0			V 1		V 2	
Bestandteile	kg pro m ³	Anteil [%]	kg pro m ³	Anteil [%]	kg pro m ³	Anteil [%]
MagnaDense 2	2398	66	1268	35	1014	28
MagnaDense 8s	225	6	652	18	580	16
MagnaDense 20s	1000	28	1703	47	2029	56
	<u>3623</u>	<u>100</u>	<u>3623</u>	<u>100</u>	<u>3623</u>	<u>100</u>



Schwerbetonmischung

Rezeptur M3 mit neuer Kornzusammenstellung

Rezeptur M 3.2		
Erhöhung FM-Gehalt ggü M 3.1		
Bestandteile	kg pro m³ Beton	
Zement CEM III/A 42,5 N	320	w/z= 0,4375
Wasser	140	
Fließmittel	6,40 kg \triangleq 2,0 %	
MagnaDense 2	1014	
MagnaDense 8s	580	
MagnaDense20s	2029	

Gleichmäßige Konsistenz Ausbreitmaß 420mm



Bildquellen: Bachelorarbeit F.-X. Webhofer

Testbetonage: Modell mit minimalen Bewehrungsabstand



Qualität sehr gut:

- kein Absetzen der Körner
- Keine Lunker, etc..

Schwerbetonmischung

Rezeptur M3 – Festbetoneigenschaften nach 28 Tagen

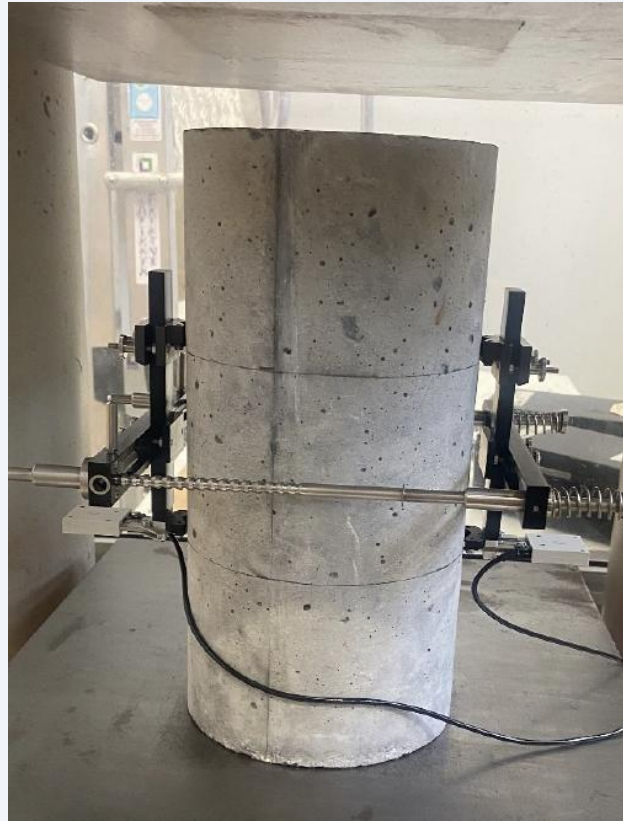
Würfeldruckfestigkeit



Bildquellen: Bachelorarbeit F.-X. Webhofer

$$f_{cm,cube,28} = 70,6 \text{ MPa}$$

E-Modul



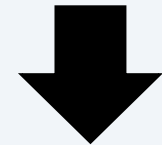
$$E_{cm} = 50 \text{ GPa}$$

Spaltzug

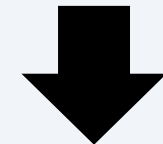


$$f_{ctm,sp} = 4,6 \text{ MPa}$$

Festbetonrohddichte:
 $\rho_m = 4117 \text{ kg/m}^3$



Materialeigenschaften
mehr als ausreichend
(circa C 50/60)



Optimierung zur
Einsparung möglich

Anpassung Flugasche

Rezeptur M 6.3		
Zugabe Flugasche ggü. M 3 (30 kg/m³)		
Bestandteile	kg pro m³ Beton	
Zement CEM III/A 42,5 N	320	w/z= 0,45
Wasser	149,4	
Flugasche	30	
Fließmittel	5,81 kg \triangleq 1,75 %	
MagnaDense 2	1014	
MagnaDense 8s	580	
MagnaDense20s	2029	

- Festbetonrohddichte: $\rho_m = 4050 \text{ kg/m}^3$
- Würfeldruckfestigkeit $f_{cm,cube,28} = 55 \text{ MPa}$
- Ausbreitmaß 510mm

Anpassung Zementart

Rezeptur M 7.2		
Alternativzement		
Bestandteile	kg pro m³ Beton	
Zement CEM III/A 32,5 N	320	w/z= 0,45
Wasser	144	
Fließmittel	4,80 kg \triangleq 1,50 %	
MagnaDense 2	1014	
MagnaDense 8s	580	
MagnaDense20s	2029	

- Festbetonrohddichte: $\rho_m = 4050 \text{ kg/m}^3$
- Würfeldruckfestigkeit $f_{cm,cube,28} = 52 \text{ MPa}$
- Ausbreitmaß 480mm

(circa C 35/45)

Fazit

Fazit Mischungsentwurf



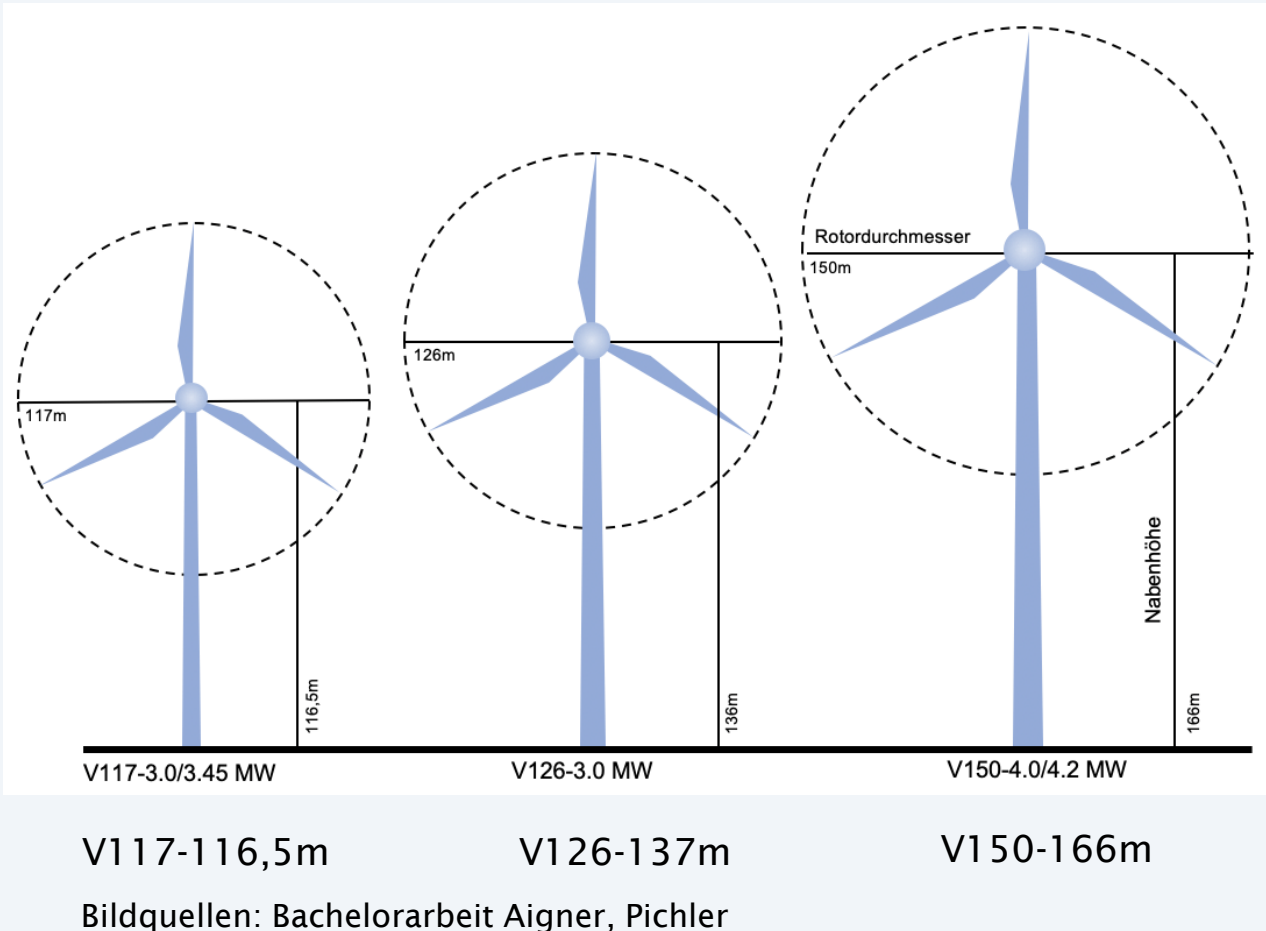
Bildquelle: Bachelorarbeit F.-X. Webhofer

- Anhand 17 verschiedener Mischungen wurden 3 brauchbare Mischungen erzeugt.
- Eine Mischung im Bereich von C35/45 und eine im Bereich C50/60.
- Aufgrund der relativ festen Schwerbetongesteinskörnung werden größere Festigkeiten und E-Module erreicht als bei Normalbeton.
- Mit ausreichend Kenntnis über Material und Betontechnologie lassen sich sehr gute Schwerbetone herstellen.
- Ein Absetzen des Schwerzuschlages ist bei keiner Mischung eingetreten.

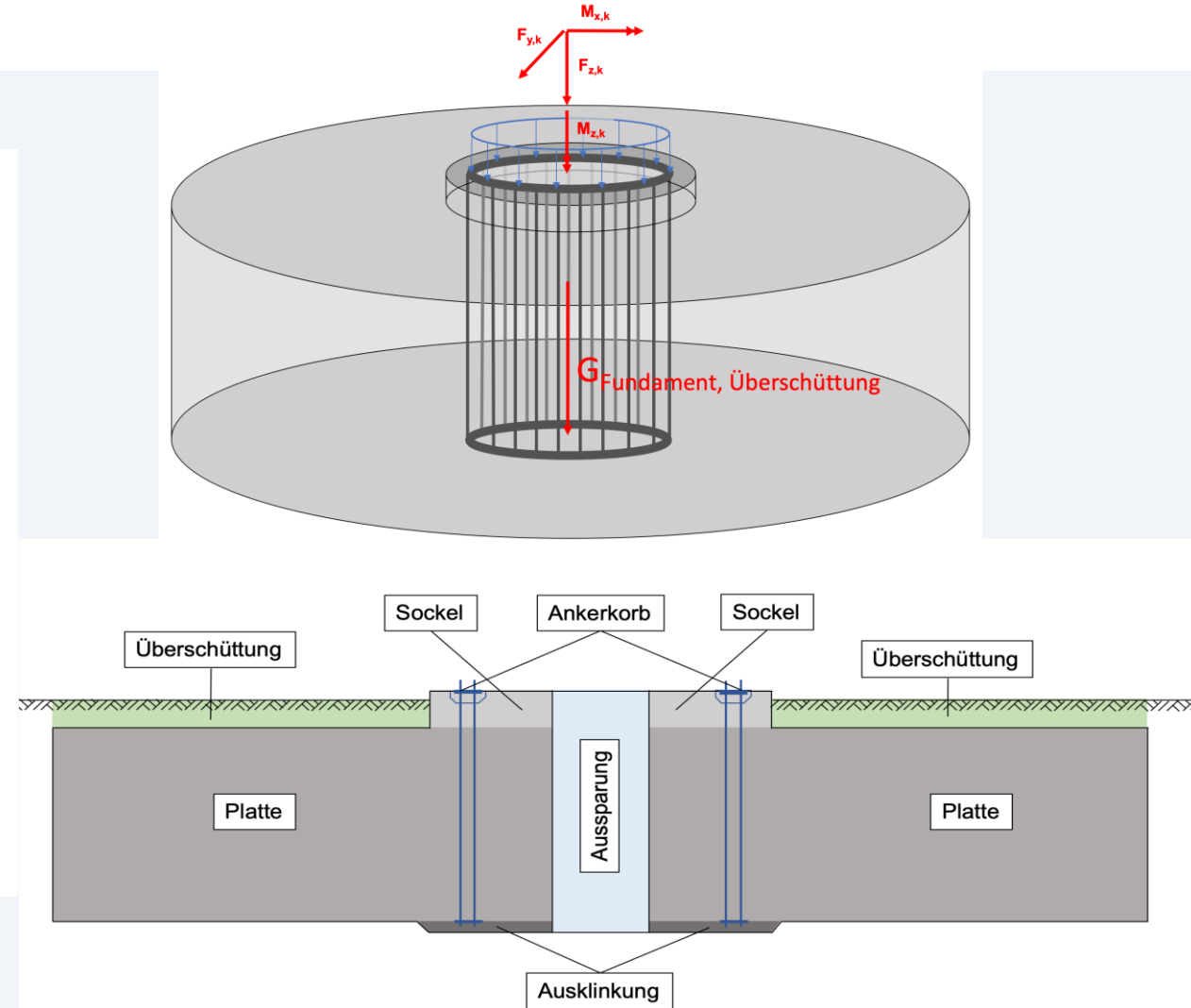
Fundamentberechnung Windkraftanlagen

Übersicht

3 Untersuchte Nabenhöhen



Schema des Fundaments



Fundamentberechnung Windkraftanlagen

Übersicht –Material und Varianten

Beton:

		Sockel		Platte		
		Variante 1	Variante 2	Variante 1	Variante 2	
Betongüte		C50/60		C35/45		[-]
Wichte (Stahlbeton)	$\gamma =$	24	40	24	40	[kN/m ³]
Druckfestigkeit	$f_{ck} =$	50		35		[N/mm ²]
Mittlere Zugfestigkeit	$f_{ctm} =$	4,1		3,2		[N/mm ²]

Stahl:

		Stabstahl	
Güte		B500B	[-]
Streckgrenze	$f_{yk} =$	500	[N/mm ²]
E-Modul	$E_s =$	210000	[N/mm ²]
Wichte	$\gamma =$	7850	[KN/m ³]

Geotechnische Nachweise

Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS):

Grundbruch (Grenzzustand GEO-2)
Gleiten (Grenzzustand GEO-2)
Kippen (Grenzzustand EQU)
Aufschwimmen (UPL)

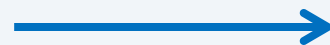
Teilsicherheitsbeiwerte:

- DIN 1054:2010-12 Tabelle A2.1/A2.3
- DIBt-Richtlinie

Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS):

Drehfedersteifigkeit
Setzungen

Begrenzung der klaffenden Fuge

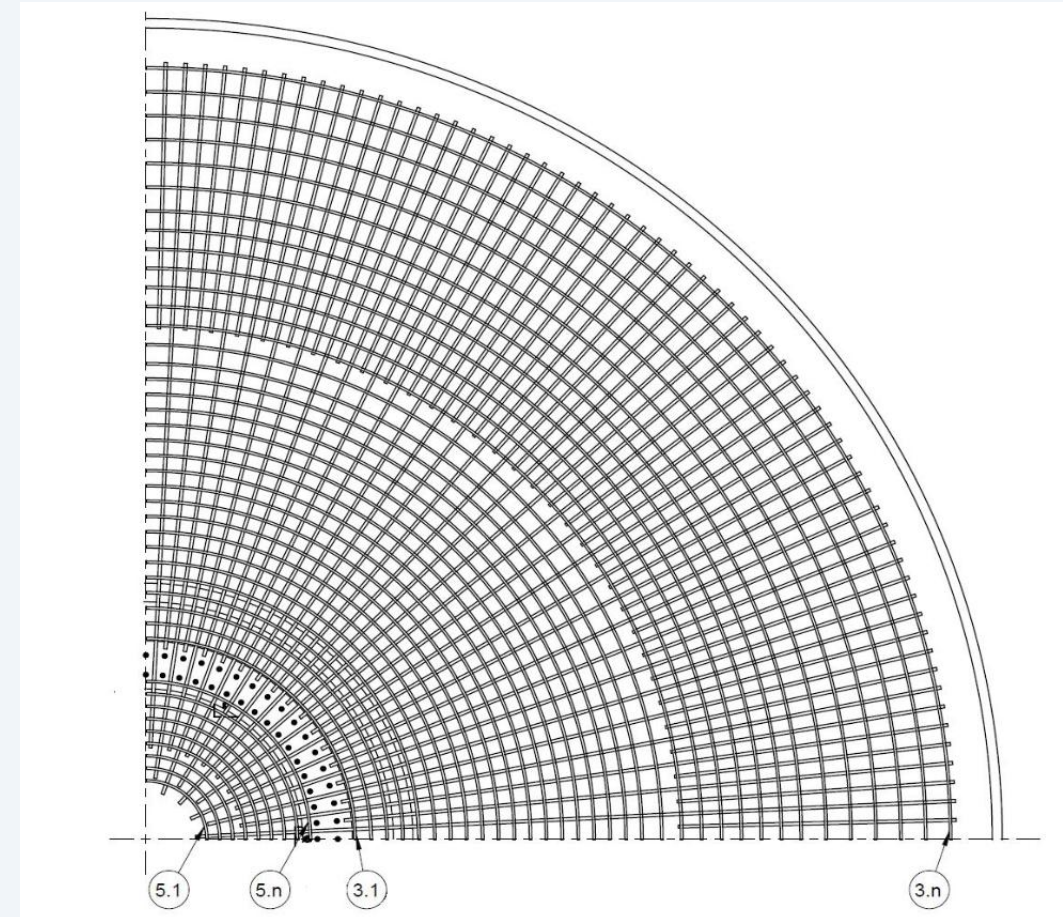
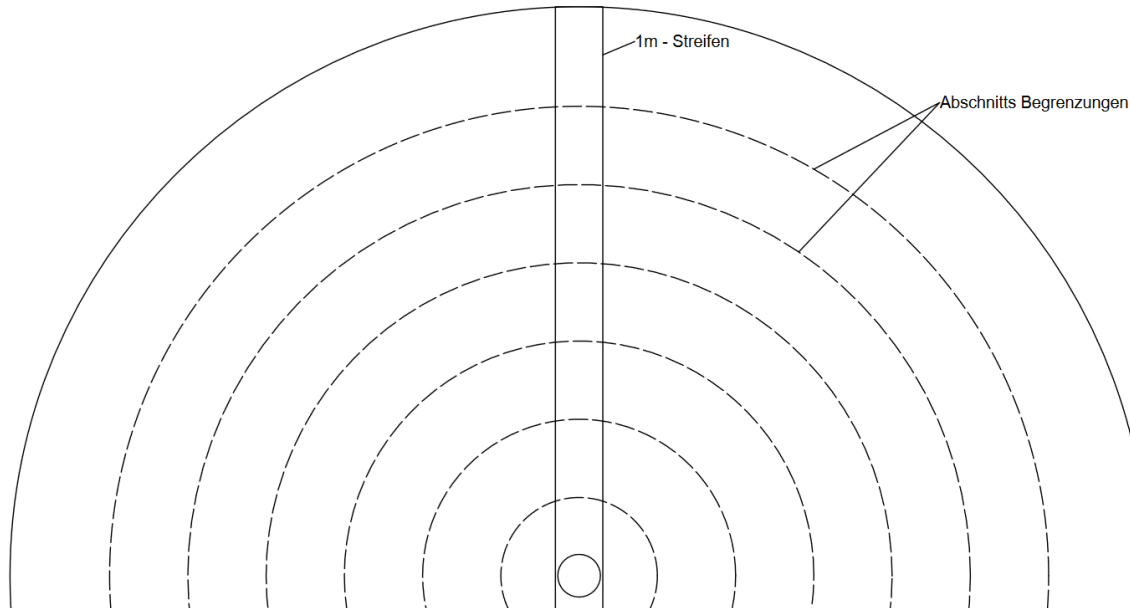


Spezielle EWK D.3 nach DIBt-Richtlinie
im Regelfall maßgebend

Nachweise innere Tragfähigkeit

Nachweise Stahlbeton

- Rotationssymmetrische Bemessung in 1m Streifen
- Nachweis Biegung
- Durchstanzen
- Mindestbewehrung zur Beschränkung der Rissbreite



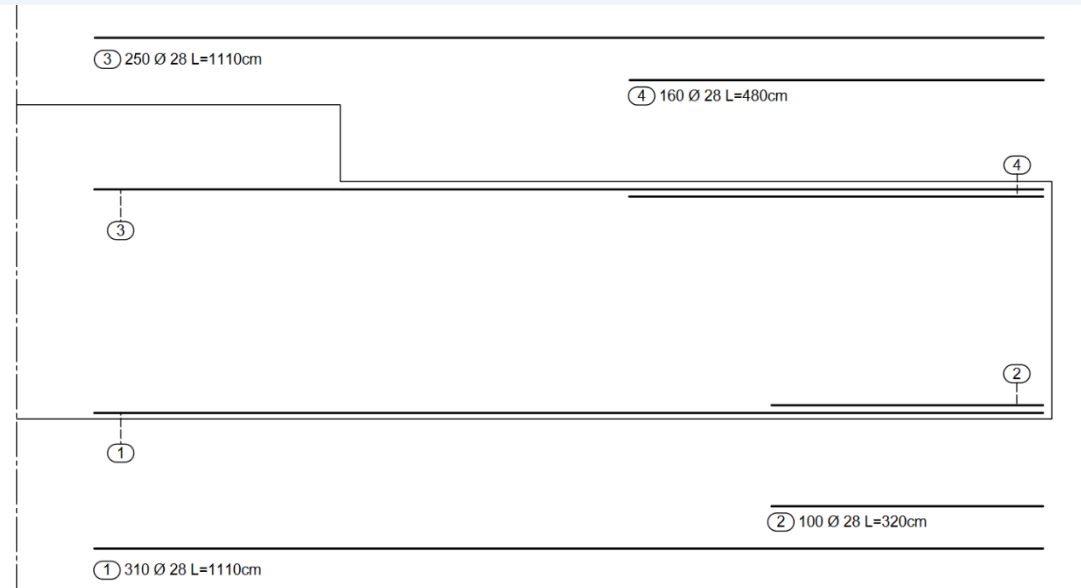
Bildquellen: Bachelorarbeit Aigner, Pichler

Fundamentberechnung Windkraftanlagen

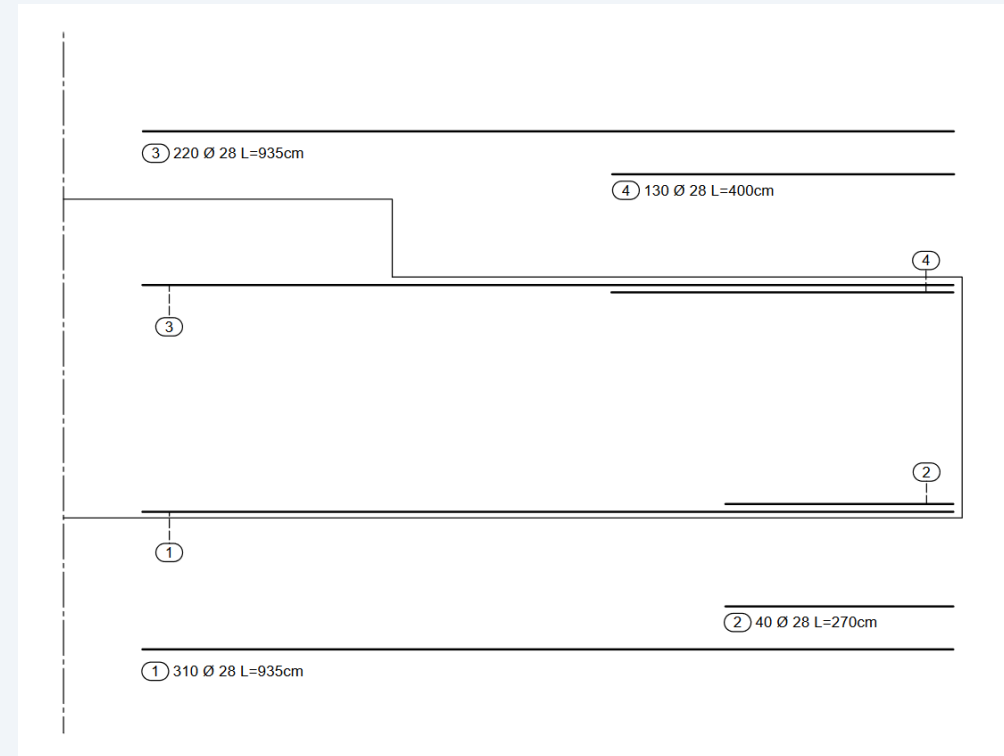
Nachweise innere Tragfähigkeit

Erforderliche Radialbewehrung

Bewehrungsskizze V150 166m - Normalbeton

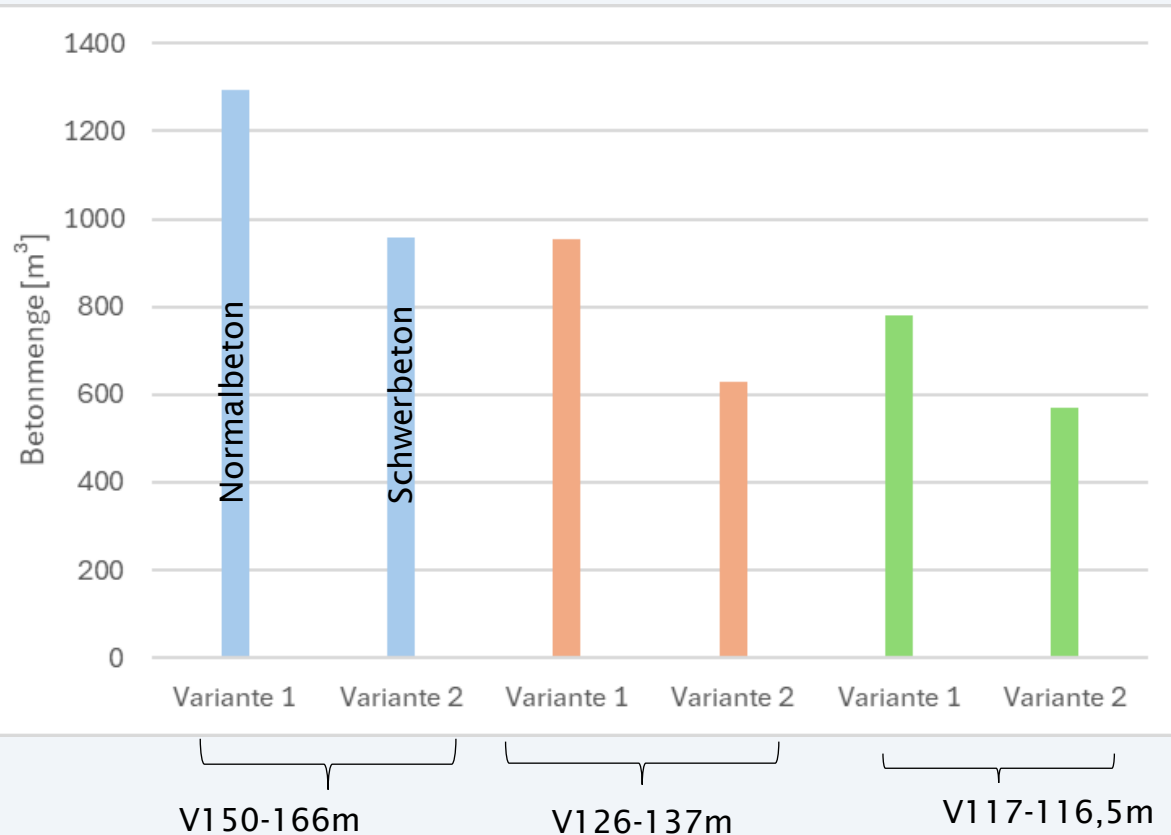


Bewehrungsskizze V150 166m - Schwerbeton

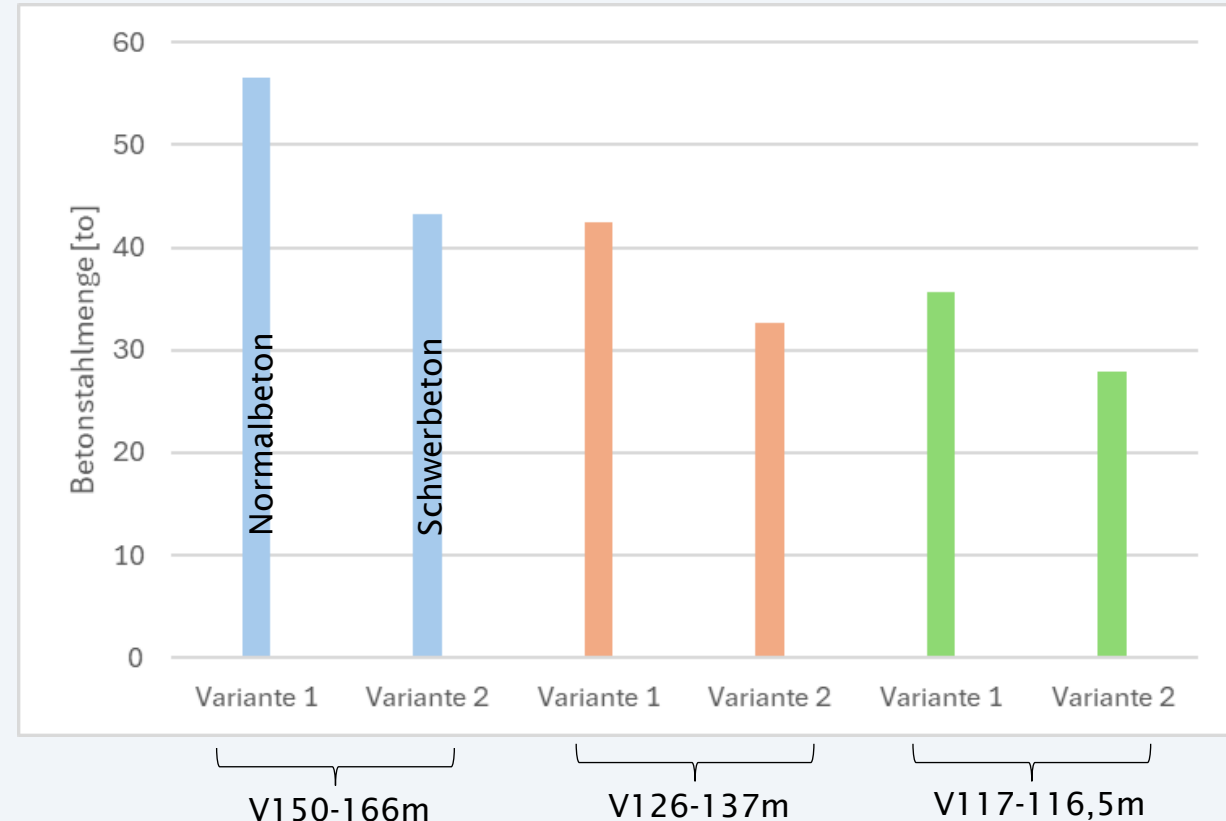


Bildquellen: Bachelorarbeit Aigner, Pichler

Reduktion des Betonvolumens durch Schwerbeton: ~30%



Reduktion des Betonstahls durch Schwerbeton: ~20%



Einsparpotential Fundamente

| C02 - Bilanzierung



Phase 4: Rückbau, Wiederverwendung,
Recycling und Entsorgung



Phase 1: Gewinnung und Vorbereitung der Rohstoffe



Phase 2: Herstellung des Bauprodukts



Phase 3: Nutzung des Bauprodukts

Einsparpotential Fundamente

C02 - Bilanzierung

Normalbeton mit Annahme von örtlich verfügbarer Gesteinskörnung

					Phase 1/2			Phase 3		Phase 4					Phase 4	
													[kg-C02-Äqu.]		[kg-C02-Äqu.]	
Bezeichnung	Rohstoffart	Menge	Referenzfluss		Herstellung A1-A3	Transport A4	Einbau A5	Nutzung B1	Abbruch C1	Transport C2	Abfallbehandlung C3	Beseitigung C4	GWP ohne Recycling	Recyclingpotential D	GWP mit Recycling	
Stahlbeton Fundament	Beton C35/45	1255,12	1*1m³		244	9,1	1,08	0	3,1	12	6,01	0	345522	-21,4	318662	
Stahlbeton Sockel	Beton C50/60	39,23	1*1m³		300	28,8	1,08	0	3,1	12	6,01	0	13769	-21,4	12930	
Sauberkeits- schicht	Beton C20/25	45,24	1*1m³		178	3,9	1,08	0	3,1	12	6,01	0	9233	-21,4	8265	
Betonstahl	B500B	56,48	1000*1kg		818	0	0	0	0	0	1,602	1,434	46372	411,4	69608	
Ankerkorb		18,4	1000*1kg		818	0	0	0	0	0	1,602	1,434	15107	411,4	22677	
Transport Betonstahl	50km	3744	1*t*km		0	0,08969	0	0	0	0	0	0	336	0	336	
Transport Aushub	50km $\gamma = 18kN/m^3$	335520	1*t*km		0	0,08969	0	0	0	0	0	0	30093	0	30093	
Aushub Phase 2		1864	1*1m³		0	0	1,294	0	0	0	0	0	2412	0	2412	
Aushub Phase 4		1864	1*1m³		0	0	1,294	0	0	0	0	0	2412	0	2412	

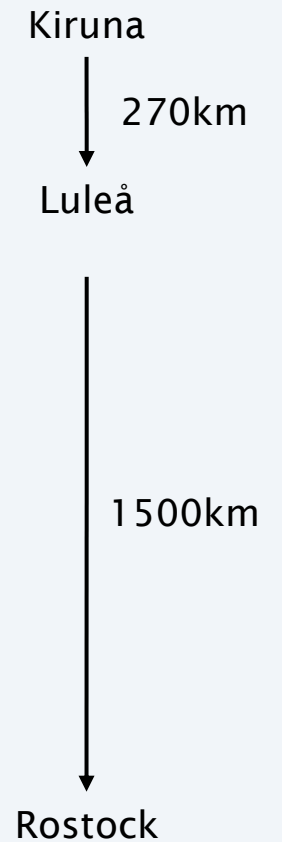
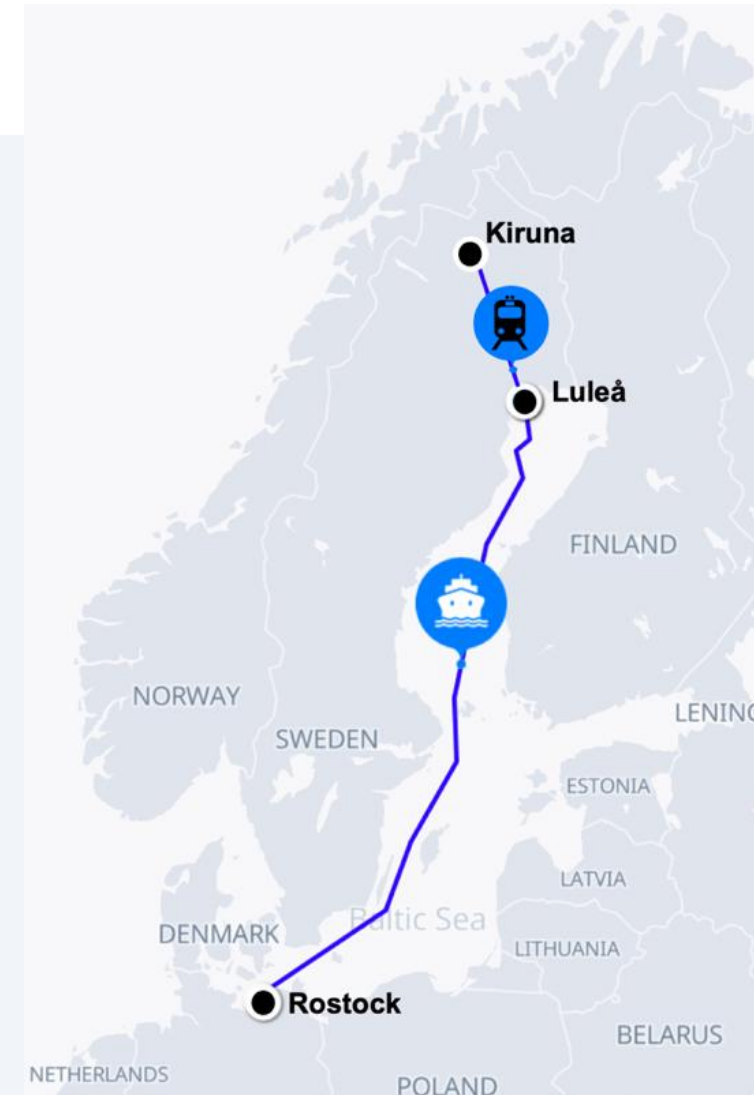
Einsparpotential Fundamente

| C02 - Bilanzierung

Schwerzuschlag langer Weg von Kiruna



Bildquellen: LKAB



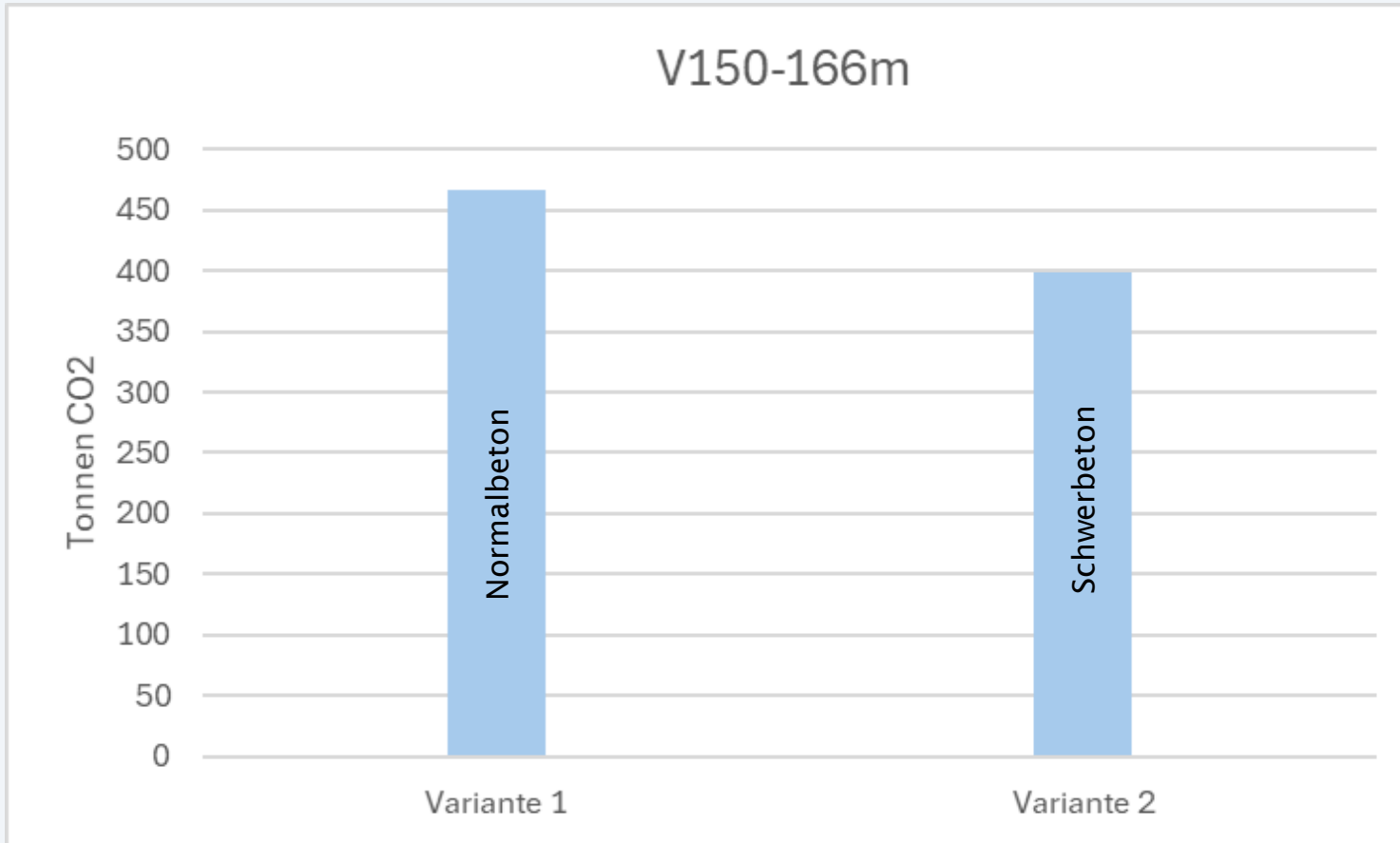
Einsparpotential Fundamente

C02 - Bilanzierung

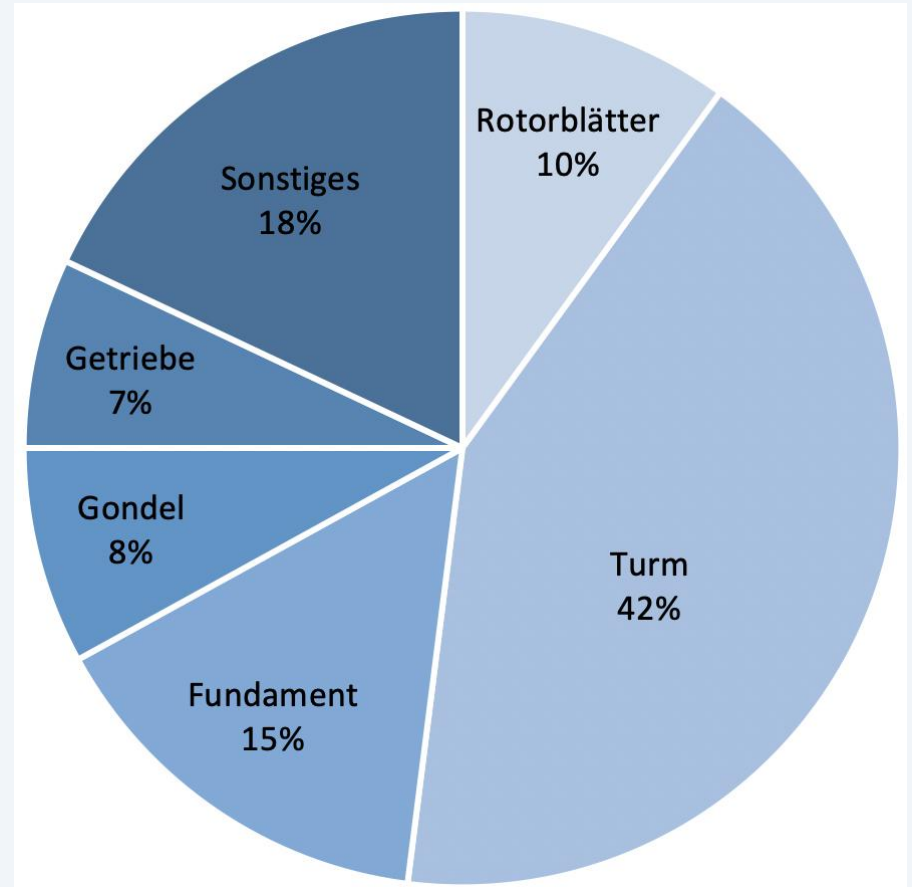
Schwerbeton mit LKAB-MagnaDense aus Kiruna

Bezeichnung	Rohstoffart	Menge	Referenzfluss		Herstellung A1-A3	Transport A4	Einbau A5	Nutzung B1	Abbruch C1	Transport C2	Abfallbehandlung C3	Beseitigung C4	[kg-CO2-Äqu.] GWP ohne Recycling	Recyclingpotential D	[kg-CO2-Äqu.] GWP mit Recycling
Stahlbeton Fundament	Beton C35/45	918,72	1*m³		244	9,1	1,08	0	3,1	12	6,01	0	252914	-21,4	233254
Stahlbeton Sockel	Beton C50/60	39,23	1*m³		300	28,8	1,08	0	3,1	12	6,01	0	13769	-21,4	12930
Sauberkeits- schicht	Beton C20/25	45,24	1*m³		178	3,9	1,08	0	3,1	12	6,01	0	9233	-21,4	8265
Betonstahl	B500B	43,22	1000*1kg		818	0	0	0	0	0	1,602	1,434	35485	411,4	53266
Ankerkorb		18,4	1000*1kg		818	0	0	0	0	0	1,602	1,434	15107	411,4	22677
Transport Betonstahl	50km	3081	1*t*km		0	0,08969	0	0	0	0	0	0	276	0	276
Transport Aushub	50km $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$	251280	1*t*km		0	0,08969	0	0	0	0	0	0	22537	0	22537
Transport Schwerbeton (Bahn)	3,623 t/m³ 270 km	937076	1*t*km		0	0,01883	0	0	0	0	0	0	17645	0	17645
Transport Schwerbeton (Schiff)	3,623 t/m³ 1500 km	5205979	1*t*km		0	0,004677	0	0	0	0	0	0	24348	0	24348
Aushub Phase 2		1396	1*m³		0	0	1,294	0	0	0	0	0	1806	0	1806
Aushub Phase 4		1396	1*m³		0	0	1,294	0	0	0	0	0	1806	0	1806

Fundament



CO2 Anteilig für die Bauteile



Einsparung von circa 15% CO2 trotz längerer Transportwege

Weiteres Einsparpotential mit Schwerbeton

Unterwasserbeton

Bei sehr vielen Maßnahmen im Grundwasser wird ein Unterwasserbeton benötigt.

Beim Auftriebsnachweis ist das Gewicht der entscheidende Parameter.

Verfahren

Unterwasseraushub der Baugrube



Einbau des Unterwasserbetons



Lenzen der Baugrube



Weiteres Einsparpotential mit Schwerbeton

Unterwasserbeton - Berechnung

Auftriebssicherung nur durch Eigengewicht

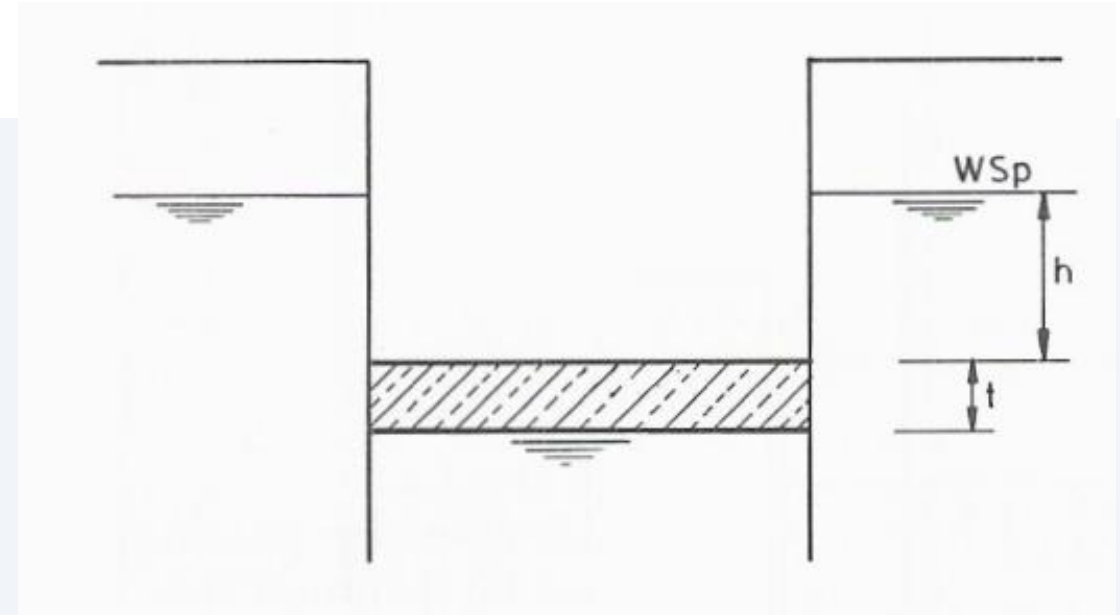
Zur Auftriebssicherung durch Eigengewicht ergibt sich die erforderliche Dicke t der Sohlplatte entsprechend

$$\text{erf } t = \frac{\eta_A \cdot h \cdot \gamma_W}{\gamma_B - \gamma_W \cdot \eta_A} = \frac{h \cdot \gamma_W}{\frac{\gamma_B}{\eta_A} - \gamma_W}$$

$$\eta_A \text{ Auftriebssicherheitsbeiwert} = \frac{\gamma_{dst}}{\gamma_{stb}} = \frac{1,05}{0,95} = 1,11$$

γ_B Spez. Gewicht des Betons (i. a. 23 kN/m³)

γ_W Spez. Gewicht des Wassers (10 kN/m³)



Beispiel: Wassersäule 2m

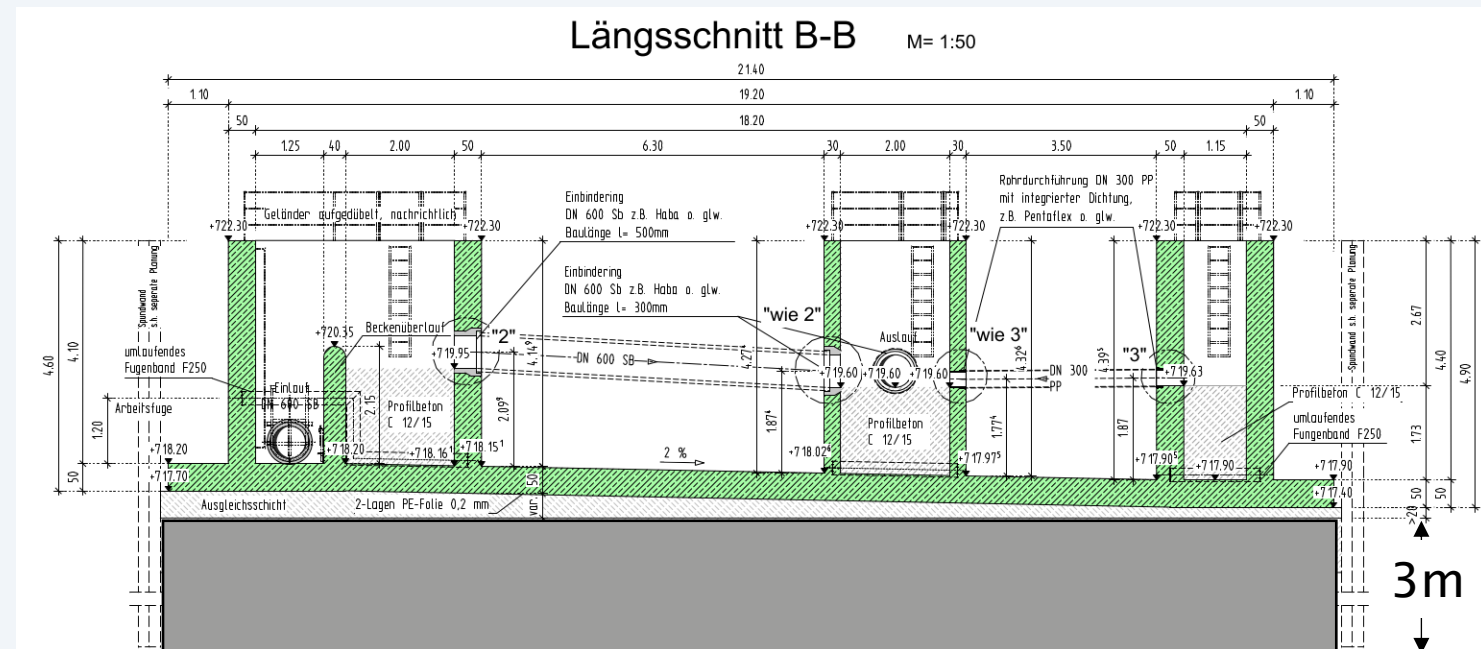
$$\text{Normalbeton: } \text{erf } t = \frac{h \cdot \gamma_W}{\frac{\gamma_B}{\eta_A} - \gamma_W} = \frac{2 \cdot 10}{\frac{23}{1,11} - 10} = 1,9\text{m}$$

$$\text{Schwerbeton } \text{erf } t = \frac{h \cdot \gamma_W}{\frac{\gamma_B}{\eta_A} - \gamma_W} = \frac{2 \cdot 10}{\frac{39}{1,11} - 10} = 0,8\text{m}$$

Weiteres Einsparpotential mit Schwerbeton

Unterwasserbeton – mögliches Praxisbeispiel

Bau eines Regenklärbeckens neben einer Bundesstraße



Fläche 305m²

Ausgeführt Normalbeton:

3m Dicke UW-Sohle: $305 \cdot 3 = 915 \text{ m}^3$

Mit Schwerbeton:

1,2m Dicke UW-Sohle: $305 \cdot 1,2 = 366 \text{ m}^3$

Einsparung

- 550 m³ Beton
- 550 m³ Aushub

OTH REGENSBURG

KONTAKT



0176 61246545



Galgenbergstraße 30
93053 Regensburg



Wolfgang.Finckh@oth-
regensburg.de

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Finckh
Fakultät Bauingenieurwesen
Lehrgebiet Stahlbetonbau und
Spannbetonbau