



PIANC Working Group 47:

Auswahl eines Wellenbrechers

Holger Schüttrumpf

Bundesanstalt für Wasserbau; Dienststelle Hamburg

E-Mail: schuettrumpf@hamburg.baw.de





Ziele der WG47

Kosten für einen Wellenbrecher hängen vom Typ und gewähltem Sicherheitsniveau ab, Schäden führen zu Ausfallkosten.

- Ein optimales Sicherheitsniveau muss die Gesamtkosten während der Lebensdauer des Bauwerks reduzieren (Bau, Unterhaltung, Reparatur und Ausfall)
- Nationale Richtlinien und Empfehlungen berücksichtigen keine Kostenoptimierung.

WG47 soll Kriterien für die Wahl eines Wellenbrechers auf der Grundlage eines optimalen Sicherheitsniveaus aufstellen, unterstützt durch Beispiele aus Häfen mit geringen bzw. hohen Ausfallkosten. Im Bericht sollen Sicherheitsniveaus und Gesamtkosten analysiert werden. Die optimale Versagenswahrscheinlichkeit auf der Grundlage einer Kostenoptimierung ist zu ermitteln.



Mitglieder der WG47

Hans Burcharth
Holger Schüttrumpf
John Sørensen
Jentsje van der Meer
Kenichiro Shimosako
Roberto Tomasicchio
Sigurdur Sigurdarson
Douwe Hoornstra
Ignacio Arévalo
Jeffrey Melby
Julien de Rouck
William Allsop

Dänemark (chair)
Deutschland (sec)
Dänemark
Niederlande
Japan
Italien
Island
Spanien
Spanien
U.S.A
Belgien
England



Ziele der WG47

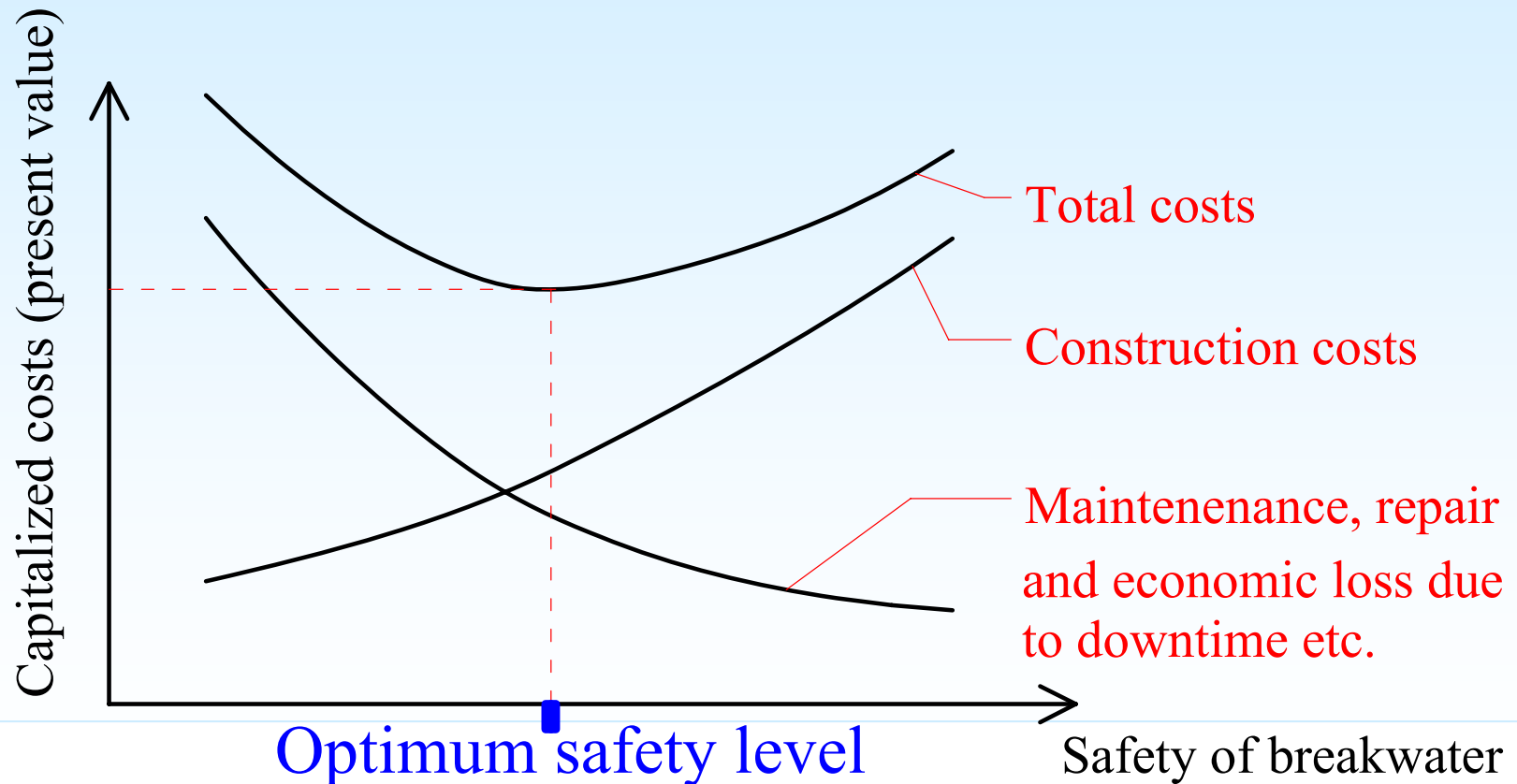
Empfehlungen für Wellenbrecher basieren auf:

- **Funktionalen Anforderungen**
- **Umweltbedingungen**
- **Kostenoptimierung und Sicherheitsniveau**



Ziele der WG47

Sicherheitsniveau in Abhängigkeit der Gesamtkosten (Bau, Unterhaltung, Reparatur, Ausfall) über die Lebensdauer:





Sicherheitsniveaus für Wellenbrecher

Sicherheits- klasse	Konsequenzen eines Versagens
Sehr gering	<i>Kein Risiko für Menschen. Geringe Auswirkungen auf Umwelt und Kosten</i>
Gering	<i>Kein Risiko für Menschen. Gewisse Auswirkungen auf Umwelt und/oder Kosten</i>
Normal	<i>Risiko für Menschen und/oder signifikante Beeinträchtigung der Umwelt oder hohe wirtschaftliche oder politische Konsequenzen</i>
Hoch	<i>Risiko für Menschen und/oder signifikante Beeinträchtigung der Umwelt oder sehr hohe wirtschaftliche und politische Konsequenzen</i>

ISO 2394 – Reliability of Structures





Sicherheitsniveaus für Wellenbrecher

	Klassifikation (funktional)	Kriterien
I	<p>The diagram illustrates a breakwater structure with an outer basin, inner basins, and jetties. The outer basin is the largest area, followed by inner basins, and jetties are the narrow structures extending into the sea.</p>	<p>Wellentransmission SLS: $H_{S,T} = 0.5 - 1.8$ m</p> <p>Schaden an Deckschicht SLS: D = 5 %, RLS: D = 15 % ULS: D = 30 %</p> <p>Gleitweg eines Caissons SLS: 0.2 m, ULS: 2 m</p>

Hinweis:

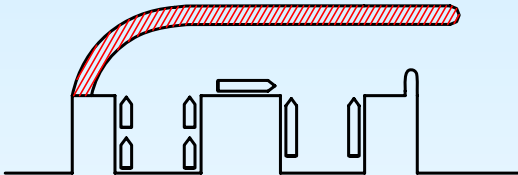
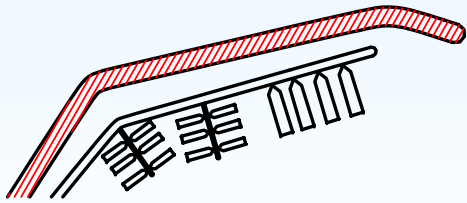
Es werden drei Grenzzustände definiert. Auf jeden Grenzzustand ist das Bauwerk zu bemessen!

SLS = Service Limit State; RLS = Repair Limit State; ULS = Ultimate Limit State





Sicherheitsniveaus für Wellenbrecher

	Klassifikation (funktional)	Kriterien
II	<p>Commercial port</p>  <p>Marina, fishing port</p> 	<p>Wellentransmission SLS: $H_{S,T} = 0.3 - 1.0$ m</p> <p>Schaden an Deckschicht SLS: D = 5 %, RLS: D = 15 % ULS: D = 30 %</p> <p>Gleitweg eines Caissons SLS: 0.2 m, ULS: 1 m</p>

SLS = Service Limit State; RLS = Repair Limit State; ULS = Ultimate Limit State



Sicherheitsniveaus für Wellenbrecher

	Klassifikation (funktional)	Kriterien
III		<p>Wellenüberlauf SLS: $q = 10^{-5} - 10^{-4} \text{ m}^3/\text{ms}$ ULS: $q = 10^{-3} - 10^{-2} \text{ m}^3/\text{ms}$</p> <p>Schaden an Deckschicht SLS: $D = 5 \%$, RLS: $D = 15 \%$ ULS: $D = 30 \%$</p> <p>Gleitweg eines Caissons SLS: 0.0 m, ULS: 0.5 m</p>

SLS = Service Limit State; RLS = Repair Limit State; ULS = Ultimate Limit State



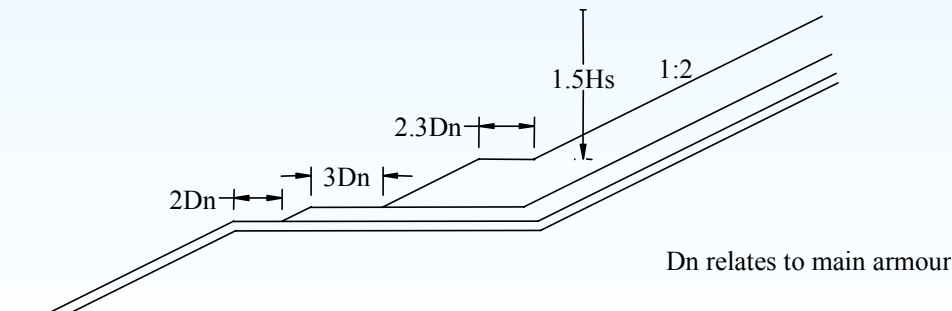
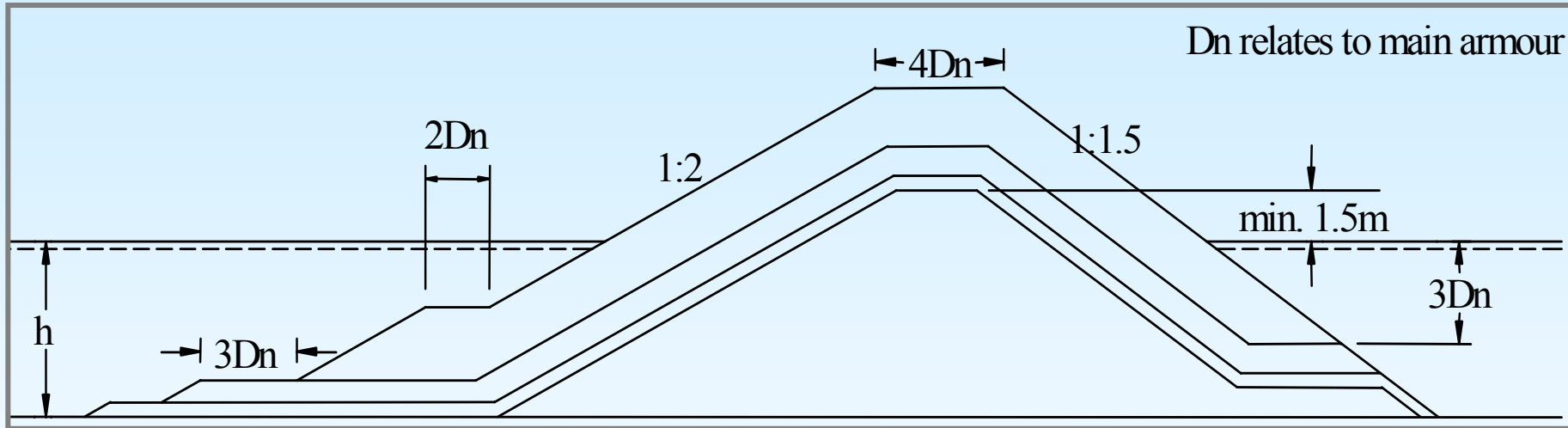
Sicherheitsniveaus für Wellenbrecher

	Klassifikation (funktional)	Kriterien
IV	<p>The diagram illustrates a breakwater cross-section. The top part shows a breakwater with a crest and a seaward slope. Red hatched areas represent wave overtopping. Below the crest, there are two rectangular structures (caissons) with arrows pointing towards each other, indicating a sliding mechanism. The bottom part shows a caisson on a foundation with a red hatched area on its seaward side, representing a sliding mechanism.</p>	<p>Wellenüberlauf SLS: $q = 10^{-5} \text{ m}^3/\text{ms}$ ULS: $q = 10^{-2} \text{ m}^3/\text{ms}$</p> <p>Schaden an Deckschicht SLS: $D = 5 \%$, RLS: $D = 15 \%$ ULS: $D = 30 \%$</p> <p>Gleitweg eines Caissons SLS: 0.0 m, ULS: 0.5 m</p>

SLS = Service Limit State; RLS = Repair Limit State; ULS = Ultimate Limit State



Kostenrechnung für geschüttete Wellenbrecher



- Es werden Schüttsteine und Cubes berücksichtigt.
- Bemessung Freibordhöhe: $H_{st} < 0.5$ m für Wiederkehrintervall = Lebensdauer.



Kostenrechnung für geschüttete Wellenbrecher

Schadensstufen	S (Steine)	N_{od} (Cubes)	$D_{geschätzt}$	Reparatur
Initiation	2	0	2 %	Keine
Serviceability (kleiner Schaden, nur Deckschicht)	5	0.8	5 %	Deckschicht
Repair (größerer Schaden, Deckschicht + Filter 1)	8	2.0	15 %	Deckschicht und Filter 1
Ultimate (Versagen)	13	3.0	30 %	Deckschicht und Filter 1 und 2



Kostenrechnung für geschüttete Wellenbrecher

Reparatur wird kurz nach Erreichen der definierten Schadensgrenzen veranlasst.

- Ausfallkosten werden zu Euro 18,000,000 pro 1km Wellenbrecher geschätzt, wenn Schaden an der Deckschicht $> 15\%$.
- Kostenrechnungen werden mit / ohne Schadensakkumulation.
- Stürme, die Schäden unterhalb der gesetzten Grenzen verursachen, werden nicht berücksichtigt.
- Schadensakkumulation wird berücksichtigt, wenn der nächste Sturm höhere Wellenhöhen H_s als der vorherige Sturm hat.
- Relative Abnahme des Schadens mit Anzahl der Wellen (entsprechend der Van der Meer Formeln für geschüttete Deckschichten) wird berücksichtigt.



Kostenrechnung für geschüttete Wellenbrecher

Alle Kosten werden auf den Zeitpunkt des Baubeginns bezogen.

$$\min_T C(T) = C_I(T) + \sum_{t=1}^{T_L} \left\{ C_{R_1}(T) P_{R_1}(t) + C_{R_2}(T) P_{R_2}(t) + C_F(T) P_F(t) \right\} \frac{1}{(1+r)^t}$$

T	Wiederkehrintervall aus der deterministischen Bemessung
T_L	Lebensdauer
C_{I(T)}	Baukosten
C_{R1}(T)	Reparaturkosten (kleiner Schaden)
P_{R1}(t)	Wahrscheinlichkeit eines kleineren Schadens im Jahr t
C_{R2}(T)	Reparaturkosten (größerer Schaden)
P_{R2}(t)	Wahrscheinlichkeit eines größeren Schadens im Jahr t
C_F(T)	Kosten für Bauwerksversagen (incl. Ausfallkosten)
P_F(t)	Wahrscheinlichkeit eines Bauwerksversagens
r	Zinsrate



Kostenrechnung für geschüttete Wellenbrecher

Fall	Wasser- tiefe	Deck- schicht	Wellen		Stabilitätsformel	Kosten für Kern / Filter 1/ Filter 2/ Deckschicht [EURO/m ³]
			Orgin $H_{S,o}^{100y}$	Distribution $H_{S,o}^{400y}$		
1.2	10 m	Rock 2.65 t/m ³	Follonica 5.64 m	Weibull 6.20 m	van der Meer (1988)	10 / 16 / 20 / 40
1.3	15 m	Cube 2.40 t/m ³	Follonica 5.64 m	Weibull 6.20 m	van der Meer (1988) angepasst auf Neigung 1:2	10 / 16 / 20 / 40
2.3	30 m	Cube 2.40 t/m ³	Sines 13.2 m	Weibull 14.20 m	van der Meer (1988) angepasst auf Neigung 1:2	5 / 10 / 25 / 35



Kostenrechnung für geschüttete Wellenbrecher

Real Interest Rate (%)	Downtime costs	Deterministic design data Freeboard $R_c = 6.6\text{m}$			Optimized armour unit mass W_{50}	Optimum limit state average number of events within service lifetime			Construction costs for 1 km length (EURO)	Total lifetime costs for 1 km length (EURO)
		Design return period, T (years)	H_s^T (m)	Armour unit mass						
			Optimale Sicherheitsniveaus sind höher als auf der Grundlage einer deterministischen Bemessung.							
2	None	100-1000	5.50	18.9	24	0.46	0.013	0.0019	14,853	15,622
5		100-1000	5.50	18.9	22	0.73	0.023	0.0033	14,532	15,181
8		100-1000	5.50	18.9	20	1.11	0.047	0.0065	14,193	14,838
2	200,000 EURO per day in 3 months	100-1000	5.50	18.9	26	0.28	0.007	0.0006	15,159	15,711
5		100-1000	5.50	18.9	24	0.46	0.013	0.0019	14,532	15,353
8		100-1000	5.50	18.9	22	0.73	0.023	0.0033	14,532	15,059

Fall 1.2. Optimale Sicherheitsniveaus, geschüttete Deckschicht, äußerer Wellenbrecher, 10m Wassertiefe, 50 Jahre Lebensdauer. Schadensakkumulation berücksichtigt.



Kostenrechnung für geschüttete Wellenbrecher

Real Interest Rate (%)	Downtime costs	Deterministic design data Freeboard $R_c = 6.6\text{m}$			Optimized armour unit mass W_{50} (t)	Optimum limit state average number of events within service lifetime			Construction costs for 1 km length (1,000 EURO)	Total lifetime costs for 1 km length (1,000 EURO)
		Design return period, T (years)	H_s^T (m)	Armour unit mass W_{50} (t)		SLS	RLS	ULS		
2	None	100-1000	5.50	18.9	24	0.46	0.013	0.0019	14,953	15,622
5		100-1000	5.50	18.9	24	0.46	0.013	0.0019	14,532	15,181
8		100-1000	5.50	18.9	20	1.11	0.047	0.0065	14,193	14,838
2	200,000 EURO per day in 3 months	100-1000	5.50	18.9	26	0.28	0.007	0.0006	15,159	15,711
5		100-1000	5.50	18.9	24	0.46	0.013	0.0019	14,532	15,353
8		100-1000	5.50	18.9	22	0.73	0.023	0.0033	14,532	15,059

Berücksichtigung von Ausfallkosten hat nur einen geringen Einfluss auf die Gesamtkosten

Fall 1.2. Optimale Sicherheitsniveaus, geschüttete Deckschicht, äußerer Wellenbrecher, 10m Wassertiefe, 50 Jahre Lebensdauer. Schadensakkumulation berücksichtigt.



Kostenrechnung für geschüttete Wellenbrecher

Real Interest Rate (%)	Downtime costs	Deterministic design data Freeboard $R_c = 6.6\text{m}$			Optimized armour unit mass W_{50} (t)	Optimum limit state average number of events within service lifetime			Construction costs for 1 km length (1,000 EURO)	Total lifetime costs for 1 km length (1,000 EURO)
		Design return period, T (years)	H_s^T (m)	Armour unit mass W_{50} (t)		SLS	RLS	ULS		
2	None	100-1000	5.50	18.9	24	0.46	0.013	0.0019	14,853	15,622
5		100-1000	5.50	18.9	22	0.73	0.023	0.0033	14,532	15,181
8		100-1000	5.50	18.9	22	1.11	0.047	0.0065	14,193	14,838
2	100-1000 EURO per day in 3 months	100-1000	5.50	18.9	24	0.28	0.007	0.0006	15,159	15,711
5		100-1000	5.50	18.9	24	0.46	0.013	0.0019	14,532	15,353
8		100-1000	5.50	18.9	22	0.73	0.023	0.0033	14,532	15,059

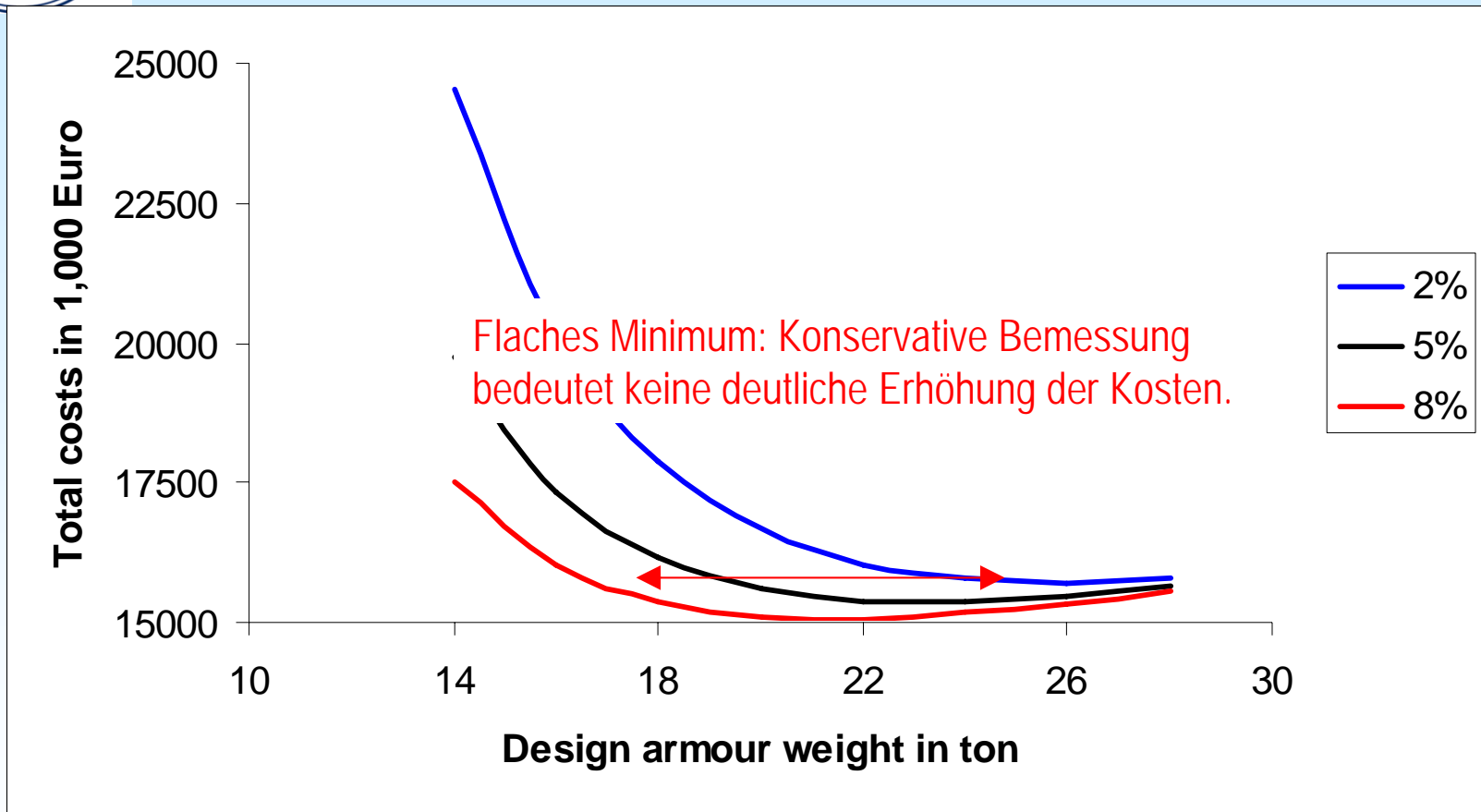
Bemessung auf SLS ist maßgebend.

Wahrscheinlichkeit für Versagen ist sehr gering.

Fall 1.2. Optimale Sicherheitsniveaus, geschüttete Deckschicht, äußerer Wellenbrecher, 10m Wassertiefe, 50 Jahre Lebensdauer. Schadensakkumulation berücksichtigt.



Kostenrechnungen für geschüttete Wellenbrecher



Fall 1.2. Optimale Sicherheitsniveaus, geschüttete Deckschicht, äußerer Wellenbrecher, 10m Wassertiefe, 50 Jahre Lebensdauer. Schadensakkumulation berücksichtigt.



Kostenrechnungen für geschüttete Wellenbrecher

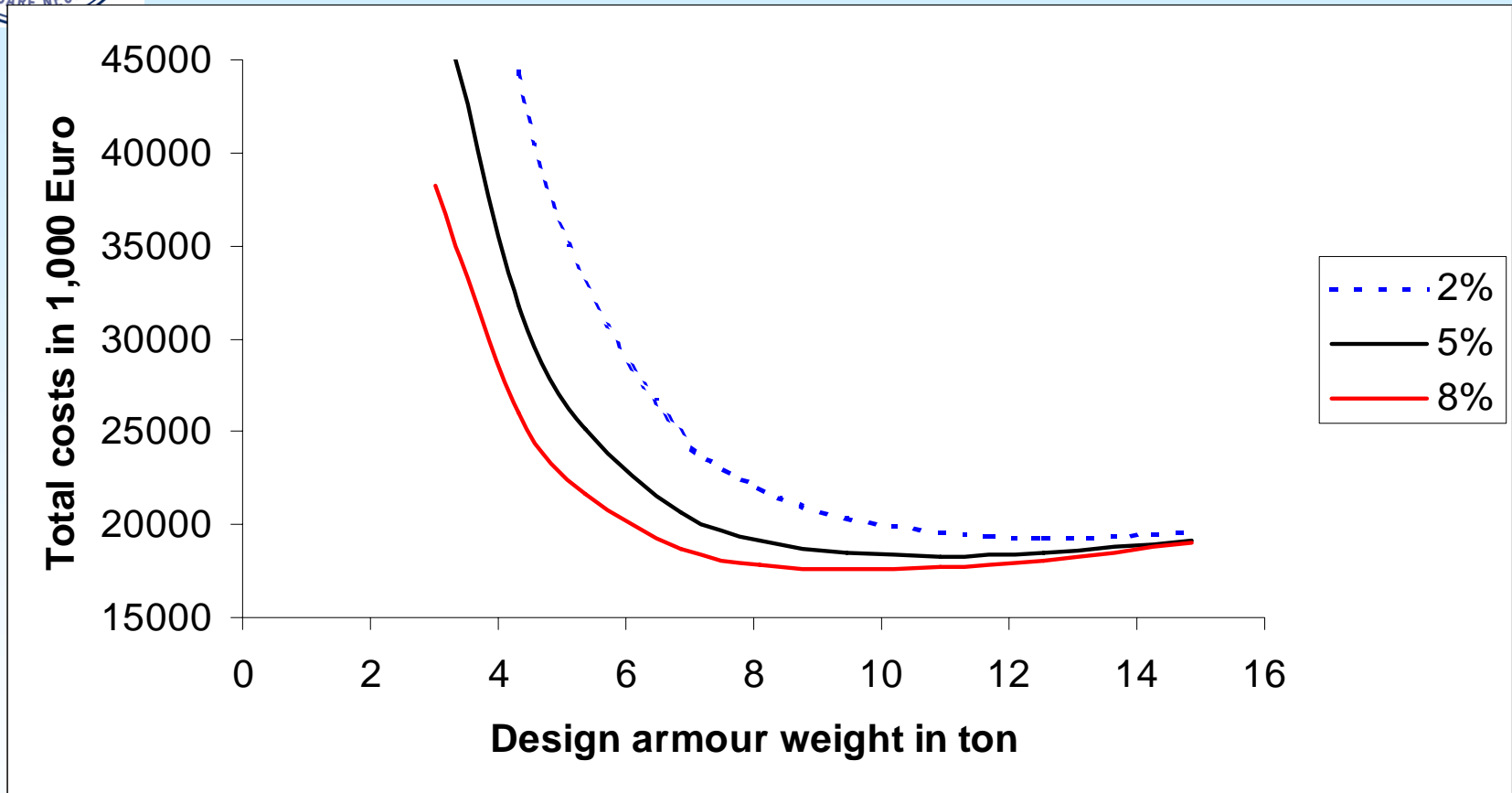
Real Interest Rate (%)	Downtime costs	Optimum design data				Optimum limit state average number of events within service lifetime			Construction costs for 1 km length	Total lifetime costs for 1 km length (1,000 EURO)
		Optimized design	H_s^T	Optimum armour	Free-board					
2	None	400	6.20	12.5	6.3	1.11	0.008	0.001	17,494	19,268
5		200	5.92	10.9	6.0	1.84	0.015	0.003	16,763	18,318
8		100	5.64	9.5	5.8	2.98	0.031	0.008	16,038	17,625
2	200,000 EURO per day in 3 months	400	6.20	12.5	6.3	1.11	0.008	0.002	17,494	19,391
5		200	5.92	10.9	6.0	1.82	0.015	0.004	16,763	18,453
8		100	5.64	9.5	5.8	2.98	0.031	0.008	16,038	17,821

Optimales Sicherheitsniveau sinkt mit steigender Zinsrate. Bei hohen Zinsraten ist es daher wirtschaftlicher auf häufigere Reparaturen zu bemessen.

Fall 1.3. Optimale Sicherheitsniveaus, Cubes, 15m Wassertiefe, 50 Jahre Lebensdauer. Schadensakkumulation berücksichtigt.



Kostenrechnungen für geschüttete Wellenbrecher



Fall 1.3. Optimale Sicherheitsniveaus, Cubes, 15m Wassertiefe, 50 Jahre Lebensdauer. Schadensakkumulation berücksichtigt.



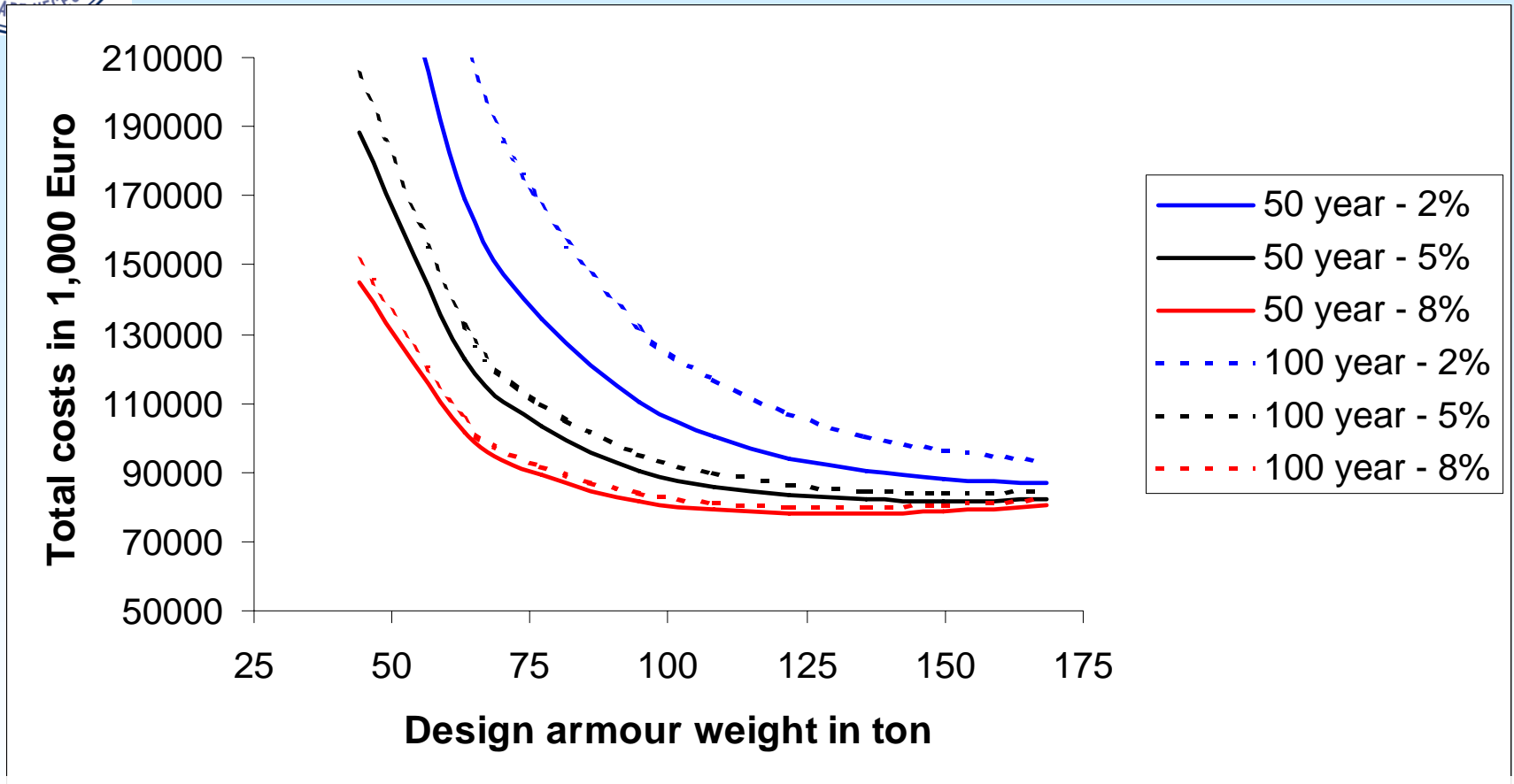
Kostenrechnungen für geschüttete Wellenbrecher

Lifetime (years)	Real Interest Rate (%)	Optimum design data				Optimum limit state average number of events within structure lifetime			Construction costs for 1 km length (1,000 EURO)	Total lifetime costs for 1 km length (1,000 EURO)
		Optimized design return period, T (years)	H_s^T (m)	Optimum armour unit mass W (t)	Free- board Rc (m)	SLS	RLS	ULS		
50	2	1000	14.7	168	14.8	1.21	0.008	0.001	76,907	86,971
	5	400	14.2	150	14.8	1.84	0.016	0.003	73,722	81,875
	8	100	13.2	122	14.8	3.39	0.052	0.012	68,635	78,095
100	2	1000	14.7	168	15.4	2.68	0.013	0.002	78,423	93,440
	5	400	14.2	150	15.4	3.90	0.029	0.005	75,201	84,253
	8	200	13.7	136	15.4	5.28	0.056	0.011	72,675	79,955

Fall 2.3. Optimale Sicherheitsniveaus, Cubes, 30m Wassertiefe, 50 oder 100 Jahre Lebensdauer. Schadensakkumulation berücksichtigt. Ausfallkosten von 200.000 EURO pro Tag für drei Monate bei Schaden $D > 15\%$.



Kostenrechnungen für geschüttete Wellenbrecher



Fall 2.3. Optimale Sicherheitsniveaus, Cubes, 30m Wassertiefe, 50 oder 100 Jahre Lebensdauer. Schadensakkumulation berücksichtigt. Ausfallkosten von 200.000 EURO pro Tag für drei Monate bei Schaden $D > 15\%$.



Kostenrechnungen für geschüttete Wellenbrecher

Vorläufige Schlussfolgerungen

- Optimale Sicherheitsniveaus sind höher als diejenigen aus der deterministischen Bemessung, besonders für tiefenbegrenzten Seegang und/oder geringe Zinsraten.
- Kritischer Grenzzustand für Serviceability Limit State (SLS) ist maßgebend. Eine Bemessung auf SLS und Reparatur wenn SLS-Schaden erreicht ist, impliziert, dass große Schäden oder Versagen eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit haben.
- Optimale Sicherheitsniveaus werden erreicht, wenn SLS ein bis zweimal in 50 Jahren erreicht bzw. überschritten werden, bei Zinsrate zwischen 2 und 5 %. Für höhere Zinsraten erhöht sich die Eintrittswahrscheinlichkeit von SLS und führt zu weniger sicheren Bauwerken.



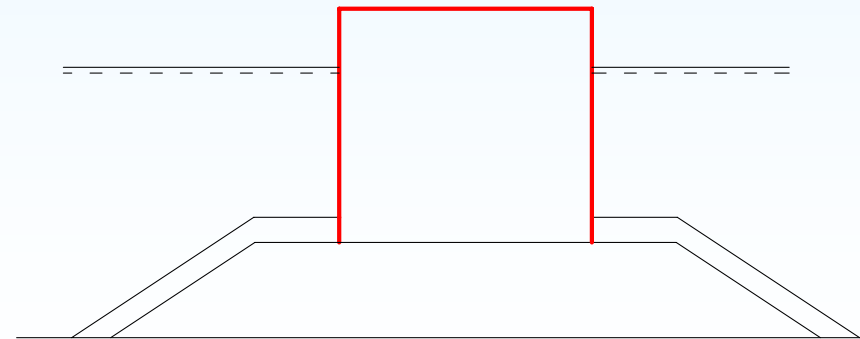
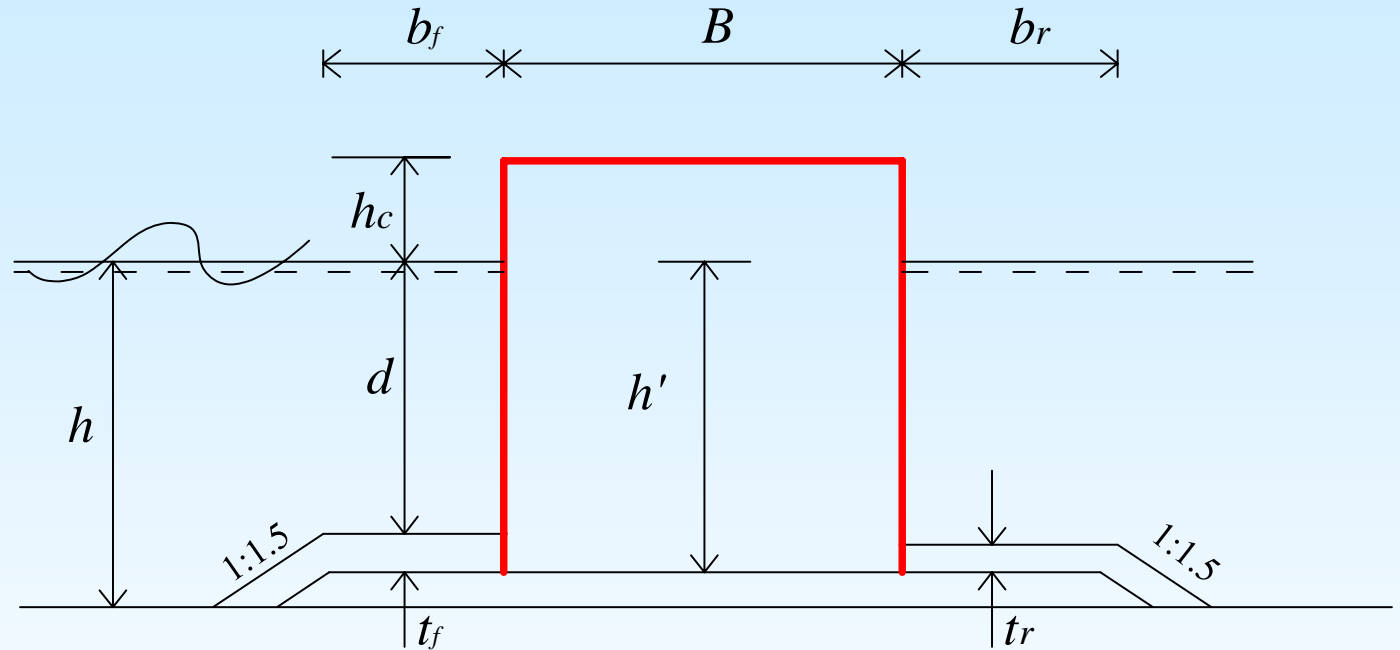
Kostenrechnungen für geschüttete Wellenbrecher

Vorläufige Schlussfolgerungen

- Gesamtkosten in Abhängigkeit des Sicherheitsniveaus zeigen sehr flache Minima. Dies bedeutet, dass eine auf der sicheren Seite liegende Bemessung mit wenigen Reparaturen nur zu geringfügig höheren Kosten als eine kostenoptimierte Bemessung führt.
- Kenntnis der Schadensakkumulation ist wichtig für die Einschätzung optimaler Sicherheitsniveaus. Die Verifikation der Wahl des Schadensakkumulationsmodells läuft noch.
- Ausfallkosten scheinen einen marginalen Einfluss auf die Gesamtkosten zu haben (relativ zu Baukosten und Reparaturkosten).
- Bisherige Ergebnisse zeigen, dass die optimalen Sicherheitsniveaus für geschüttete Wellenbrecher in den Klassen III und IV nahezu identisch zu den Klassen I und II sind.



Kostenrechnungen für Caisson-Wellenbrecher



**Caisson auf flacher bzw.
hoher Gründung;**

Freibordhöhe $R_c = 0.6 H_s^{TL}$

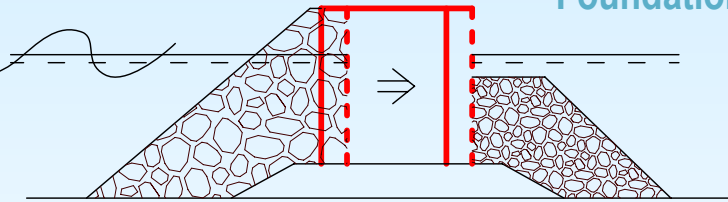




Kostenrechnungen für Caisson-Wellenbrecher

Gesamtkosten für Bau eines Caissons, Euro / m³

Structure part	Europe	Japan
Caisson	90	150
Armour layers	150	235
Foundation core	25	37



Kosten für Reparatur, Euro / m³

Structure part	Europe	Japan
Blocks in front	150	200
Mound behind	25	50

Grenzzustände

Limit states	Sliding distance (m)	Repair
Serviceability SLS	0.2	No
Repairable RLS	0.5	Dissipation blocks in front, or mound behind
Ultimate ULS	2.0	Both



Kostenrechnung für Caisson-Wellenbrecher

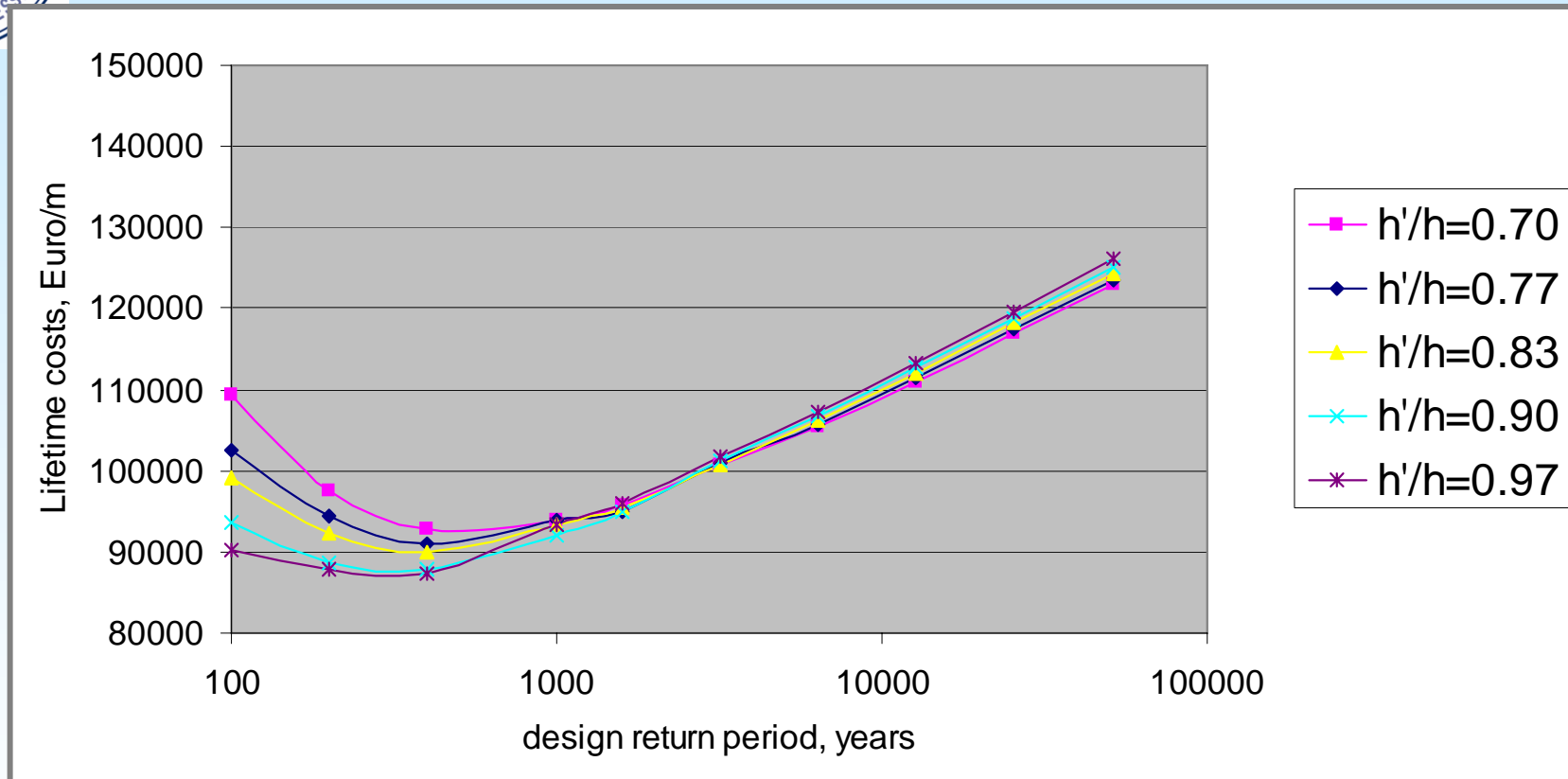
Data for deterministic design $S_{\text{sliding}} = 1.2$, $S_{\text{tilting}} = 2.5$							Failure probability in structure lifetime corresponding to minimum lifetime costs				Costs	
Caisson draft, h'	Toe level, d below SWL	Return period	H_s	Caisson width, B	Effective width, b	Aver. normal stress, σ	SLS	RLS	ULS	Slip failure	Construction	Lifetime
(m)	(-m)	(years)	(m)	(m)	(m)	(KN/m ²)					(€/m)	(€/m)
10.5	9.0	1000	6.56	33	30	213	0.022	0.020	0.012	0.050	90453	94161
11.5	10.0	400	6.2	29	25	245	0.070	0.060	0.044	0.070	83606	90696
12.5	11.0	200	5.92	27	22	281	0.088	0.076	0.056	0.088	78396	90155
13.5	12.0	200	5.92	26	24	309	0.104	0.088	0.076	0.074	78354	88682
14.5	13.0	200	5.92	26	21	341	0.124	0.100	0.082	0.030	78363	87174

Caissonwellenbrecher, Reparatur mit Blöcken vor Caisson, 15m Tiefe,

100 Jahre Lebensdauer, $H_s^{TL} = 5.64\text{m}$, $H_s/h = 0.38$, $R_c = 3.38\text{m}$, $\mu = 0.6$, $\varphi = 38^\circ$, $\psi = 25^\circ$.



Kostenrechnung für Caisson-Wellenbrecher



Caisson breakwater, hard bed, repair with blocks in front, 15m depth, 100 year life,

$H_s^{TL} = 5.64\text{m}$, $H_s/h = 0.38$, $R_c = 3.38\text{m}$, $\mu = 0.6$.



Kostenrechnung für Caisson-Wellenbrecher

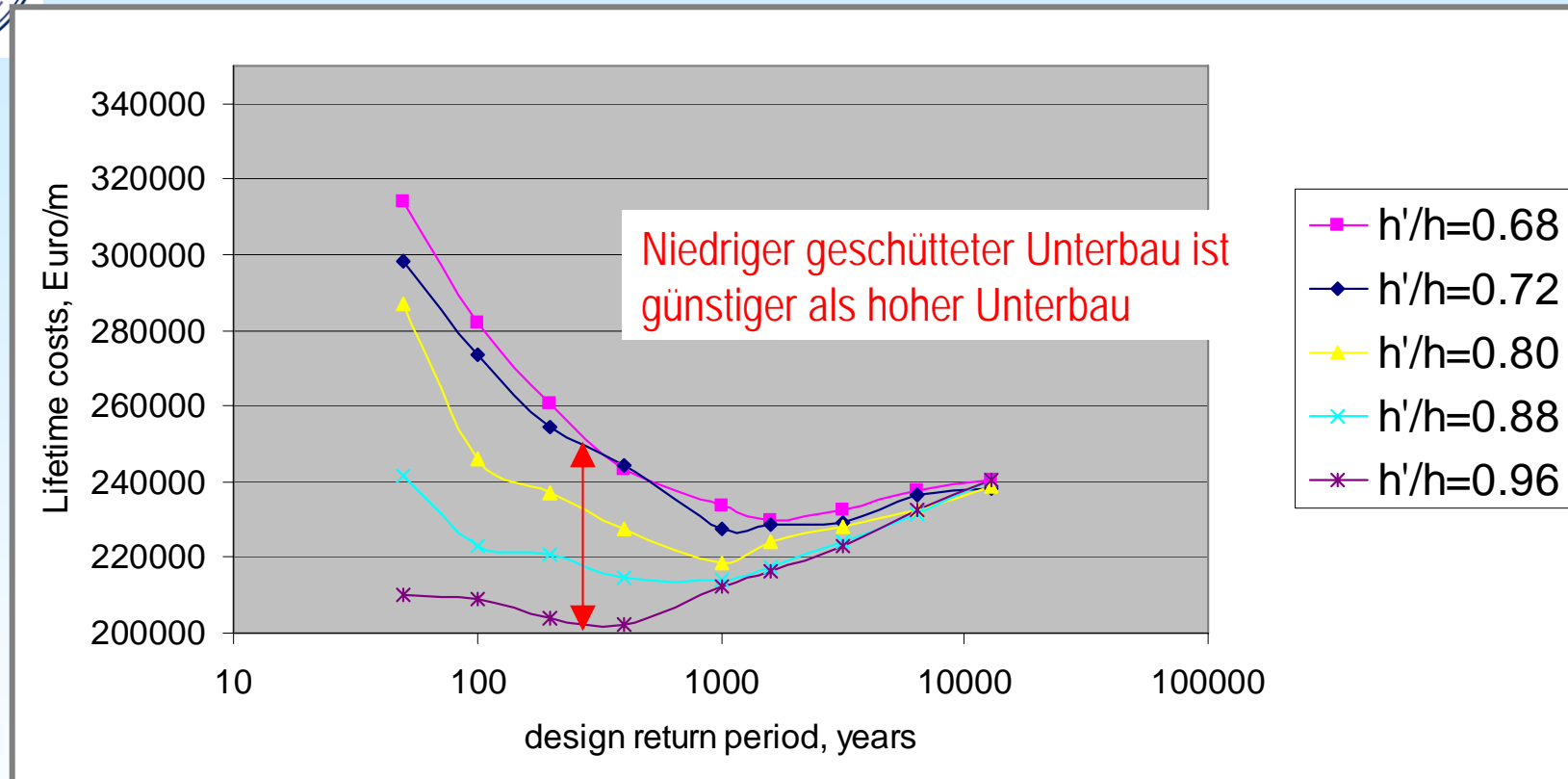
Data for deterministic design $S_{\text{sliding}} = 1.2, S_{\text{tilting}} = 2.5$							Failure probability in structure lifetime corresponding to minimum lifetime costs				Costs	
Caisson draft, h'	Toe level, d below SWL	Return period	H_s	Caisson width, B	Effective width, b	Aver. normal stress, σ	SLS	RLS	ULS	Slip failure	Construction	Lifetime
(m)	(-m)	(years)	(m)	(m)	(m)	(KN/m ²)					(€/m)	(€/m)
17.0	15.0	1600	9.97	47	32	354	0.018	0.010	0.006	0.112	208010	229977
18.0	16.0	1000	9.77	45	30	383	0.027	0.016	0.007	0.137	202525	227579
20.0	18.0	1000	9.77	45	29	432	0.021	0.016	0.008	0.072	203317	218507
22.0	20.0	1000	9.77	44	27	487	0.028	0.017	0.007	0.049	204342	213930
24.0	22.0	400	9.38	40	23	574	0.051	0.034	0.016	0.030	193049	202403

Caisson breakwater, repair with blocks in front, 25m depth, 100 year life,

$H_s^{TL} = 8.76\text{m}, H_s/h = 0.35, R_c = 3.38\text{m}, \mu = 0.6, \varphi = 38^\circ, \psi = 25^\circ.$



Kostenrechnung für Caisson-Wellenbrecher



Caisson breakwater, repair with blocks in front, 25m depth, 100 year life,

$H_s^{TL} = 8.76\text{m}$, $H_s/h = 0.35$, $R_c = 3.38\text{m}$, $\mu = 0.6$, $\varphi = 38^\circ$, $\psi = 25^\circ$.



Kostenrechnung für Caisson-Wellenbrecher

Vorläufige Schlussfolgerungen

- Eine niedriger geschütteter Unterbau ist etwas günstiger als ein hoher geschütteter Unterbau.
- Reparatur mit Blöcken vor dem Caisson ist teurer als Blöcke auf der Rückseite des Caissons (wirkt aber nicht auf Druckschläge).
- Wenn eine Reparatur mit Blöcken vor dem Caisson beabsichtigt ist, sollte auf eine sehr geringe Versagenswahrscheinlichkeit bemessen werden.
- Reparaturphilosophie beeinflusst das optimale Sicherheitsniveau.



Fragen???

Kontakt:

Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf

E-Mail:

schuettrumpf@hamburg.baw.de

