

# „Naturuntersuchungen zur Einfahrt von GMS in das SHW Lüneburg und Modellierung von Schiffsbewegungen und schiffserzeugten Wellen“

BAW-Kolloquium am 16. Juni 2005

[zurück zum Programm](#)

[zur Kurzfassung](#)

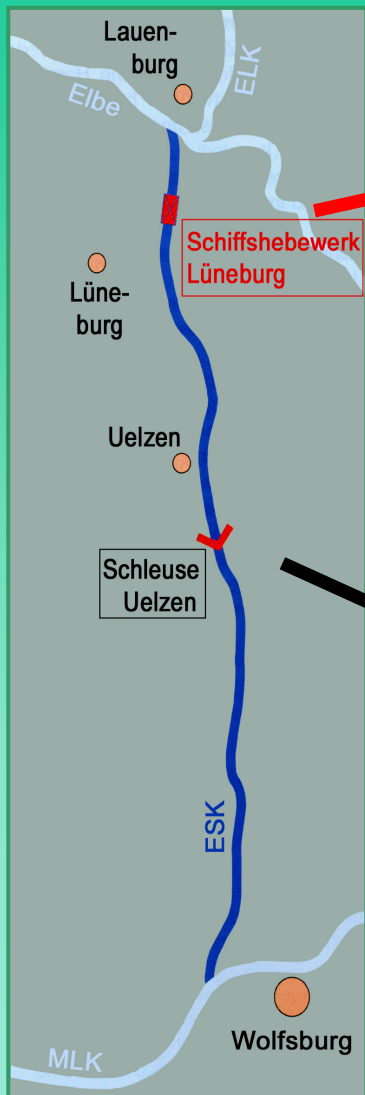


**Teil 1: Versuchsdurchführung und semiempirische Berechnungen**  
Dipl.-Ing. D. Spitzer, BAW, Karlsruhe

**Teil 2: Numerische Simulation und Modellkalibrierung**  
Dipl.- Ing. N. Stuntz, DST, Duisburg



# Ausgangssituation



## Schiffshebewerk Lüneburg

nutzbare Länge der Tröge: **100 m**

nutzbare Breite der Tröge: 12,0 m

nomielle Trogwassertiefe: **3,38 m**



## Schleuse Uelzen ( I und II )

nutzbare Kammerlängen: 185/190 m

nutzbare Kammerbreiten: 12,0/12,5 m

Kammerwassertiefe (UW): 4,00 m

## Erlaubte Schiffsabmessungen im Elbe-Seitenkanal

Fahrzeuglänge	Fahrzeugbreite	Abladetiefe
<b>100 m</b> (Schubverbände: 185 m)	11,45 m	<b>2,80 m</b>

**Elbe-Seitenkanal**



# Aufgabenstellung und Bearbeitungsziele

## 1. P H A S E

Durchführung und Auswertung von Naturversuchen mit einem GMS  
\_MS „Loetschental“ (Abladetiefe: 2,80 m, Länge \* Breite = 95 m \* 11,40 m)

### Kriterien für die Bewertung:

#### Einfahrten:

- Sicherheit vor Aufsetzen auf den Trogboden
- Sicherheit vor Anspringen der Entlastungsöffnungen
- Einhaltung der zulässige Troghaltekkräfte

#### Ausfahrten:

- Sicherheit vor Trogbodenberührung

## 2. P H A S E

Prognoserechnungen für veränderte Randbedingungen

### Zusätzliche Berücksichtigung der

- Schiffsbreiten von 11,65 m, 10,5 m und 9,6 m
- veränderlicher Abladetiefen von 2,50 m und 2,80 m
- Erhöhung der Trogwassertiefe von 3,38 m auf 3,50 m
- Sicherheit vor Toranfahrungen (Stoßschutzbemessung)



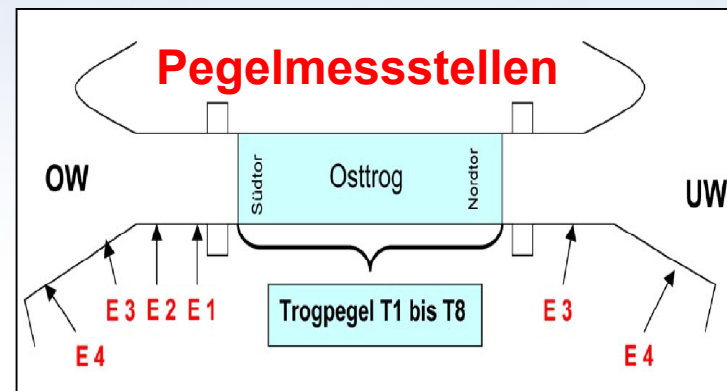
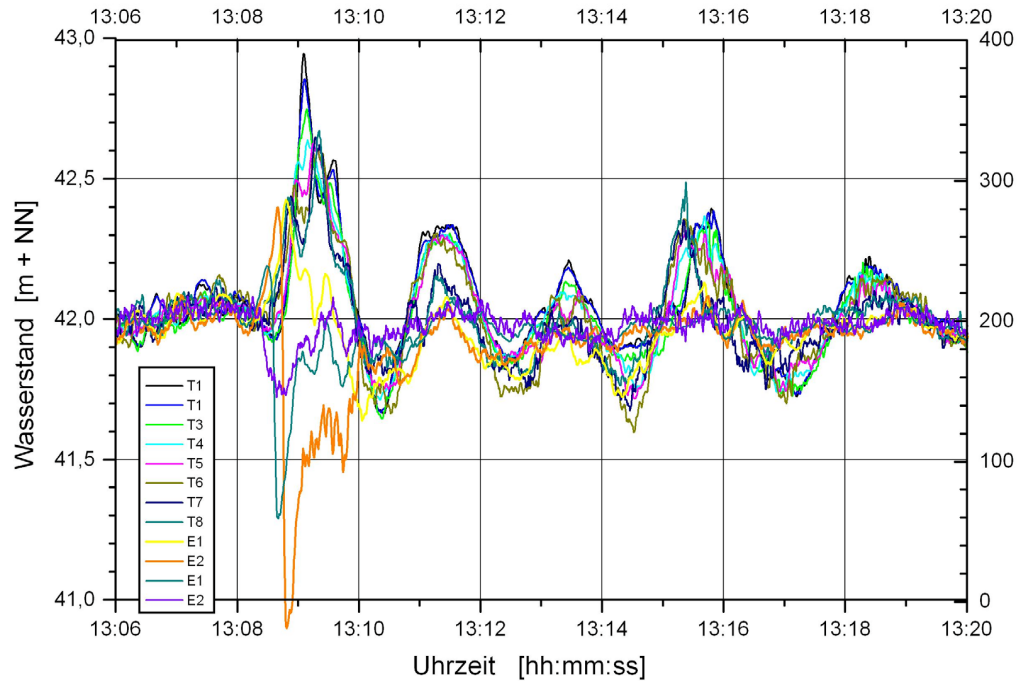
# Versuchsdurchführung: 1. Wasserspiegellagemesungen





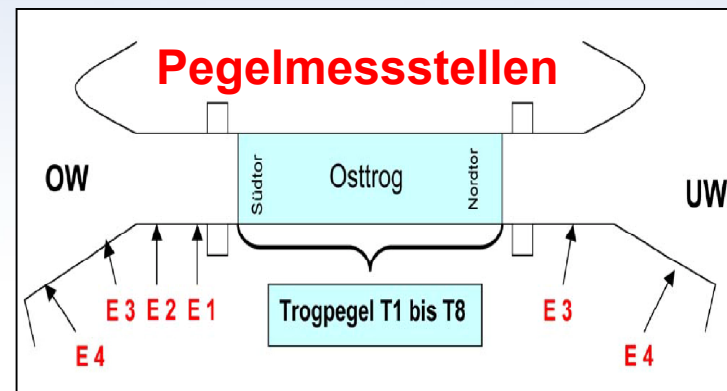
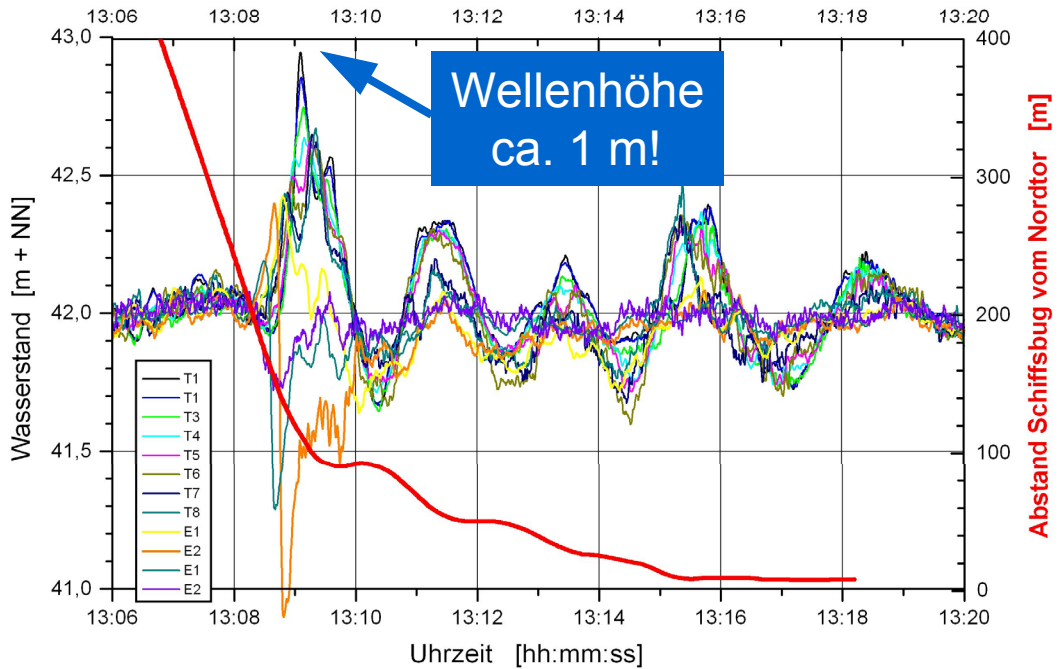
# Versuchsdurchführung: 1. Wasserspiegellagemessungen

Trogeinfahrt EOW-5,  
Anfahrsgeschwindigkeit  
 $v_{\text{Anf}} = 8,0 \text{ km/h}$



# Versuchsdurchführung: 1. Wasserspiegellagemessungen

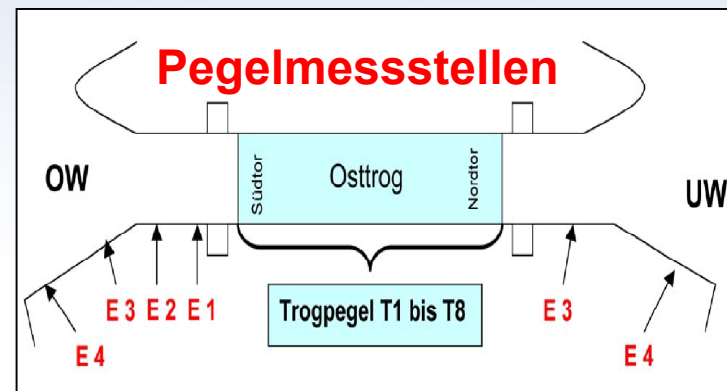
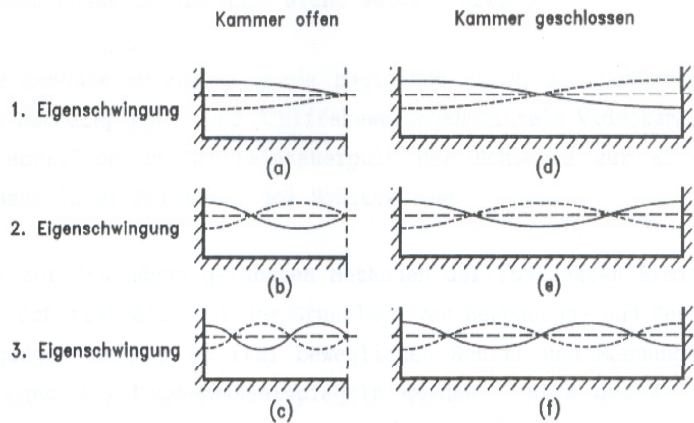
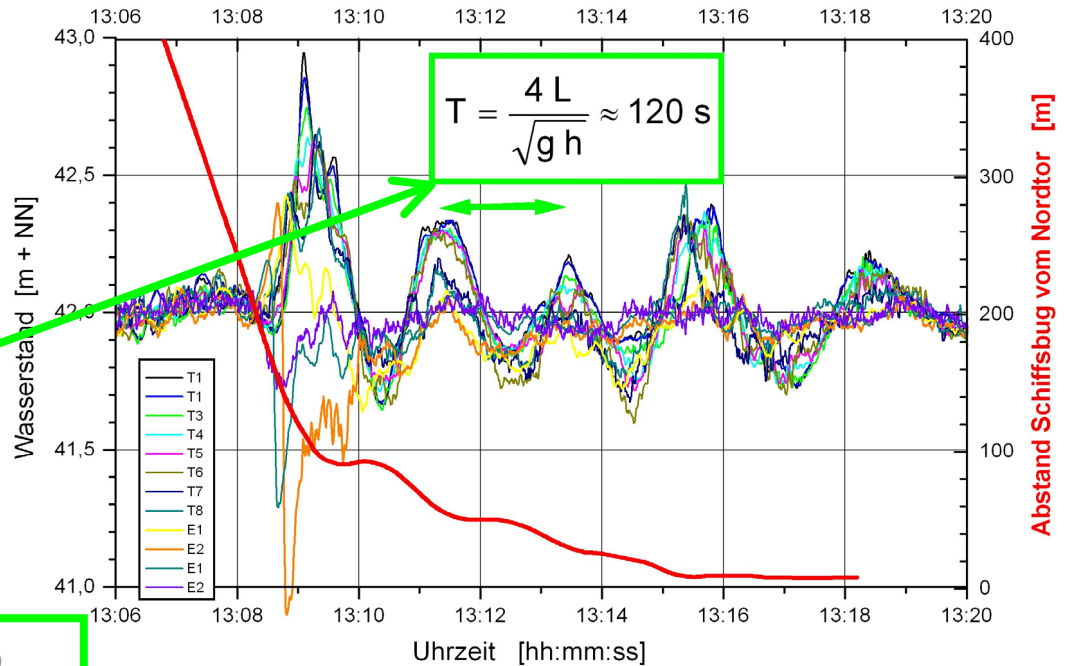
Trogeinfahrt EOW-5,  
Anfahrsgeschwindigkeit  
 $v_{\text{Anf}} = 8,0 \text{ km/h}$



# Versuchsdurchführung: 1. Wasserspiegellagemessungen

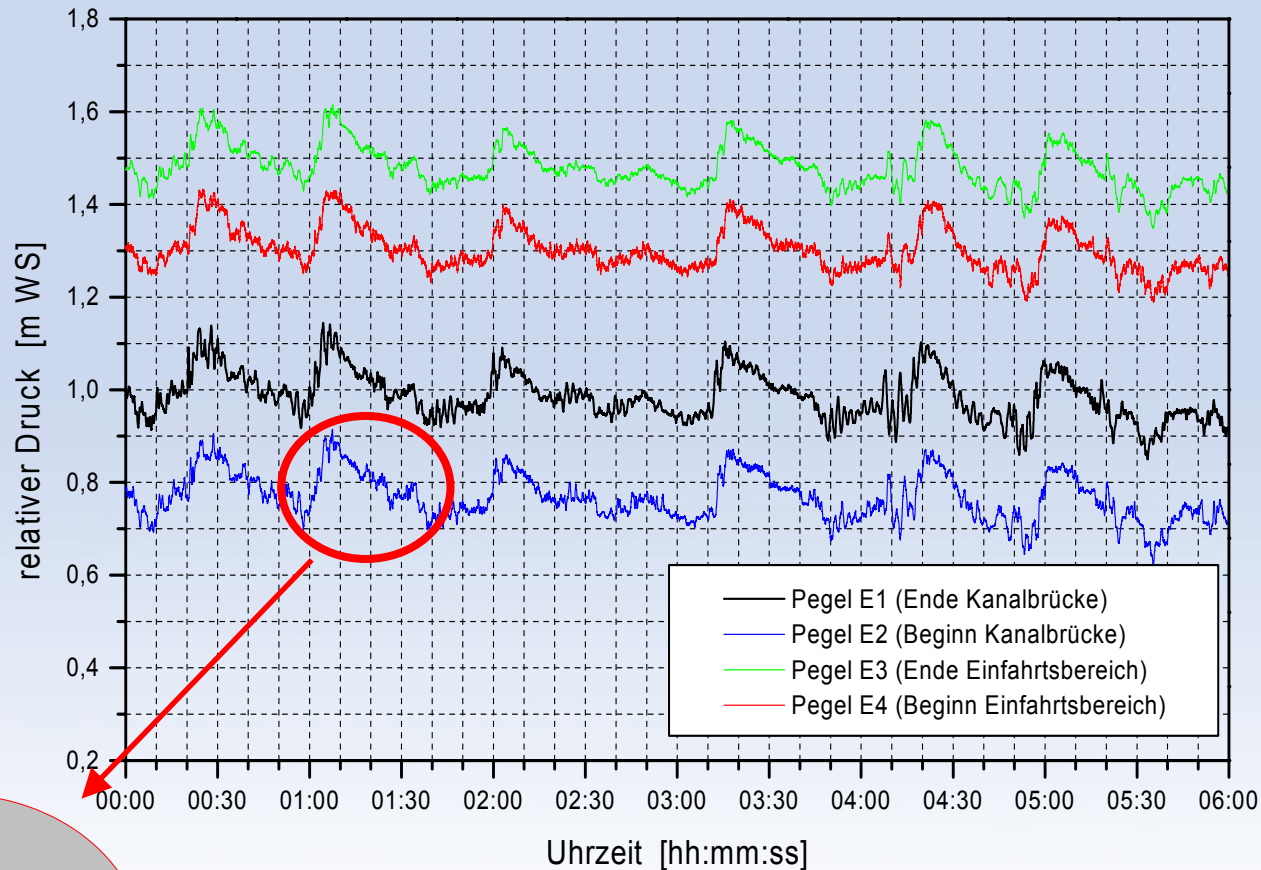
Trogeinfahrt EOW-5,  
Anfahrsgeschwindigkeit  
 $v_{Anf} = 8,0 \text{ km/h}$

Eigenschwingungen in einem  
geschlossenen Becken (schem.)



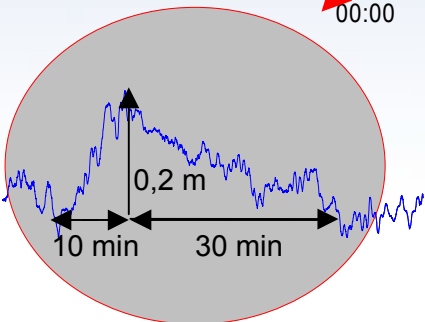


# Versuchsdurchführung: 2. Schwallversuche im OW



**Schlussfolgerung:**

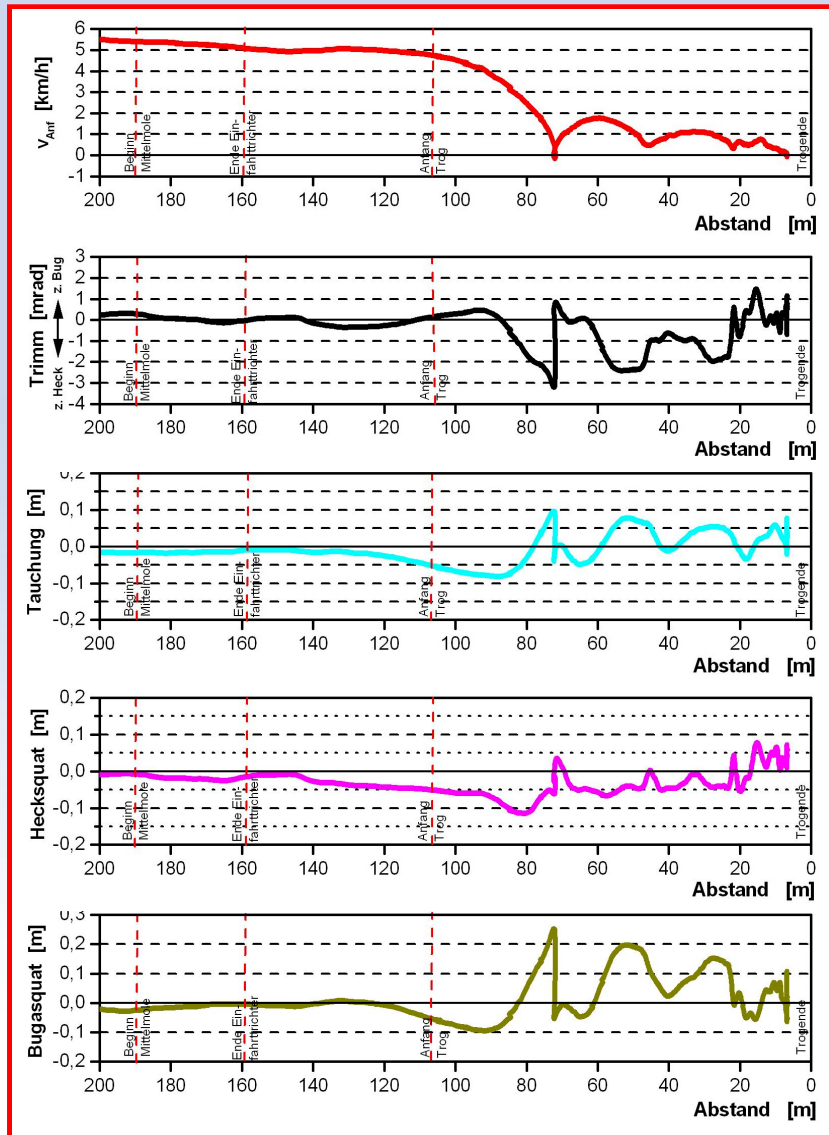
**Die dynamischen Stauspiegelschwankungen sind bei den Belastungsannahmen zu berücksichtigen**



## Versuchsdurchführung: 3. Tachymetermessungen



# Versuchsdurchführung: 3. Tachymetermessungen



← Schiffsgeschwindigkeit

← Vertrimmung

← Schiffstauchung

← Heckabsenkung

← Bugabsenkung





# Versuchsergebnisse

1. Wasserspiegelanstau bei Trogeinfahrten



2. Einhaltung der zulässigen Troghaltekraft



3. Fahrgeschwindigkeiten und -zeiten bei Einfahrten



4. Stoßschutzberechnung

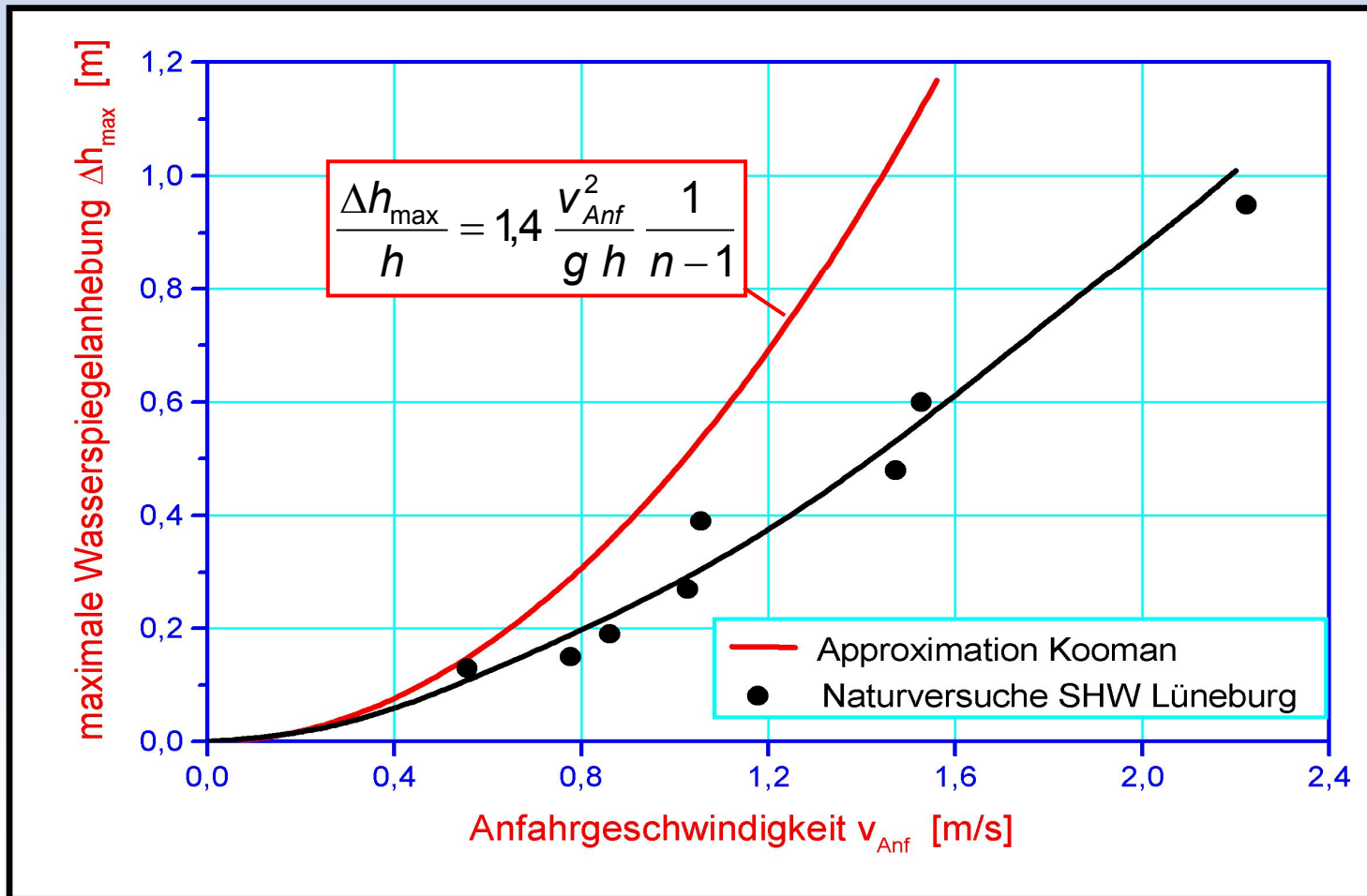


5. Dynamische Schiffsabsenkung (Squat)



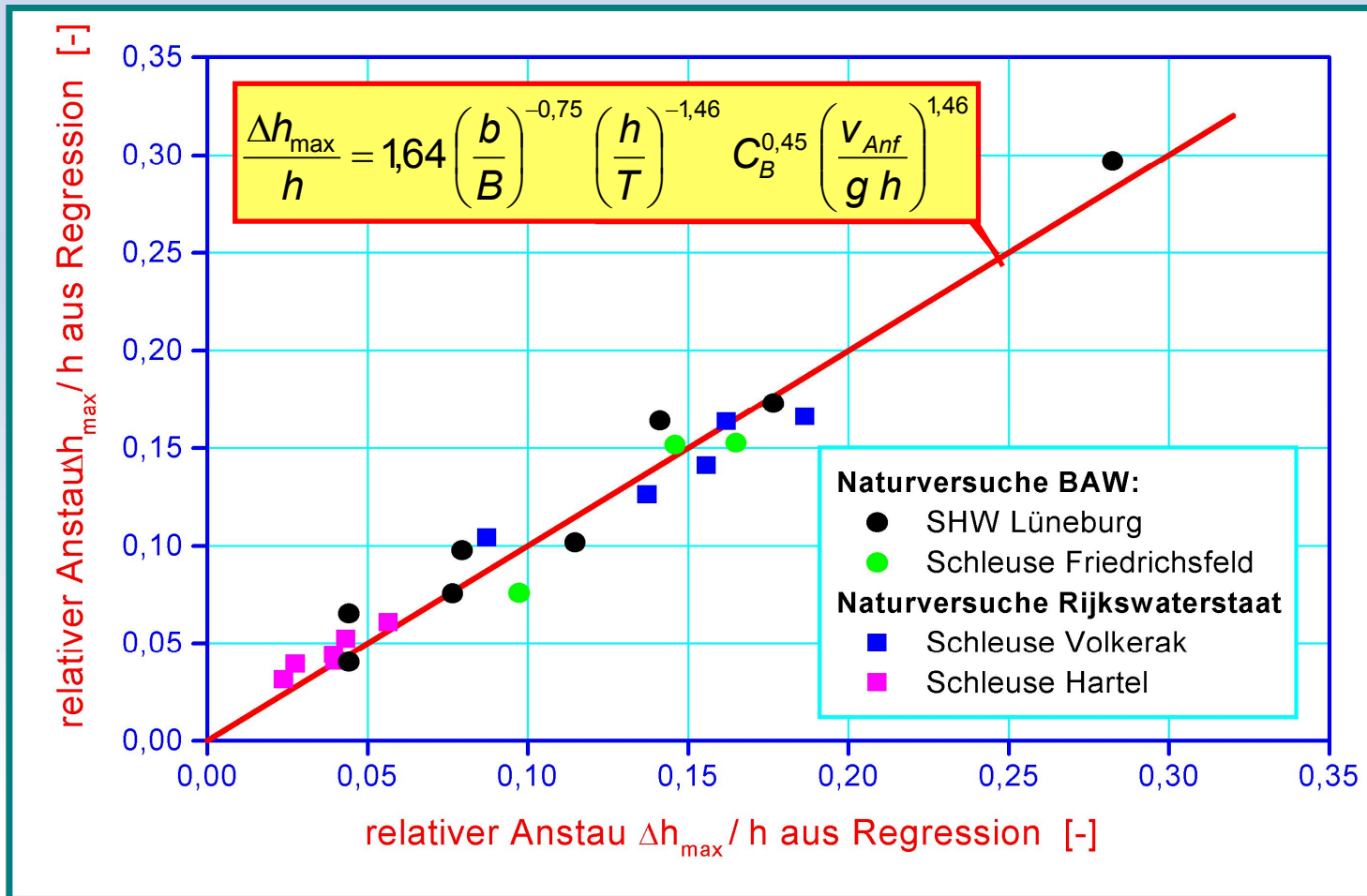
# 1 Wasserspiegelanstau bei Trogeinfahrten

## 1.1 Ansatz für die maximale Spiegelanhebung



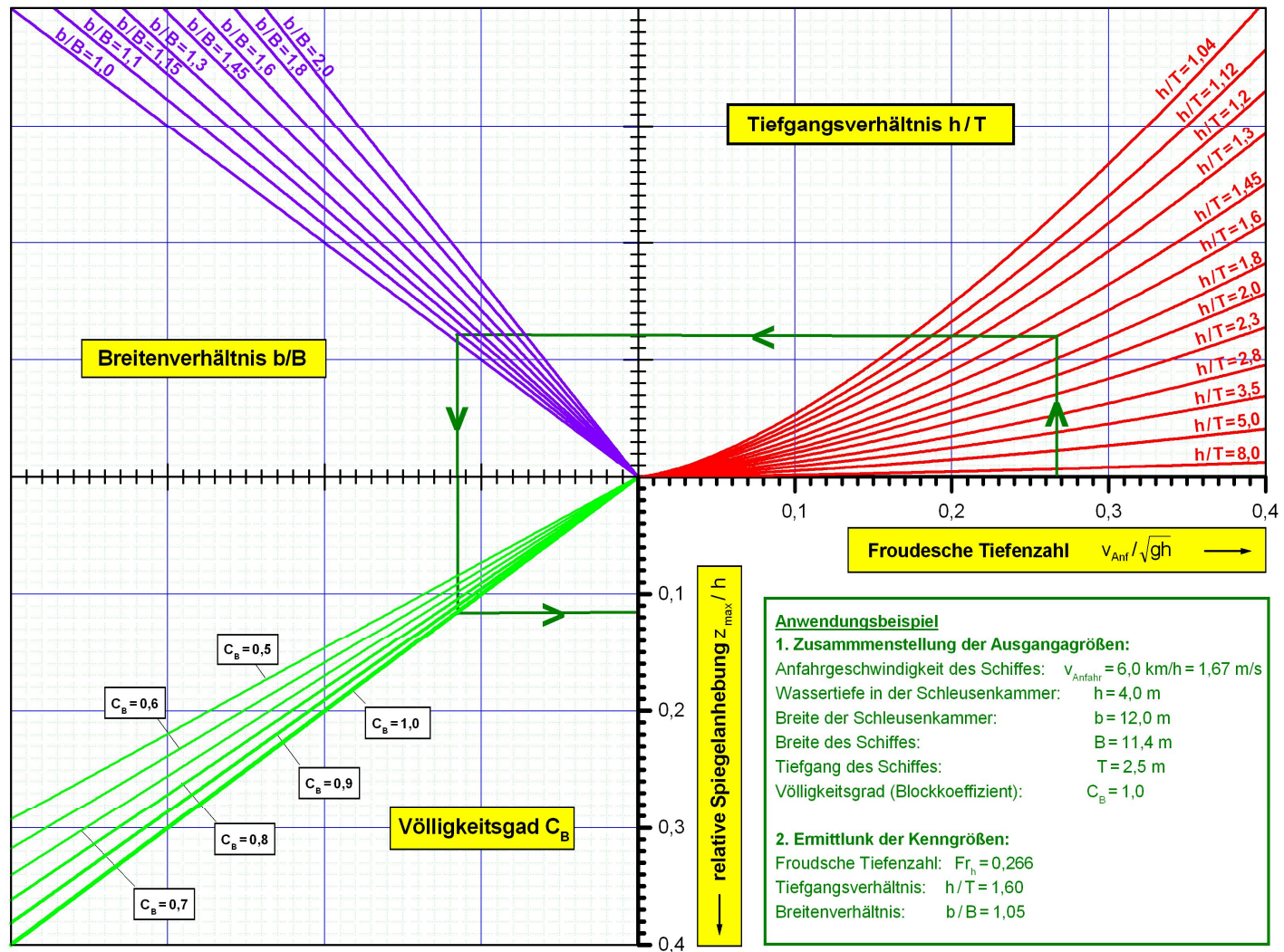
# 1 Wasserspiegelanstau bei Trogeinfahrten

## 1.1 Ansatz für die maximale Spiegelanhebung





# 1.2 Grafik zur Maximale Spiegelanhebung bei Schleuseneinfahrten



**Anwendungsbeispiel**

**1. Zusammenstellung der Ausgangsgrößen:**  
 Anfahrsgeschwindigkeit des Schiffes:  $v_{Anfahr} = 6,0 \text{ km/h} = 1,67 \text{ m/s}$   
 Wassertiefe in der Schleusenkammer:  $h = 4,0 \text{ m}$   
 Breite der Schleusenkammer:  $b = 12,0 \text{ m}$   
 Breite des Schiffes:  $B = 11,4 \text{ m}$   
 Tiefgang des Schiffes:  $T = 2,5 \text{ m}$   
 Völligkeitsgrad (Blockkoeffizient):  $C_B = 1,0$

**2. Ermittlung der Kenngrößen:**  
 Froudesche Tiefenzahl:  $Fr_h = 0,266$   
 Tiefgangsverhältnis:  $h/T = 1,60$   
 Breitenverhältnis:  $b/B = 1,05$



# 1.3 Prognose der Anfahrgeschwindigkeit im SHW Lüneburg beim Anspringen der Entlastungsöffnungen<sup>1</sup>

$v_{\text{Anfahr}}$  in km/h

h [m]	B=11,65 m		B=11,40 m		B=10,50 m		B=9,60 m	
	T=2,5 m	T=2,8 m	T=2,5 m	T=2,8 m	T=2,5 m	T=2,8 m	T=2,5 m	T=2,8 m
3,20	6,78	6,05	6,85	6,12	7,15	6,39	7,49	6,69
3,25	6,48	5,79	6,56	5,85	6,84	6,11	7,16	6,39
3,30	6,17	5,50	6,24	5,57	6,51	5,81	6,81	6,08
3,35	5,83	5,21	5,89	5,26	6,15	5,49	6,44	5,75
3,40	5,47	4,88	5,53	4,94	5,77	5,15	6,04	5,39
3,45	5,08	4,54	5,14	4,59	5,36	4,78	5,61	5,01
3,50	4,67	4,17	4,72	4,21	4,92	4,39	5,15	4,60
3,55	4,21	3,76	4,26	3,81	4,45	3,97	4,65	4,15
3,60	3,72	3,32	3,77	3,36	3,93	3,51	4,11	3,67

<sup>1</sup>Annahmen: Dynamische Stauspiegelanhebung  $z_{\text{dyn}} = 0,2$  m;  $C_B = 0,88$ , UK Entlastungsöffnungen 4,03 m über Trogboden

**Zulässige Anfahrgeschwindigkeit für das größte Schiff aus dem Kriterium Freibord:**

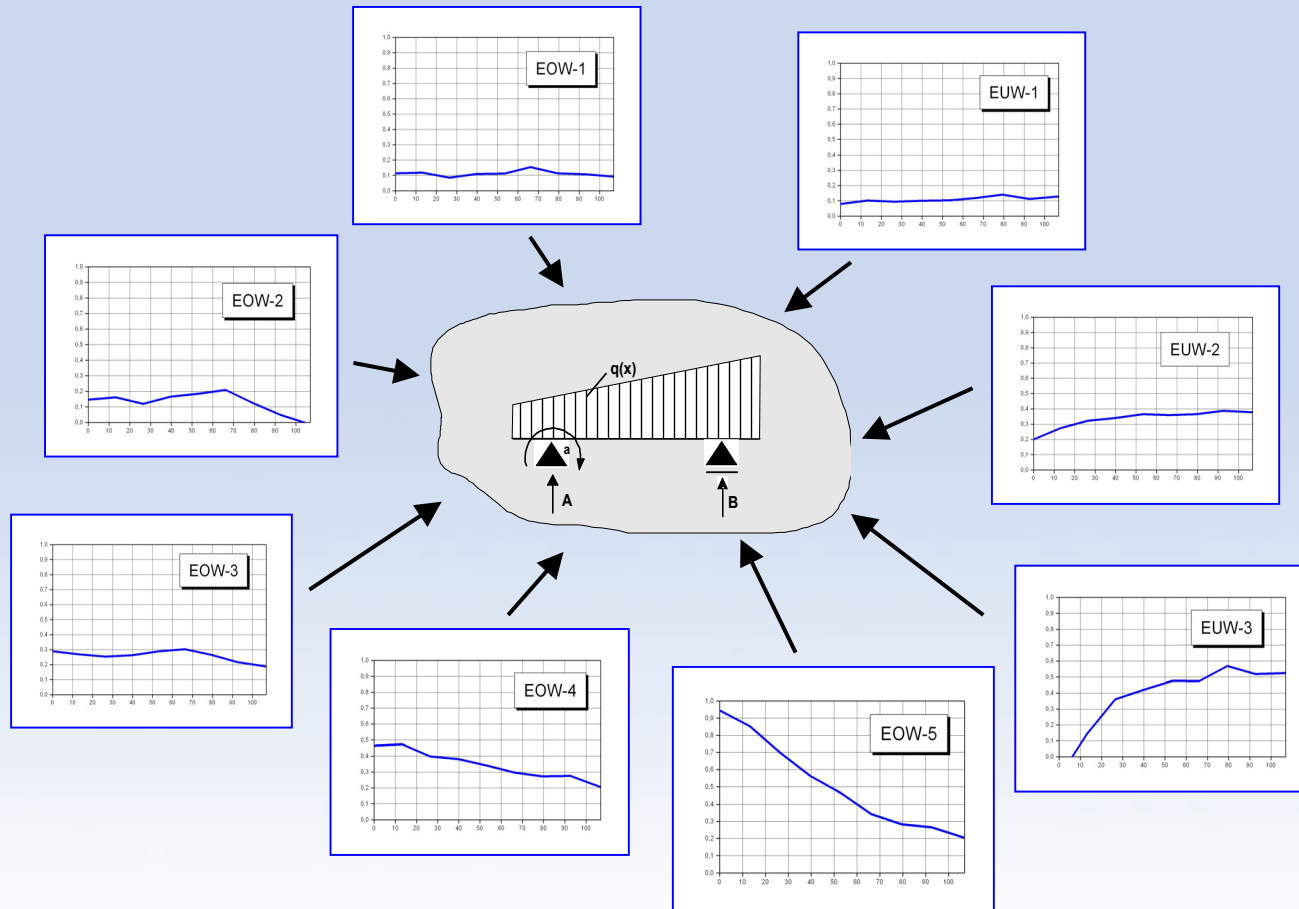
➔ **5,2 km/h bei h=3,35 m**

➔ **4,2 km/h bei h=3,50 m**



# 2 Ermittlung der Troghaltekräfte

## 2.1 Maximale Kräfte in den Antriebsspindeln für die Einfahrversuche



- Verfahrensweise:**
1. Ermittlung der ungünstigsten Belastung für die Wasser-spiegelanhebung aus den einzelnen Einfahrversuchen
  2. Berechnung der maximalen Haltekraft in den Antriebsspindeln aus der Belastung



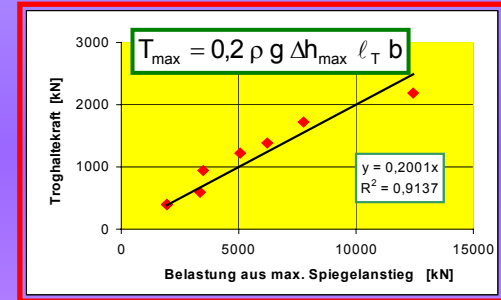


## 2.2 Prognose der zulässigen Anfahrgeschwindigkeit für veränderte Randbedingungen aus den ermittelten Troghaltekräften

1. Normierung der im Naturversuch bestimmten Troghaltekräfte

$$\frac{T_{\max}}{\rho g \Delta h_{\max} l_T b} = \text{konst} \quad (1)$$

2. Ermittlung des Übertragungsmaßstabes aus der Regressionsanalyse der Messdaten



3. Einführung der Gleichung für die max. Spiegelanhebung in (1)

$$T_{\max} = 42476 h \left(\frac{b}{B}\right)^{-0,75} \left(\frac{h}{T}\right)^{-1,46} C_B^{0,45} \left(\frac{v_s}{\sqrt{gh}}\right)^{1,46}$$

4. Ermittlung der Lastannahmen für den ungünstigsten Lastfall

$$T_{\max}(h) = T_{\max}(h + 0,2\text{m}) + \Delta T$$

mit  $\Delta T = \rho g l_T b z_{\text{dyn}} / 4 = 660 \text{ kN}$

5. Bestimmung der zulässigen Anfahrgeschwindigkeit durch Substitution und Umstellung

$$v_{\text{Anf,zul}}(h) = \frac{0,28 \sqrt{g(h + 0,2\text{m})}}{(h + 0,2\text{m})^{0,685} (b/B)^{-0,514} (h + 0,2\text{m})/T C_B^{0,308}}$$

## 2.3 Prognose der zulässige Anfahrgeschwindigkeit im SHW Lüneburg zur Begrenzung der Troghaltekraft auf $T_{\max} = 135 \text{ t}^1$

$v_{\text{zul}}$  in km/h

h [m]	B=11,65 m		B=11,40 m		B=10,50 m		B=9,60 m	
	T=2,5 m	T=2,8 m	T=2,5 m	T=2,8 m	T=2,5 m	T=2,8 m	T=2,5 m	T=2,8 m
3,20	3,65	3,26	3,70	3,30	3,86	3,44	4,04	3,60
3,25	3,70	3,30	3,74	3,34	3,90	3,48	4,09	3,65
3,30	3,74	3,34	3,78	3,38	3,95	3,52	4,13	3,69
3,35	3,78	3,38	3,83	3,42	3,99	3,56	4,18	3,73
3,40	3,83	3,42	3,87	3,46	4,04	3,61	4,23	3,78
3,45	3,87	3,46	3,92	3,50	4,09	3,65	4,28	3,82
3,50	3,92	3,50	3,96	3,54	4,13	3,69	4,32	3,86
3,55	3,96	3,54	4,00	3,57	4,18	3,73	4,37	3,90
3,60	4,00	3,57	4,05	3,61	4,22	3,77	4,42	3,95

<sup>1</sup>Annahmen: dynamische Stauspiegelanhebung von  $z_{\text{dyn}} = +0,2 \text{ m}$ ; Verdrängungsgrad  $C_B = 0,88$

**Zulässige Anfahrgeschwindigkeit für das größte Schiff aus dem Kriterium  $T_{\max}$ :**

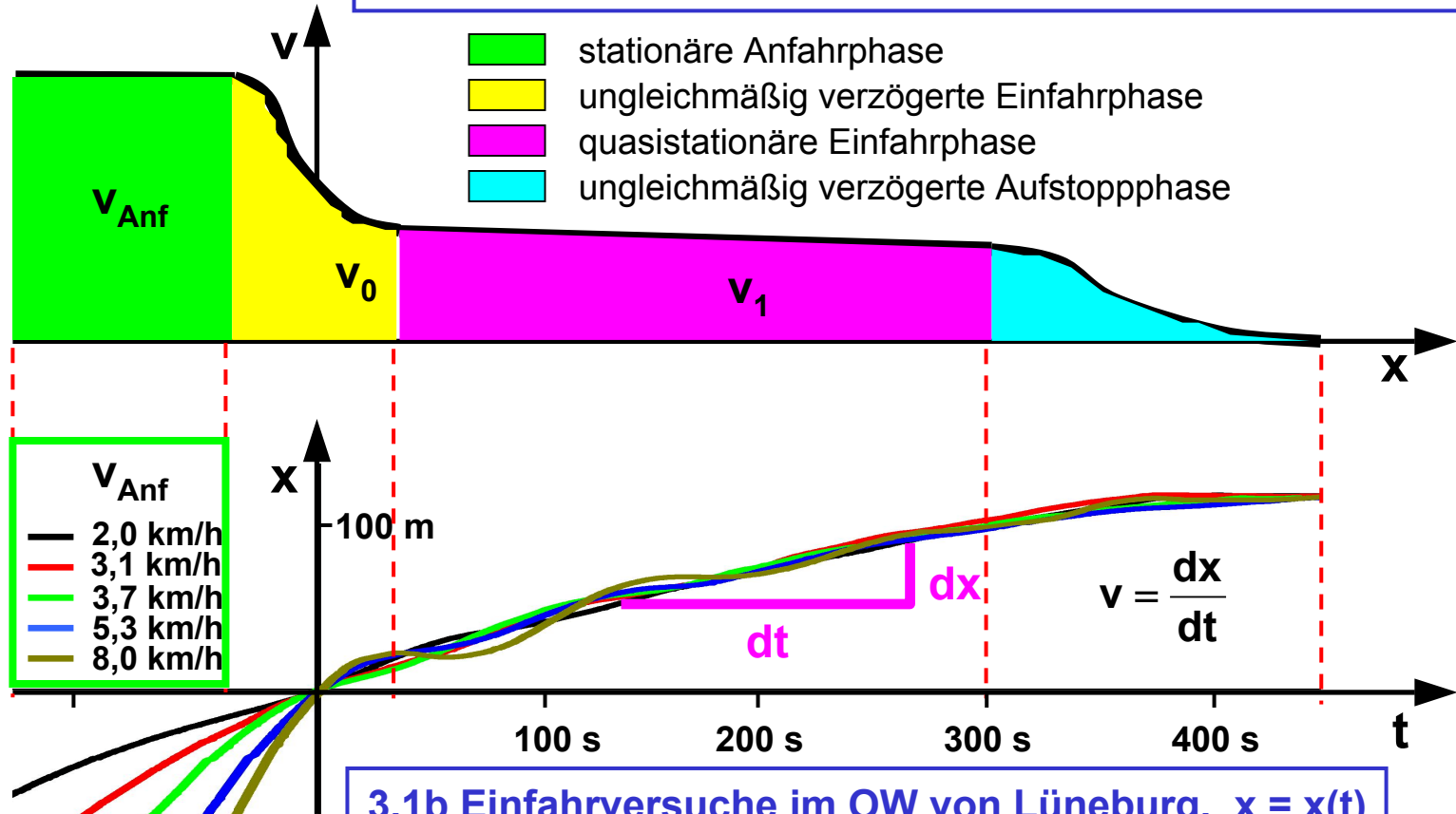
➔ **3,4 km/h bei h=3,35 m**

➔ **3,5 km/h bei h=3,50 m**



# 3 Fahrgeschwindigkeiten und -zeiten bei Einfahrten

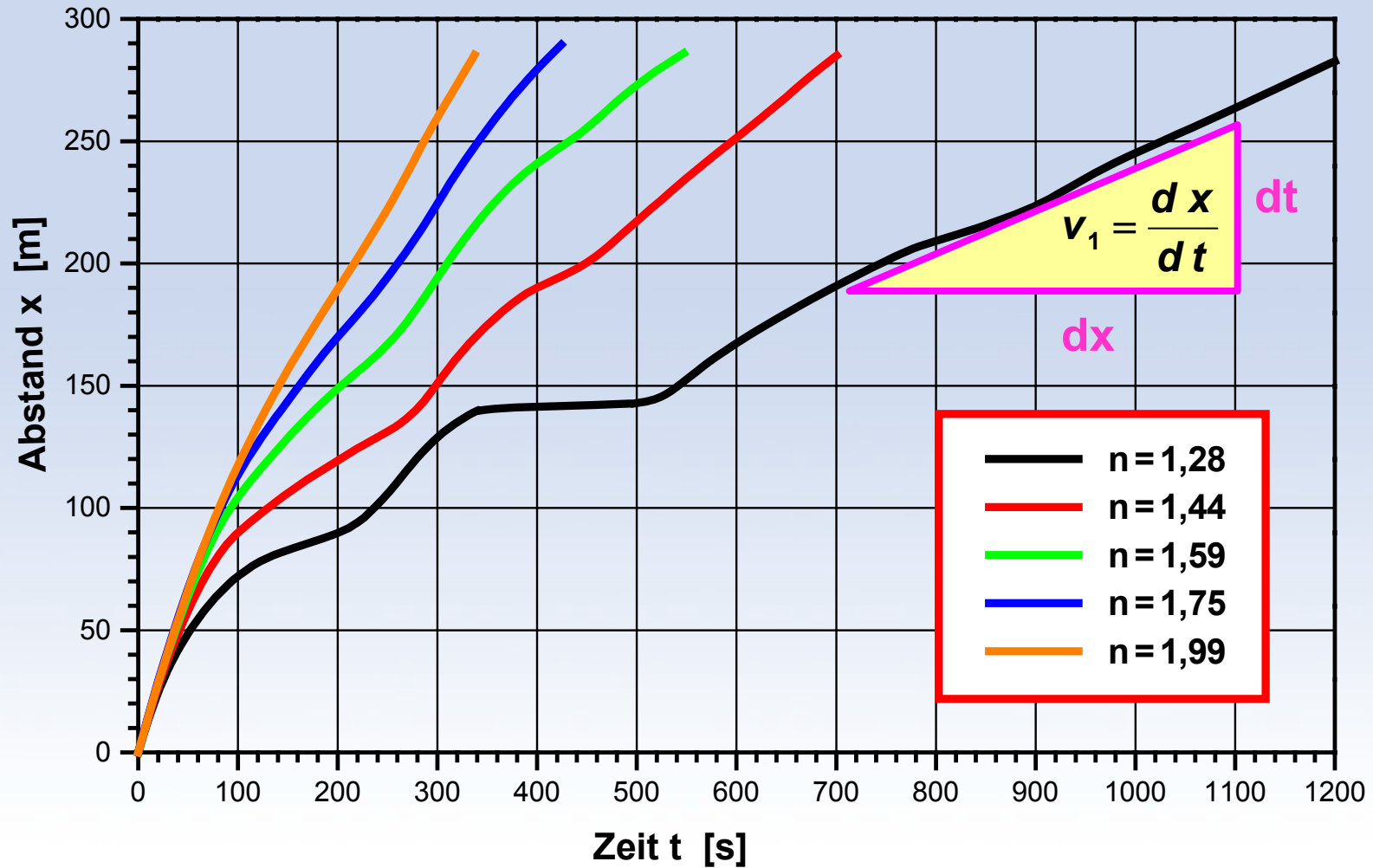
## 3.1a Schematische Darstellung einer Trogeinfahrt, $v = v(x)$



➔ **Fazit:** Im Rahmen üblicher Anfahrsgeschwindigkeiten ist bei sonst gleichen Ausgangsbedingungen die Trogeinfahrzeit im Mittel gleich

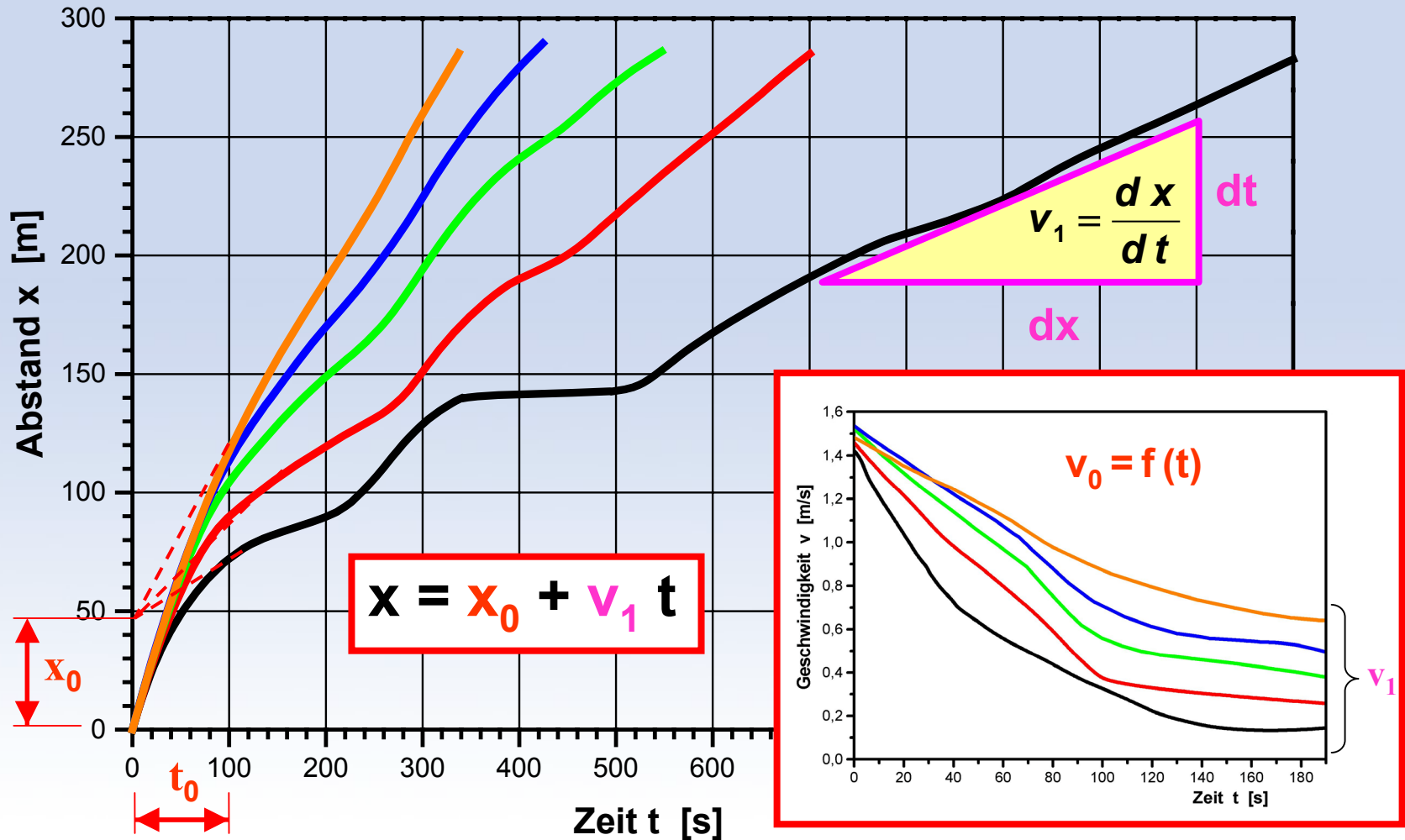
➔ **These:** Es existiert eine Grenzggeschwindigkeit  $v_1$  bei Schleuseneinfahrten, die durch das Querschnittsverhältnis bestimmt wird

### 3.2 Weg-Zeit-Diagramm für die Einfahrt eines Schubverbandes in eine Schleuse bei veränderlichen Querschnittsverhältnissen (konstante Drehzahl, Modellversuche Kooman, 1973)





### 3.2 Weg-Zeit-Diagramm für die Einfahrt eines Schubverbandes in eine Schleuse bei veränderlichen Querschnittsverhältnissen (konstante Drehzahl, Modellversuche Kooman, 1973)



### 3.3 Gleichungen für die Schleuseneinfahrt

#### a) Weg-Zeit-Diagramm für die Schleuseneinfahrt (ohne Aufstoppphase)

$$x = x_0 + v_1 t, \quad \text{für } x > x_0 \text{ und } L_S \geq L_0$$

$x$  = Abstand vom offenen Tor [m]

$x_0$  = Weg der instationären Einfahrtphase in der Kammer [m]

$L_S$  = Fahrzeuglänge [m]

$L_0$  = Mindestfahrzeuglänge (Gültigkeitsgrenze),  $L_0 = 57$  m

$v_1$  = Geschwindigkeit der quasistationären Einfahrtphase

$h$  = Trog- bzw. Kammerwassertiefe [m]

$v_{\text{krit}}$  = kritische Schiffsgeschwindigkeit, 1D-Kanaltheorie [m/s]

$t$  = Zeit ab Passage des offenen Schleusentores [s]

$$x_0 = 0,44 (L_S - L_0)$$

$$\frac{v_1}{\sqrt{gh}} = 0,30 \left( \frac{v_{\text{krit}}}{\sqrt{gh}} \right)^{0,71}$$

#### b) Mittlere Einfahrtzeit in einen Trog bzw. in eine Schleusenammer

$$t_e = \alpha \frac{x_e - x_0}{v_1}$$

$t_e$  = Einfahrzeit [s]

$x_e$  = Einfahrtweg (von der Torpassage bis zum Stillstand) [m]

$\alpha$  = Koeffizient zur Berücksichtigung der Aufstoppphase [-]



### 3.4 Prognose der mittleren Trogeinfahrzeiten im SHW Lüneburg für veränderliche Randbedingungen<sup>1</sup>

$t_e$  in s

h [m]	B=11,65 m		B=11,40 m		B=10,50 m		B=9,60 m	
	T=2,5 m	T=2,8 m	T=2,5 m	T=2,8 m	T=2,5 m	T=2,8 m	T=2,5 m	T=2,8 m
3,20	375	594	352	533	285	386	239	301
3,25	355	544	334	494	273	366	230	288
3,30	337	503	318	460	263	346	223	276
3,35	321	468	304	430	253	329	216	266
3,40	307	437	291	403	244	314	210	256
3,45	294	410	277	382	236	301	204	247
3,50	282	389	268	361	228	288	198	238
3,55	271	367	258	343	221	277	193	230
3,60	261	349	249	327	215	266	188	223

<sup>1</sup> Annahmen: Schiffslänge = 95 m; Abstand vom Tor bis Stillstand = 100 m

**Mittlere Trogeinfahrzeit für das größte Schiff :**

➔ **ca. 8,0 min bei h=3,35 m**

➔ **ca. 6,5 min bei h=3,50 m**



# 4 Stoßschutzberechnung

## 4.1 Prämissen

1. Maßgebend für die Bemessung von Stoßschutzeinrichtungen ist die kinetische Energie des auftreffenden Schiffes.

$$E_{\text{kin}} = \frac{m_S v_{\text{Auftreff}}^2}{2}$$

2. Die Auftreffgeschwindigkeit ist in erster Näherung gleich der aufgefundenen Grenzgeschwindigkeit der Einfahrt  $v_1$

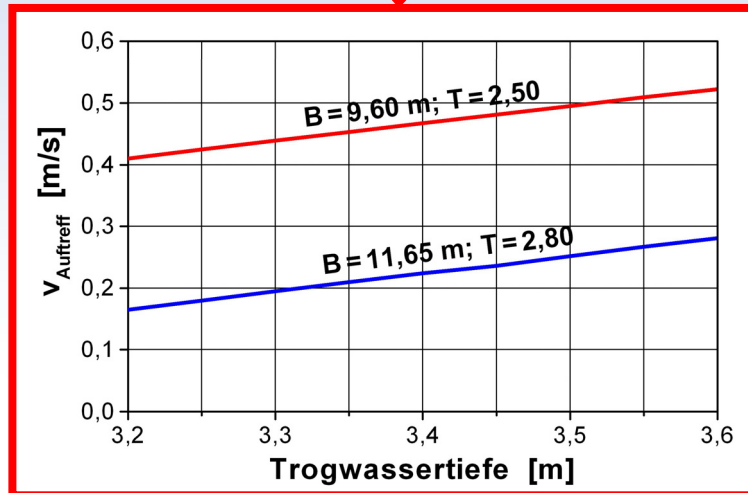
$$v_{\text{Auftreff}} = v_1$$



## 4.2 Auftreffgeschwindigkeit und kinetische Energie eines Schiffes für die Stoßschutzbemessung im SHW Lüneburg bei veränderlichen Randbedingungen

$v_{\text{Auftreff}}$  in m/s

h [m]	B=11,65 m		B=11,40 m		B=10,50 m		B=9,60 m	
	T=2,5 m	T=2,8 m	T=2,5 m	T=2,8 m	T=2,5 m	T=2,8 m	T=2,5 m	T=2,8 m
3,20	0,26	0,17	0,28	0,18	0,34	0,25	0,41	0,33
3,25	0,29	0,18	0,29	0,20	0,36	0,27	0,43	0,34
3,30	0,29	0,20	0,31	0,21	0,37	0,28	0,44	0,35
3,35	0,31	0,21	0,32	0,23	0,39	0,30	0,45	0,37
3,40	0,32	0,22	0,34	0,24	0,40	0,31	0,47	0,38
3,45	0,33	0,24	0,35	0,26	0,42	0,33	0,48	0,40
3,50	0,35	0,25	0,37	0,27	0,43	0,34	0,50	0,41
3,55	0,36	0,27	0,38	0,29	0,44	0,35	0,51	0,44
3,60	0,38	0,28	0,39	0,30	0,46	0,37	0,52	0,44



## 4.2 Auftreffgeschwindigkeit und kinetische Energie eines Schiffes für die Stoßschutzbemessung im SHW Lüneburg bei veränderlichen Randbedingungen

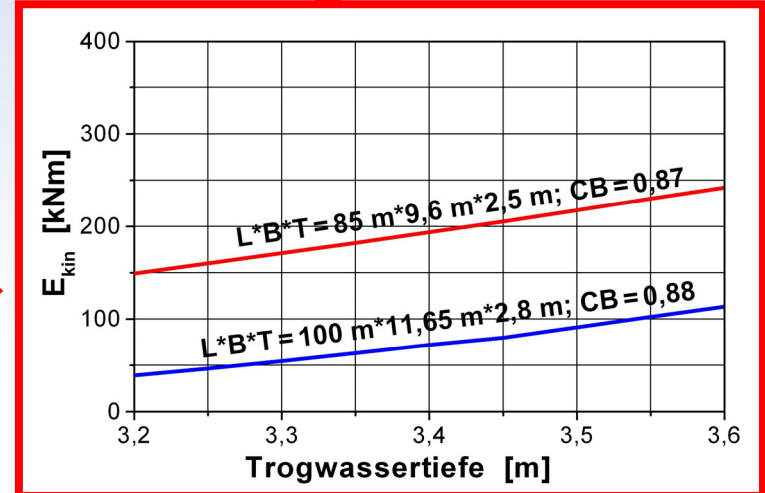
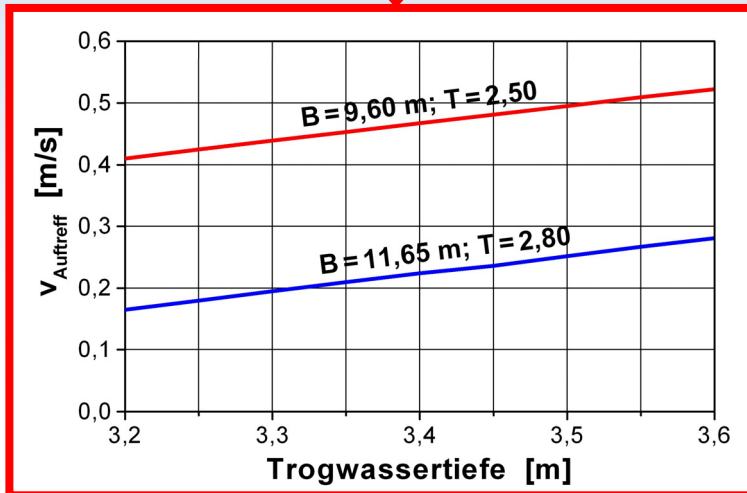
$v_{\text{Auftreff}}$  in m/s

h [m]	B=11,65 m		B=11,40 m		B=10,50 m		B=9,60 m	
	T=2,5 m	T=2,8 m	T=2,5 m	T=2,8 m	T=2,5 m	T=2,8 m	T=2,5 m	T=2,8 m
3,20								
3,25								
3,30								
3,35								
3,40								
3,45								
3,50								
3,55								
3,60								

### Ergebnis:

➔ Maßgebend für die Stoßschutzbemessung ist nicht das Schiff mit dem größten Querschnitt

➔ Die Stoßschutzbemessung erfordert Falluntersuchungen (Schiffsgrößen- und Tiefgangseinfluss)



# 5 Squat: Gefährdung durch Grundberührung

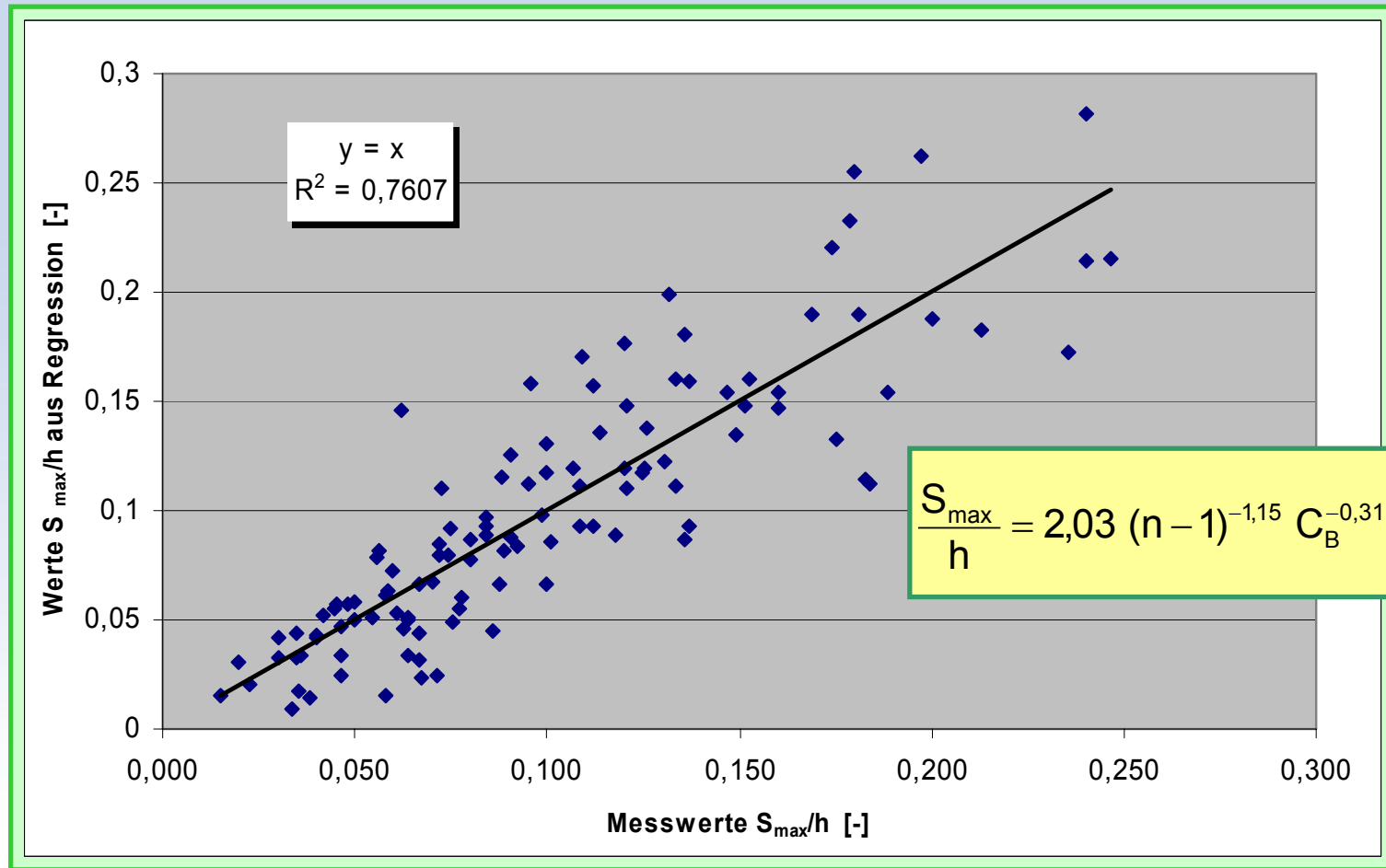
## 5.1 Stand des Wissens

- ▶ Die größere Gefahr vor Grundberührung geht von den Schleusenausfahrten.
- ▶ Zur Abschätzung von Schiffstauchung und Squat im Kanal liegen eine Reihe von Verfahren vor.
- ▶ Existierende Näherungen zur Abschätzung des Squat in engen Fahrwassern unterliegen insgesamt erheblichen Schwankungen.



## 5.2 Neue Squatformel

### Auswertung von Modellversuchen von Blau/Fuehrer zu Schleusenausfahrten





## 5.3 Verifizierung des Berechnungsansatzes durch Naturuntersuchungen und Vergleich mit Berechnungsergebnissen anderer Verfahren

maximaler Squat in m

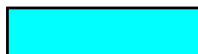
	Naturversuch SHW Lüneburg				Naturversuch Schleuse Marbach		
	AUW-1	AUW-2	AUW-3	AUW-4	N5	N6	N9
<b>Messergebnis</b>	0,19	0,25	0,20	0,28	0,17	0,26	0,18
<b>Neuer Ansatz (BAW)</b>	0,23	0,26	0,21	0,30	0,23	0,32	0,21
Yanenko	0,32	0,34	0,30	0,38	0,30	0,39	0,27
Constantine	0,12	0,15	0,10	> vcr	0,10	> vcr	0,14
Schijf	0,13	0,16	0,11	> vcr	0,11	> vcr	0,15
<b>Bouwmeester</b>	0,24	0,33	0,19	> vcr	0,17	> vcr	> vcr
Barrass II	0,04	0,04	0,03	0,05	0,03	0,06	0,04
Römisch	0,32	0,43	0,23	> vcr	0,16	> vcr	> vcr



Naturuntersuchungen (BAW) Lüneburg/Marbach



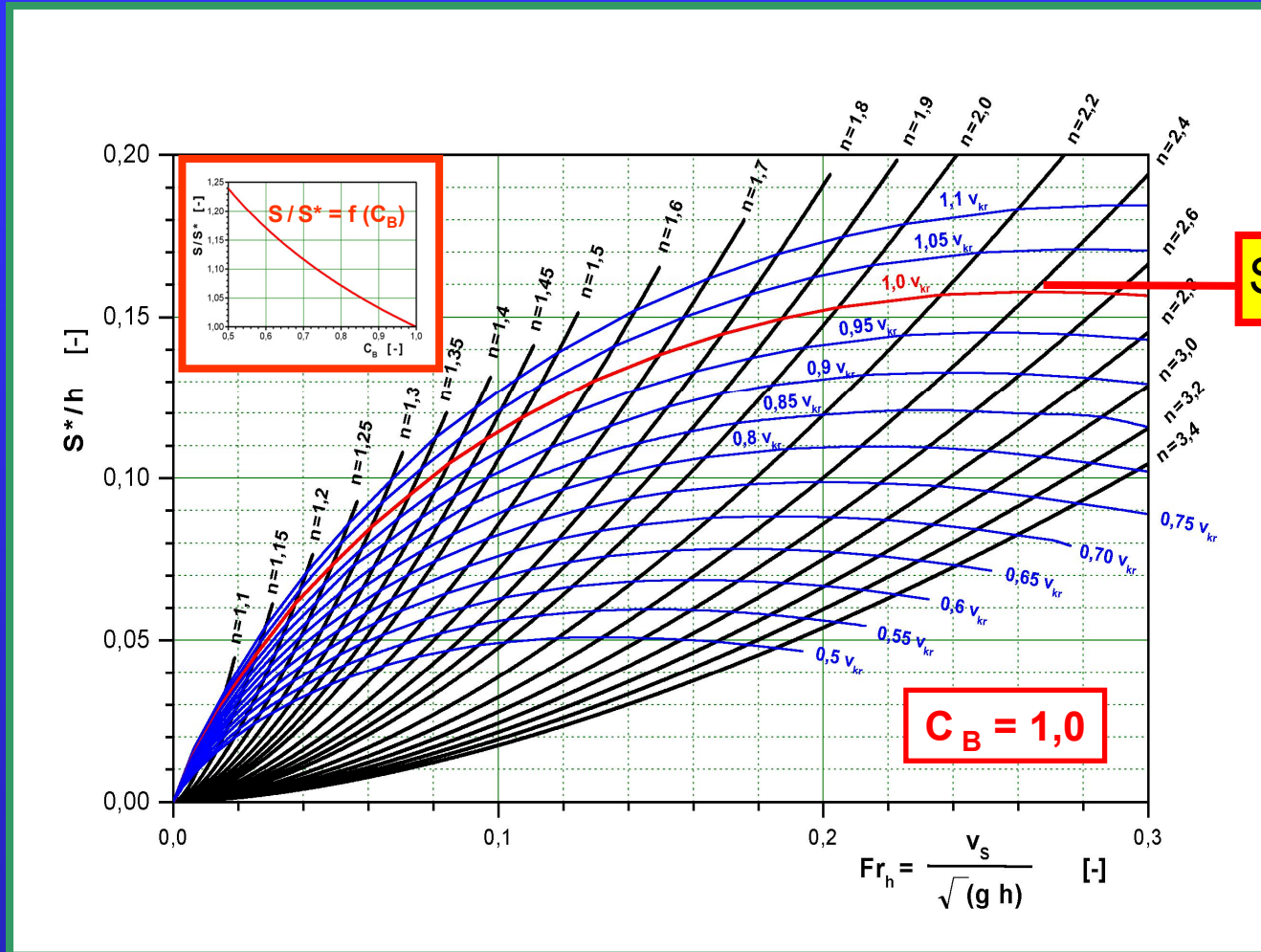
Neue Squatformel (BAW) für Schleusenausfahrten



Spiegelabsenkung nach Bouwmeester

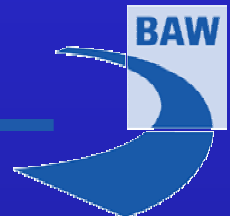


# 5.4 Grafik zur Ermittlung des Squat bei Schleusenausfahrten



$S^*_{max} \approx 0,16 h$

$C_B = 1,0$



## 5.5 Ermittlung des Flottwassers für das SHW-Lüneburg bei veränderlichen Randbedingungen

Vorhandenes Flottwasser in m

h [m]	B=11,65 m		B=11,40 m		B=10,50 m		B=9,60 m	
	T=2,5 m	T=2,8 m	T=2,5 m	T=2,8 m	T=2,5 m	T=2,8 m	T=2,5 m	T=2,8 m
3,20	0,26	0,08	0,24	0,05	0,18	-0,03	0,12	-0,11
3,25	0,29	0,11	0,27	0,08	0,21	0,00	0,15	-0,08
3,30	0,32	0,14	0,31	0,11	0,24	0,03	0,19	-0,04
3,35	0,35	0,17	0,34	0,14	0,27	0,06	0,22	-0,01
3,40	0,39	0,20	0,37	0,17	0,31	0,09	0,26	0,02
3,45	0,42	0,23	0,40	0,20	0,34	0,13	0,29	0,06
3,50	0,45	0,26	0,43	0,23	0,37	0,16	0,33	0,09
3,55	0,48	0,29	0,47	0,25	0,41	0,19	0,36	0,12
3,60	0,51	0,32	0,50	0,29	0,44	0,22	0,40	0,16



vorhandene Flottwassertiefe  $\geq 0,20$  m



vorhandene Flottwassertiefe  $< 0,20$  m



Heck berührt Trogboden



# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit,

zurück zum Programm

zur Kurzfassung

**und Danke an alle Mitwirkenden für die optimale Unterstützung:**

- ➔ dem WSA Uelzen
- ➔ der Schiffsbesatzung der „Loetschental“
- ➔ dem Mitarbeitern des Referates W4
- ➔ dem DST

