

# Die Arche Noah 2017 II

Ein Beitrag zur Technik-Geschichte



M. Feyertag

**Jan Hartmann**

[www. Technikgeschichte.org](http://www.Technikgeschichte.org)

Nürnberg 2017

## Die Arche Noah 2017 II - Berechnungen

Ein Beitrag zur Technik-Geschichte

Jan Hartmann

Das folgende Kapitel 10 ist Teil II, der Berechnungsanhang, der Arbeit „**Die Arche Noah 2017 I** – Ein Beitrag zur Technik-Geschichte“. Es ist nur mit dem Teil I zusammen verständlich, wogegen Teil I auch allein lesbar sein sollte. Die Nummerierung der Tabellen beginnt in jedem Kapitel mit „Tab. 1“, angehängt ist dann die Kapitel-Bezeichnung. Die Bezeichnung Kap.10.x verweist in jedem Fall auf den hier vorliegenden Teil II der Gesamtarbeit, alle anderen Kapitel-Bezeichnungen auf Teil I

Kapitel	Inhaltsverzeichnis Teil II	Seite
10.1	Werkstoffeigenschaften	2
10.2	Lastannahmen	3
10.3	Berechnung von Strukturabmessungen	4
10.4	Massenberechnung der Holzkonstruktion	8
10.5	Statische Werte des Hauptspantes	9
10.6	Längsfestigkeit	10
10.7	Querfestigkeit	12
10.8	Torsion	12
10.9	Stabilität und Seeverhalten	13
	<u>Abbildungen</u>	14

**Bei allen Berechnungen handelt es sich um Überschläge. Da wir keine Genauigkeit vortäuschen wollen, die nicht vorliegt, gehen wir von folgenden Umrechnungen aus :**

**Massen : 1 ton  $\triangleq$  1 t = 1 000 kg    Kräfte : 1 kg  $\times$  g  $\triangleq$  1  $\times$  g  $\triangleq$  10 N    1 t  $\times$  g  $\triangleq$  10 kN**

**Wasser : 1 m<sup>3</sup>  $\triangleq$  1 000 kg  $\triangleq$  10 kN**

### 10.1 Werkstoffeigenschaften

Den Allgemeinbegriff „zulässige Spannung“ verwendet man zur Entstehungszeit dieser Arbeit so nicht mehr. Man geht vielmehr von genauer definierten Belastungszuständen aus, in denen u.a. auch der Zustand des Materials, dynamische Belastungen, Umwelteinflüsse u. dgl. eingehen. Für reine Überschlagsrechnungen und nur sehr ungenau vorliegende Werkstoff-Angaben, wie sie hier ausschließlich vorkommen, können wir auf ältere, besser zu handhabende Angaben zurückgreifen. Wir benutzen die folgende Tabelle 1 / 10.1, die wir aus Neuhaus (1994) (siehe das Schriftums-Verzeichnis in Teil I, Kap. 9) zusammengestellt haben :

**Tab. 1 / 10.1    Zulässige Spannungen (Holz)**

1	2	3	4		5	
2	Spannungsart	Bezeichng.	Vollholz (Nadelhölzer) Gütek. S 10 nach DIN 4074		Vollholz (Laubhölzer) Gütek. S 10 nach DIN 4074	
3	--	--	N / mm <sup>2</sup>	kN / cm <sup>2</sup>	N / mm <sup>2</sup>	kN / cm <sup>2</sup>
4	Biegung	zul $\sigma_B$	10	1,0 ***)	11	1,1
5	Zug *)	zul $\sigma_Z$	8,5	0,85	10	1,0 ***)
6	Zug **)	zul $\sigma_Z$	0,05	0,005	0,05	0,005
7	Druck *)	zul $\sigma_D$	8,5	0,85	10	1,0 ***)
8	Druck **)	zul $\sigma_D$	2	0,2	3	0,3
9	Abscheren	zul $\tau_A$	0,9	0,09	1	0,1
10	Schub/Querk.	zul $\tau_Q$	0,9	0,09	1	0,1

\*) parallel zur Faser    \*\*) senkr. zur Faser    \*\*\*) Annahmen für diese Arbeit

Da wir das wirklich verwendete Holz nicht kennen, haben wir als spezifische Masse die von schweren Eichensorten angenommen, nämlich  $900 \text{ kg/m}^3$ . Das scheint zwar sehr hoch zu sein, jedoch ist frisch geschlagenes Holz – mit dem wir wohl rechnen müssen – auch bedeutend schwerer als abgelagertes.

## 10.2 Lastannahmen

### Bodenverbände

- Die vertikalen Gewichtskräfte aus der Eigenmasse der Rumpfstruktur und aus der Ladung werden vorwiegend durch die Deckstützen in den Boden geleitet und dort durch Längsträger und Bodenwrangen in die Fläche der Bodenbeplankung verteilt. Eine unmittelbare Kraftübertragung zwischen den genannten Gewichtskräften und dem Wasserdruck von unten (dem Auftrieb) findet nicht statt.
- Der letztere setzt sich aus den Anteilen aus dem Tiefgang und aus der Wellenhöhe zusammen. Als Tiefgang  $T$  wird einstweilen (d.h. solange nicht eine wesentlich abweichende Berechnung des Leergewichtes vorliegt) der Wert genommen, der sich nach der Angabe von Woodmorappe (1996),  $D = 11\,000 \text{ ts} \approx 11\,000 \text{ m}^3 \approx 110\,000 \text{ kN}$  ergibt:  $T = D / (L \times B) = 2,93 \approx \mathbf{3,00 \text{ m}}$ . Die Seegangbelastung entsteht aus der Wellenhöhe. Nach unseren Überlegungen, die sich mit Woodmorappe (1996), decken, und in Kap.6.1 näher erläutert sind, nehmen wir vorläufig eine verhältnismäßig geringe Wellenhöhe von  $h_{\text{welle}} = L / 30 = \mathbf{5,0 \text{ m}}$  an.
- Die **Bodenbeplankung**, die **Längsträger** und die **Bodenwrangen** sind damit für den vollen Wasserdruck aus (Tiefgang = 3 m) + (halber Wellenhöhe = 2,5 m) = **5,5 m** Wassersäule, auszulegen:
 
$$\mathbf{p = 5,5 \text{ m Wassersäule, } \triangleq 55 \text{ kN / m}^2}$$

### Decks

- Die beiden Zwischendecks und ein leichter Flurboden über den Längsträgern im Boden sind Ladungsdecks. Was dort etwa an Ställen und Ver- und Entsorgungs-Vorrichtungen eingebaut wird ist nicht zu übersehen. Andererseits ist die Ladung (Tiere aller Arten in jeweils nur wenigen Individuen) sehr leicht. Für sehr große Tiere sind Verstärkungen vorzusehen, die aber für den Gesamtentwurf nicht ins Gewicht fallen. Bei Woodmorappe (1996) werden für Bio-Masse am Ende und für Trocken-Vorräte und Wasser am Anfang der Reise zusammen  $\approx 7\,000 \text{ t}$  angegeben. Verteilt man diese Masse auf die Grundfläche der zwei Zwischendecks und der halben Stauung (diese haben wir wegen der schlechteren Ausnutzbarkeit nur halb gerechnet) so entfallen je  $\text{m}^2$ :  $p = 7000 / (2,5 \times L \times B) = 7000 / 2,5 \times 3750 = 0,75 \text{ t / m}^2 = 0,75 \text{ m Wassersäule, d.h. } 7,5 \text{ kN / m}^2$ . Hinzukommt das Eigengewicht des Decks und ein Beschleunigungszuschlag, so daß wir rechnen werden:

$$\mathbf{p = 1,1 \text{ m Wassersäule, } \triangleq 11 \text{ kN / m}^2}$$

- Für das Hauptdeck einschließlich des Lüftungsaufbaues rechnen wir

$$\mathbf{p = 1,4 \text{ m Wassersäule, } \triangleq 14 \text{ kN / m}^2}$$

### Seitliche Außenhaut, Spiegel und Spanten

- Die Seitenbeplankung wird durch Querspanten unterstützt. Diese lagern ihrerseits in horizontaler Richtung auf der Bodenkonstruktion und den drei Decks. Eine Unterstützung durch Kräfte aus der Ladungsmasse findet, wie bei der Bodenbeplankung, nicht statt. Es wirkt allein der Wasserdruck. Im unteren Teil, von unten bis zum unteren Zwischendeck, nehmen wir deshalb als Belastung an:
 
$$\mathbf{p = 5,5 \text{ m Wassersäule, } \triangleq 55 \text{ kN / m}^2}$$
- Zwischen den beiden Zwischendecks sei:
 
$$\mathbf{p = 3,5 \text{ m Wassersäule, } \triangleq 35 \text{ kN / m}^2}$$
- Darüber:
 
$$\mathbf{p = 1,5 \text{ m Wassersäule, } \triangleq 15 \text{ kN / m}^2}$$

### 10.3 Berechnung von Struktur-Abmessungen

Die Berechnungen werden in den folgenden Tabellen durchgeführt. Fehlende Tabellen-Nr. gehören zu Tabellen, die im Laufe des Entwurfsvorganges ausgeschieden wurden ( insbesondere im Zusammenhang mit der Längsfestigkeitsrechnung).

#### Berechnung und Einzelheiten der Boden-Struktur

##### **Tab. 2 Boden-Längsträger**

##### **Tab. 2a Bodenlängsträger mit mittragender Breite**

##### **Tab. 3 Bodenwrangen**

##### **Tab. 4 Boden-Planken**

##### **Tab. 5 Hauptdeck-Planken** ohne Längsfestigkeit

#### Berechnung und Einzelheiten der Decks-Strukturen

##### **Tab. 6 Unterzüge Hauptdeck**

##### **Tab. 7 Quer-Decksbalken Hauptdeck**

##### **Tab. 9 Decksplanken Zwischendecks**

##### **Tab. 10 Unterzüge Zwischendecks**

##### **Tab. 11 Quer-Decksbalken Zwischendecks**

##### **Tab. 13 Quadratische Hohlstützen**

#### Berechnung und Einzelheiten der seitlichen Außenhaut und der Spiegel

##### **Tab. 14 Außenhaut-Planken**

##### **Tab. 15 Spanten der seitl. Außenhaut**

##### **Tab. 16 Spiegel-Spanten**

##### **Tab. 17 Schotten**

**Tabelle 2 / 10.3 Boden-Längsträger** Rechteck-Querschnitt Decksstütze auf halber Länge zw. zwei Querschotten verkürzt Lastfeld auf  $x = 3,0$  m.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	$x ; y$ <sup>1)</sup>	p	Q	$q = Q / x$	$M_{\max}$	h	d	$I_{\text{ist}}$	$W_{\text{ist}}$	$\sigma_{\text{ist}}$	$\sigma_{\text{ist}}$
2	m	kN / m <sup>2</sup>	kN	kN / m	kNm	m	m	m <sup>4</sup>	m <sup>3</sup>	kN / m <sup>2</sup>	N / cm <sup>2</sup>
3	6,0 ; 2,75	25,0	413	69	311	1,0	0,2	0,017	0,033	9 420	942
4	3,0; 2,75	25,0	206	69	78	0,8	0,15	0,0064	0,016	4 880	488
5					78	0,6	0,15	0,0027	0,009	8 670	867
6	3,0; 2,75	25,0	206	69	52	0,6	0,15	0,0027	0,009	5 780	578
7					52			0,0111	0,033	1 580	158

<sup>1)</sup> Lastfeld

Ohne Längsfestigkeit !

Da auf dem halben Abstand zwischen zwei Querschotten auf jedem Boden-Längsträger eine Deckstütze steht und auf diesen wie ein Querschott wirkt, nehmen wir in diesem Fall die Lastlänge mit 3,0 m und beidseitiger Einspannung an, siehe Zeile 6 . Eingehendere Berechnung der Träger nach Tab.2a / 10.3 führt zu Zeile 7 .

In Tab. 2a /10.3 berechnen wir diese Träger ausführlicher, indem wir sie bis UK Boden bzw. OK Deck rechnen und dort die unmittelbar anschließenden Bodenplanken (beidseit. je 10 cm) einbeziehen. Sieh Abb. 7 und 8 . Dies gilt sinngemäß auch für Tab. 6 / 10.3 . Die Ergebnisse :

**Tabelle 2a / 10.3 Bodenlängsträger** Mittr.Br. von Deck od. Boden auf jeder Seite 10 cm

1	2	3	4	5	6
2	Text	e*	$I_{NF}$	$W_o$	$W_u$
3	----	m	$m^4$ $cm^4$	$m^3$ $cm^3$	$m^3$ $cm^3$
4	Bodenlängsträger	0,341	0,0111   1 114 000	0,022   21 890	0,033   32 670
5	Unterzug Hauptdeck	0,341	0,0111   1 111 000	0,033   32 670	0,022   21 890

**Tab. 3 / 10.3 Bodenwrangen** Rechteck-Querschnitt ( h = Stegh. ; d = Steg.d.)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	x ; y	p	Q	$q = Q / x$	$M_{max}$	h	d	$I_{ist}$	$W_{ist}$	$\sigma_{ist}$	$\sigma_{ist}$
2	m	$kN / m^2$	kN	$kN / m$	kNm	m	m	$m^4$	$m^3$	$kN / m^2$	$N / cm^2$
3	3,0 ; 1,0	55,0 <sup>2)</sup>	165	55	62	0,8	0,07	0,00299	0,0075	8 267	827
4	2,75 ; 1,0				52	0,6	0,1	0,0018	0,0060	8 670	867

Zeile 3 : Mittelschachtbereich, in der Höhe gestückt, ohne Lasche gerechnet

Zeile 4 : Normalbereich, in der Höhe gestückt, ohne Lasche gerechnet

**Tabelle 4 / 10.3 Boden-Planken** Rechteck-Querschnitt ( h = Dicke; d = Breite)

Ohne Längsfestigkeit

0	1 Lastf.	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	x ; y	p	Q	$q = Q / x$	$M_{max}$	h	d	$I_{ist}$	$W_{ist}$	$\sigma_{ist}$	$\sigma_{ist}$
2	m	$kN / m^2$	kN	$kN / m$	kNm	m	m	$m^4$	$m^3$	$kN / m^2$	$N / cm^2$
3	1,0 ; 0,4	55,0	22	22	2,75	0,25	0,4	0,00052	0,0042	655	66

**Tabelle 5 / 10.3 Hauptdeck-Planken** Rechteck-Querschnitt ( h = Dicke; d = Breite)

Ohne Längsfestigkeit

0	1 Lastf.	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	x ; y	p	Q	$q = Q / x$	$M_{max}$	h	d	$I_{ist}$	$W_{ist}$	$\sigma_{ist}$	$\sigma_{ist}$
2	m	$kN / m^2$	kN	$kN / m$	kNm	m	m	$m^4$	$m^3$	$kN / m^2$	$N / cm^2$
3	1,0 ; 0,4	14,0	6	14	1,75	0,25	0,4	0,00052	0,0042	416	42

**Tabelle 6 / 10.3 Unterzüge Hauptdeck** Rechteck-Querschnitt ( h = Stegh. ; d = Steg.d.) ohne Längsfestigkeit !

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	x ; y <sup>1)</sup>	p	Q <sup>3)</sup>	$q = Q / x$	$M_{max}$	h	d	$I_{ist}$	$W_{ist}$	$\sigma_{ist}$	$\sigma_{ist}$
2	m	$kN / m^2$	kN	$kN / m$	kNm	m	m	$m^4$	$m^3$	$kN / m^2$	$N / cm^2$
3		14	116	39	44	0,85	*)	0,0112	0,033	1 330	133

Da auf dem halben Abstand zwischen zwei Querschotten unter jedem Unterzug eine Decksstütze steht und auf diesen wie ein Querschott wirkt, nehmen wir in diesem Fall die Lastlänge mit 3,0 m und beidseitiger Einspannung an, siehe Zeile 3 . Vgl. auch Tab. 2a / 10.3

Außerdem berechnen wir die statischen Werte dieser Träger ausführlicher, indem wir den Träger bis Oberkante Deck rechnen und dort die unmittelbar anschließenden Decksplanken einbeziehen. Dies ist hier nicht näher festgehalten, siehe Zeile 3. \*) Sp.7 : 0,15 ; 025

**Tabelle 7 / 10.3 Quer-Decksbalken Hauptdeck** Rechteck-Querschnitt h = Stegh. ; d = Steg.d.)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	x ; y <sup>1)</sup>	p	Q	$q = Q / x$	$M_{max}$	h	d	$I_{ist}$	$W_{ist}$	$\sigma_{ist}$	$\sigma_{ist}$
2	m	$kN / m^2$	kN	$kN / m$	kNm	m	m	$m^4$	$m^3$	$kN / m^2$	$N / cm^2$
3	2,75 ; 1,0	14	39	14	9	0,6	0,06	0,0011	0,0036	2 500	250
4						0,4	0,06	0,00032	0,0016	6 630	663

<sup>1)</sup> Lastfeld

Ausführen : Zeile 4

**Tabelle 9 / 10.3 Decksplanken Zwischendecks** Rechteck-Querschnitt (h = Dicke ; d = Breite)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	x ; y <sup>1)</sup>	p	Q <sup>3)</sup>	q = Q / x	M <sub>max</sub>	h	d	I <sub>ist</sub>	W <sub>ist</sub>	σ <sub>ist</sub>	σ <sub>ist</sub>
2	m	kN / m <sup>2</sup>	kN	kN / m	kNm	m	m	m <sup>4</sup>	m <sup>3</sup>	kN / m <sup>2</sup>	N / cm <sup>2</sup>
3	1,0 ; 0,4	11,0	15,4	15,4	2,0	0,06	0,4	0,0000072	0,00024	8 330	833

h = 0,06 m ist Mindestdicke, wird so ausgeführt !

**Tabelle 10 / 10.3 Unterzüge Zwischendecks** Rechteck-Querschnitt (h = Stegh. ; d = Steg.d.)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	x ; y <sup>1)</sup>	p	Q <sup>3)</sup>	q = Q / x	M <sub>max</sub>	h	d	I <sub>ist</sub>	W <sub>ist</sub>	σ <sub>ist</sub>	σ <sub>ist</sub>
2	m	kN / m <sup>2</sup>	kN	kN / m	kNm	m	m	m <sup>4</sup>	m <sup>3</sup>	kN / m <sup>2</sup>	N / cm <sup>2</sup>
3	3,0 ; 2,75	11,0	91	30	33,8	0,60	0,07	0,0013	0,0042	8 05	805

**Tabelle 11 / 10.3 Quer-Decksbalken Zwischendecks** Rechteck-Querschnitt h = Stegh. ; d = Steg.d. Wird mit d = 0,06 m (Mindestdicke) ausgeführt !

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	x ; y <sup>1)</sup>	p	Q	q = Q / x	M <sub>max</sub>	h	d	I <sub>ist</sub>	W <sub>ist</sub>	σ <sub>ist</sub>	σ <sub>ist</sub>
2	m	kN / m <sup>2</sup>	kN	kN / m	kNm	m	m	m <sup>4</sup>	m <sup>3</sup>	kN / m <sup>2</sup>	N / cm <sup>2</sup>
3	2,75 ; 1,0	11,0	30	11	1,73	0,25	0,05	0,00007	0,00052	3 330	331

**Tabelle 13 / 10.3 Quadratische Hohlstützen**

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Decks	l	p	x	y	F <sub>Deck</sub>	F <sub>Zusatz</sub>	F <sub>Stütze</sub>	H	h	A <sub>Stütze</sub>	σ <sub>ist</sub>	I <sub>Stütze</sub>	σ <sub>K</sub>	σ <sub>K</sub> / σ <sub>ist</sub>	σ <sub>zul</sub> / σ <sub>ist</sub>
-	-	m	kN/m <sup>2</sup>	m	m	kN	kN	kN	cm	cm	cm <sup>2</sup>	N/cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	N/cm <sup>2</sup>	1	1
1	H;oZ	4,5	14	3,0	2,75	116	0	116	28	21	343	338	35 000	5 040	14,9	2,96
2	oZ;uZ	4,5	11	3,0	2,75	91	116	207	35	28	441	469	73 800	8 260	17,6	2,13
3	uZ;Sta	3,5	11	3,0	2,75	91	207	414	40	33	511	810	115 000	11 000	13,6	1,23
4	H;oZ	4,5	14	3,0	1,4	60	0	60	20	13	231	260	11 000	2 090	8,0	3,8
5	oZ;uZ	4,5	11	3,0	1,4	46	60	104	28	21	wie :	Z. 1				
6	uZ;Sta	3,5	11	3,0	1,4	46	104	208	35	28	wie :	Z. 2				

H = Quadratseite außen h = Quadratseite innen

$$I_{\text{Stütze}} = (H^4 - h^4) / 12 = (28^4 - 21^4) / 12 = 35\,000 \text{ cm}^4$$

$$i = \sqrt{I / A} = \sqrt{(35\,000 / 343)} = 10,1 \text{ cm}$$

$$\lambda = l / i = 450 / 10,1 = 45$$

$$\sigma_K = (E \times I_{\text{Stütze}} \times \pi^2) / (l^2 \times A_{\text{Stütze}}) = (1000000 \times 35\,000 \times 10) / (450^2 \times 343) = 5\,040 \text{ N / cm}^2$$

Zeile 4 bzw. 5 bzw. 6 wie

Zeile 1 bzw. 2 bzw. 3 mit kleinerem Lastfeld (neben Mittelschacht)

**Tabelle 14 / 10.3 Außenhaut-Planken** Rechteck-Querschnitt (h = Dicke ; d = Breite)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	x ; y	p	Q	q = Q / x	M <sub>max</sub>	h	d	I <sub>ist</sub>	W <sub>ist</sub>	σ <sub>ist</sub>	σ <sub>ist</sub>
2	m	kN / m <sup>2</sup>	kN	kN / m	kNm	m	m	m <sup>4</sup>	m <sup>3</sup>	kN / m <sup>2</sup>	N / cm <sup>2</sup>
3	1,0; 0,4	55	22	22	2,75	0,07	0,4	0,000011	0,00033	8 330	833
4	1,0;0,4	35	14	14	1,75	0,06	0,4	0,0000072	0,00024	7 290	729
5	1,0;0,4	15	6	6	0,75	0,06	0,4	0,0000072	0,00024	3 130	313

$d_{\min} = 0,06 \text{ m}$  Gilt auch für Spiegel-Bepunktung mit Lastlänge  $x = 0,9$

Z. 3 : Boden ↔ unt. Zw.deck Z. 4 : unt. Zw.deck ↔ ob. Zw.deck Z. 5 ob. Zw.deck ↔ Hauptdeck

**Tabelle 15 / 10.3 Spanten der seittl. Außenhaut** Rechteck-Querschnitt (x = Lastlänge; y = Lastbreite; h = Steghöhe, d = Stegdicke)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	x ; y	p <sup>2)</sup>	Q	q = Q / x	M <sub>max</sub>	h	d	I <sub>ist</sub>	W <sub>ist</sub>	σ <sub>ist</sub>	σ <sub>ist</sub>
2	m	kN / m <sup>2</sup>	kN	kN / m	kNm	m	m	m <sup>4</sup>	m <sup>3</sup>	kN / m <sup>2</sup>	N / cm <sup>2</sup>
3	4,0; 1,0	55	220	55	110	0,8	0,1	0,0043	0,011	9 910	991
4	5,0; 1,0	35	175	35	109	0,8	0,1	0,0043	,011	9 910	991
5	5,0; 1,0	15	75	15	47	0,55	0,1	0,0014	0,005	9 400	940

<sup>2)</sup> Z. 3 : Boden ↔ unt. Zw.deck Z. 4 : unt. Zw.deck ↔ ob. Zw.deck Z. 5 ob. Zw.deck ↔ Hauptdeck

Gilt auch für Spiegel-Spanten mit  $y = 0,9$

**Tabelle 16 / 10.3 Spiegel-Spanten** Rechteck-Querschnitt (x = Lastlänge; y = Lastbreite; h = Steghöhe, d = Stegdicke)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	x ; y <sup>1)</sup>	p <sup>2)</sup>	Q	q = Q / x	M <sub>max</sub>	h	d	I <sub>ist</sub>	W <sub>ist</sub>	σ <sub>ist</sub>	σ <sub>ist</sub>
2	m	kN / m <sup>2</sup>	kN	kN / m	kNm	m	m	m <sup>4</sup>	m <sup>3</sup>	kN / m <sup>2</sup>	N / cm <sup>2</sup>
3	4,0; 0,9	55	198	50	100	0,8	0,1	0,0043	0,011	9 090	909
4	5,0;0,9	35	158	32	64	0,7	0,08	0,0023	0,0065	9 850	985
5	4,5;0,9	15	49	11	28	0,5	0,07	0,00073	0,0029	9 660	966

<sup>2)</sup> Z. 3 und 31 : Boden ↔ unt. Zw.deck Z. 4 : unt. Zw.deck ↔ ob. Zw.deck Z. 5 und Z. 6 : ob. Zw.deck ↔ Hauptdeck

**Tabelle 17 / 10.3 Schotten**

1	2	3	4	5
2	Text u. Abmessungen 1 Schott (einseitig)	Masse	Z <sub>UK Boden</sub>	Sp. (4) × (5)
3	m	t	m	tm
4	Zeilen 4 – 7 Querschott, beidseitig			
5	Planken (10,0×3,5× 0,06×1,2× 0,9)× 2	4,5	2,7	12
6	Rahmen (10,0×0,3× 0,1× 2×0,9)× 2	1,2	2,7	3
7	Durchgangsrahmen (7,0× 0,6× 0,1× 0,9)× 2	0,8	2,7	2
8	Σ Z. 5 – 7	6,5	2,7	17
9	Zeilen 9 –12 unt. Flügelschott			
10	Planken (7,3× 4,1× 0,06× 1,2× 0,9)× 2	3,9	7,3	28
11	Rahmen (7,3× 0,3× 0,1× 2× 0,9)× 2	0,8	7,3	6
12	Σ Z. 10 – 12	4,7	7,3	34
13	Σ Z. 8 + 11	<b>11,2</b>	<b>4,6</b>	<b>51</b>
14	Zeilen 13 – 17 ob. Flügelschott			
15	Planken (4,9× 4,1× 0,06× 1,2× 0,9)× 2	2,6	12,1	31
16	Rahmen (5,0× 0,3× 0,1× 2× 0,9)× 2	0,5	12,1	7
17	Zeilen 13 – 17	<b>3,1</b>	<b>12,1</b>	<b>38</b>

18				
19	24 Querschotte u. 24 unt. Flügelsch. :	269	4,6	1 240
20	24 ob.Flügelsch, (17 quer + 8 längs)	74	12,1	900
21	Schotte	<b>343</b>	<b>6,2</b>	<b>2 140</b>

#### 10.4 Massenberechnung der Holzkonstruktion

In der Rumpfstuktur wiederholen sich ausnahmslos Abschnitte von 6 m Länge, die zur halben Breite symmetrisch sind. Den in Abb. 3 gezeichneten „Hauptspant“-Querschnitt bezeichnen wir in diesem Kapitel als „Regelquerschnitt“. Masse und Schwerpunktslage (der Höhe nach) dieser Abschnitte werden in der folgenden Tabelle 1 / 10.4 berechnet. Dabei sind alle Einzellasten auf die Gesamtlänge  $L = 150$  m gleichmäßig verteilt worden. Dies ist bei der Längsfestigkeitsrechnung nicht zugänglich, dort werden die Massen der beiden Spiegel und des Frischwassers an Ort und Stelle eingesetzt. Die in Spalte 3 bei den einzelnen Positionen in *kursiv* eingetragenen Pauschalzuschläge für Kleinteile (z.B. Eckhölzer und Eisennägel) wurden für Stichproben ermittelt.

**Tabelle 1 / 10.4 Masse des Rumpfes**

1	2	3	4	5	6
2	Pos. <sup>1)</sup>	Text <i>Kursiv: Pauschaler Zuschlag für Kleinteile</i>	Masse m	Z <sub>UKBoden</sub>	M
3	-	-	t	m	tm
4	1	Lüftungshaus, nach hier fehlender Berechn. : 66 t, hier : $(66 / 25 = 2,6 \text{ t})$ <i>1,05</i>	2,7	16,5	45
5	2	HD, (einseitig, $11 \times 6 \times 0,25 \times 0,9$ ) $\times 2$ <i>1,05</i>	31,2	15,2	475
6	2	HD, Unt.züge + Decksbalk. (einseitig <i>1,25</i> $0,6 \times 0,15 \times 4 \times 6 \times 0,9$ ) $\times 2 = 3,9 \text{ t}$ , $\times 1,1$ (Decksb.)	5,4	14,7	80
6a		$\Sigma$ Pos. 1 - 2	39,3	15,03	600
7	3	Frischwasser, einseitig $8 \times 6 \times 4,8 \times 1 = 230 \text{ t}$ für eine Zelle. 8 Zellen = $8 \times 230 = 1 840 \text{ t}$ Hier also : $m = 1 840 / 25 =$ <i>1,0</i>	73,4	12,6	920
7a		Pos. 3	73,4	12,53	920
8	4	ob.Zw.D (einseitig, $11 \times 6 \times 0,06 \times 0,9$ ) $\times 2$ <i>1,05</i>	7,5	10,0	80
9	4	ob.Zw.D Unt.züge + Decksb. (einseitig $0,6 \times$ $0,07 \times 6 \times 4 \times 0,9$ ) $\times 2 = 1,8 \text{ t} \times 1,25$ (Decksb.)	2,3	9,7	20
10	5	unt.Zw.D (einseitig, $11 \times 6 \times 0,06 \times 0,9$ ) $\times 2$ <i>1,05</i>	7,5	5,0	40
11	5	unt.Zw.D Unt.züge + Decksb. (einseitig $0,6 \times 0,07 \times 6 \times 4 \times 0,9$ ) $\times 2 = 1,8 \text{ t} \times 1,25$ (Decksb.)	2,3	4,8	10
12	6	Bodenbepl. (einseitig $12,5 \times 6 \times 0,25 \times 0,9$ ) $\times 2$ <i>1,05</i>	35,5	0,1	0
13	6	Bodenbepl., L-Träg. + Bod.sptn (einseitig $0,6 \times 0,15 \times 4 \times 6 \times 0,9 + 0,6 \times 0,07 \times 4,5 \times 6 \times 0,9$ ) $\times 2$ $= (1,9 + 1,0) \times 2 =$ <i>1,5</i>	8,7	0,3	0
13a		$\Sigma$ Pos. 4 – 6	63,8	2,35	150
14	7	Außenhaut, oben, Planken (einseitig $2,6 \times 6 \times 0,18 \times 0,9$ ) $\times 2 =$ <i>1,05</i>	5,3	13,8	70
15	7	Außenhaut, oben, Spanten (einseitig $2,5 \times 0,55 \times 0,1 \times 0,9 \times 6$ ) $\times 2 =$ <i>1,5</i>	2,2	12,5	30
16	8 <sup>+) )</sup>	Außenhaut, mitte, Planken (einseitig $9,5 \times 6 \times 0,06 \times 0,9 \times 1,2^{+)$ ) $\times 2 = 7,4 \text{ t} =$ <i>1,4</i>	5,2	7,5	40
17	8	Außenhaut, mitte, Spanten bis Boden (einseitig $10 \times 0,8 \times 0,1 \times 0,9 \times 6$ ) $\times 2 = 8,6 =$ <i>1,5</i>	13,0	5,0	70
18	9	Außenhaut, unten, Planken (einseitig $2,5 \times 6 \times 0,25 \times 0,9$ ) $\times 2 =$ <i>1,05</i>	7,1	0,1	$\approx 0$

18a		$\Sigma$ Pos. 7 – 9	32,8	7,11	210
19	10	Spiegel (einseitig $114 / 2 / 25 = 2,3$ ) $\times 2 = 1,5$	6,8	7,5	50
20	11	Einbauten im Mittelschacht $40 / 25 = 1,25$	2,0	4,0	10
21	11	Schotten (Tab. 17 / 10.3)	14,0	7,0	100
20a		$\Sigma$ Pos. 10 – 11	22,8	7,01	160
21		$\Sigma$ Pos. 1, 2, 4 – 11 (d.h. ohne Frischwasser !)	159	7,03	1 120
22	Leerer Rumpf : <sup>2)</sup> $m = 159 \times 25 = 3 975$ t			7,03	

<sup>1)</sup> für Überlappung der Planken <sup>1)</sup> siehe Abb. 21 <sup>2)</sup> übertragen nach Tab. 2 / 3

### 10.5 Statische Werte des Hauptspantes

Tabelle 1 / 10.5

#### Trägheits- und Widerstands-Momente des Regelquerschnitts

mit Abmessungen nach Abb. 3 bis 5

1	2	3	4	5	6
2	Text	e	a	$e \times a$	$e^2 \times a$ bzw. $I_{\text{eigen}}$
3	m	m	$m^2$	$m^3$	$m^4$
4	Hauptdeck, Planken $10,9 \times 0,25$	15,10*)	2,73	41,1	621
5	“ U.Züg. $4 \times 0,6 \times 0,15$	14,45	0,36	5,2	75
6	“ Stringer $0,25^2$	14,72	0,06	0,9	15
7	Ob,Zw.Deck, Pl. $10,9 \times 0,06$	9,97	0,65	6,5	65
8	“ U.Z. $4 \times 0,6 \times 0,07$	9,70	0,17	1,6	16
9	“ Stringer $0,2^2$ **)	9,90	0,04	0,4	4
10	Unt.Zw.Deck, Pl. $10,9 \times 0,06$	4,96	0,65	3,2	16
11	“ U.Z. $4 \times 0,6 \times 0,07$	4,70	0,17	0,8	4
12	“ Stringer $0,2^2$ **)	4,90	0,04	0,2	1
13	Boden, Pl. $12,5 \times 0,25$	0,13	3,13	0,4	$\approx 0$
14	“ Längstr. $4 \times 0,60 \times 0,15$	0,37	0,36	0,1	$\approx 0$
15	“ Stringer $0,25^2$	0,33	0,06	$\approx 0$	$\approx 0$
16	Außenh. ob., Plank. $2,5 \times 0,18$	13,8	0,45	6,2	86
17	“ “ $I_{\text{eigen}}$				$\approx 0$
18	“ m., P. $10,0 \times 0,04 \times 1,2$	7,5	0,48	3,6	27
19	“ “ $I_{\text{eigen}}$				4
20	“ u., P. $2,5 \times 0,25$	1,3	0,63	0,8	1
21	“ “ $I_{\text{eigen}}$				$\approx 0$
22	$\Sigma$	---	10,0	71,8	935
23	$e^* = (\Sigma \text{ Sp. 5}) / (\Sigma \text{ Sp. 4}) =$	<b>7,10</b>	---	---	---
24	$-e^* \times \Sigma \text{ Sp. 5} =$				-504
25	Flächen-Trägheitsmoment			$I_{\text{NF}} =$	<b>431</b>

\*)  $15,10 > H = 15,0$  m ist wegen der Balkenbucht des Hauptdecks i.O.

\*\*) Stringer läuft tatsächlich nicht durch, der Fehler in Zeile 22 ist aber unerheblich.

Widerstands-Momente des halben bzw. ganzen Querschnittes :

$$w_o = 15,35 - 7,10 = 8,25 \text{ m (**)} \quad W_o = I_{\text{NF}} / w_o = \mathbf{52,2 \text{ m}^3} \text{ bzw. } \mathbf{104 \text{ m}^3}$$

$$w_u = 7,10 \text{ m} \quad W_u = I_{\text{NF}} / w_u = \mathbf{60,7 \text{ m}^3} \text{ bzw. } \mathbf{121 \text{ m}^3}$$

## 10.6 Längsfestigkeit

**Tab. 1 / 10.6** Lasten und Streckenlasten für Längsfestigkeit, Masse und Tiefgang

1	2	3	4	5
2	Text	Last	Lastlänge	Streck.last
3	-	kN	m	kN / m
4	Rumpf <sup>1) 2)</sup> siehe : Tab. 1/10.4 Z.22	39 750	150	265
5	Lebende Masse <sup>1) 2) 3)</sup>	1 200	150	8
6	Trockenvorräte <sup>1) 2) 3)</sup>	25 000	150	167
7	Σ Zeilen 4 – 6	65 950		
8	Reserve 10 % von Zeile 7	6 700		
9	Σ Zeilen 7 + 8	72 650		
10	Frischwasser 4 × 2 Zellen je 230 m <sup>3</sup>	18 400	je 6 m =	770
11	Rumpf voll ausgerüstet u. beladen Σ Zeilen 9 + 10 ≈	91 100 ↓		
13	Auftrieb <sup>4)</sup>	91 100 ↑	150	610

<sup>1)</sup> Bereich der 25 m-Abschnitte

<sup>2)</sup> auf L = 150 m gleichmäßig verteilt

<sup>3)</sup> nach Woodmaroppe (1996)

<sup>4)</sup> Wasserverdrängung 1 m<sup>3</sup> ≙ 10 kN Auftrieb

$$T = \text{Verdr.} / (L \times B) = 91\,050 / (150 \times 25) = 2,43 \approx 2,4 \text{ m}$$

### Biegemomente gesamt „Arche im glatten Wasser“

**Tab. 2 / 10.6** Zeichnerische Darstellung Abb. 17

1	2	3	4	5	6	7	8
2	Bereich	Länge	q <sub>mittl.</sub>	F <sub>c</sub>	Hebel	Teil-Mom.	Ges.-Mom.
3	Spt.a Spt.b	m	kN / m	kN	m	kNm	kNm
4	150 – 149	1	+ 440	+ 440	74,5	+ 32 800	+ 32 800
5	149 – 137	12	- 130	- 1 560	68	- 106 100	- 73 300
6	137 – 126	11	- 130	- 1 430	56,5	- 80 800	- 154 100
7	126 – 120	6	+ 640	+ 3 840	48	+ 184 300	+ 30 200
7	120 – 108	12	- 130	- 1 560	39	- 60 800	- 30 600
8	108 – 96	12	- 130	- 1 560	27	- 42 100	- 72 700
9	96 – 90	6	+ 640	+ 3 840	18	+ 69 100	- 3 600
10	90 – 82	8	- 130	- 1 040	11	- 11 400	- 15 000
11	82 – 75	7	- 130	- 910	3,5	- 3 200	- 18 200
12		75					

Spalte 3 : l = Spt.a – Spt.b

“ 4 : q<sub>mittl.</sub> nach <71> . Einfluß einer Kurvenkrümmung abgeschätzt

“ 5 : F<sub>c</sub> = q<sub>mittl.</sub> × l

“ 6 : Hebel = (Spt.a – Spt.b) – 75 . Einfluß einer Kurvenkrümmung abgeschätzt

“ 7 : Teil-Moment = (Sp.5) × (Sp. 6)

“ 8 : Ges.-Moment = Σ (der bisher berechneten Teil-Momente) ; gilt für Spt b

M > 0 ≙ „Hogging“, Zugspannungen im Hauptdeck

M < 0 ≙ „Sagging“, Druckspannungen im Hauptdeck

**Biegemomente gesamt „Arche auf Wellenberg“****Tab. 3 / 10.6** Zeichnerische Darstellung Abb. 18

1	2	3	4	5	6	7	8
2	Bereich	Länge	q <sub>mittl.</sub>	F <sub>c</sub>	Hebel	Teil-Mom.	Ges.-Mom.
3	Spt.a Spt.b	m	kN / m	kN	m	kNm	kNm
4	150 – 149	1	+ 1 050	+ 1 050	74,5	+ 78 200	+ 78 000
5	149 – 136	13	+ 430	+ 5 590	63,6	+ 355 500	+ 434 000
6	136 – 126	10	+ 280	+ 2 800	56,0	+ 156 800	+ 591 000
7	126 – 120	6	+ 890	+ 5 340	48,2	+ 257 400	+ 848 000
7	120 – 117,5	2,5	+ 30	+ 100	44,4	+ 4 400	+ 852 000
8	117,5 – 106	11,5	- 145	- 1 680	36,0	- 60 500	+ 792 000
9	106 – 96	10	- 430	- 4 300	25,5	- 109 700	+ 682 000
10	96 – 90	6	+ 180	+ 1 080	18,2	+ 19 700	+ 702 000
11	90 – 85	5	- 670	- 3 350	12,4	- 41 500	+ 661 000
12	85 – 79	6	- 720	- 4 320	6,8	- 29 400	+ 632 000
13	79 - 75	4	- 750	- 3 000	1,9	- 5 700	+ 626 000
11		75					

Erläuterungen zu den Spalten und Vorzeichen wie bei Tab. 2 / 10.6

**Biegemomente gesamt „Arche im Wellental“****Tab. 4 / 10.6** Zeichnerische Darstellung Abb. 19

1	2	3	4	5	6	7	8
2	Bereich	Länge	q <sub>mittl.</sub>	F <sub>c</sub>	Hebel	Teil-Mom.	Ges.-Mom.
3	Spt.a Spt.b	m	kN / m	kN	m	kNm	kNm
4	150 – 149	1	- 180	- 1 80	74,5	- 13 100	- 13 000
5	149 – 136	13	- 720	- 9 360	67,8	- 634 600	- 648 000
6	136 – 126	10	- 440	- 4 400	56,5	- 248 600	- 897 000
7	126 – 120	6	+ 370	+ 2 220	47,8	+ 106 100	- 791 000
8	120 – 107,5	11,5	- 220	- 2 530	40,5	- 102 500	- 893 000
9	107,5 – 96	12,5	+ 120	+ 1 500	24,8	+ 37 200	- 856 000
10	96 – 90	6	+ 1 060	+ 6 360	17,9	+ 113 800	- 742 000
11	90 – 85	5	+ 380	+ 1 900	12,5	+ 23 800	- 718 000
12	85 – 79	6	+ 440	+ 2 640	6,8	+ 18 000	- 700 000
13	79 - 75	4	+ 480	+ 1 920	1,9	+ 3 600	- 696 000
14		75					

Erläuterungen zu den Spalten und Vorzeichen wie bei Tab. 2 / 10.6

**Ergebnisse der Längsfestigkeitsrechnung (Zusammenfassung)****Tab. 5 / 10.6** Siehe auch Tab. 1 / 63

1	2	3	4	5	6	7
2	Lastfall	Abb.	M <sub>max</sub> - Bereiche	M <sub>max</sub>	σ <sub>max</sub> Deck	σ <sub>max</sub> Boden
3	--	--	Spt – Spt	kNm	kN / m <sup>2</sup>	kN / m <sup>2</sup>
4	Glattwasser	17	14 – 24 u. 126 – 136	+154 100	+1 480	- 1 270
5	Wellenberg	18	24 – 44 u. 106 – 126	+852 000	+8 190	- 7 040
6	Wellental	19	24 – 54 u. 96 – 126	- 893 000	- 8 590	+7 380
7	Wellental		σ <sub>max</sub> in	N / cm <sup>2</sup>	- 859	+ 738

σ = M / W    M (siehe Spalte 6)    W<sub>Deck</sub> = 104 m<sup>3</sup>    W<sub>Boden</sub> = 121 m<sup>3</sup> (siehe Tab. L 71 aus Kap. 10.5)    σ<sub>zul</sub> = 10 000 kN / m<sup>2</sup> = 1 kN / cm<sup>2</sup> = 1 000 N / cm<sup>2</sup>

Im Boden, im Bereich von Unterkante Längsträger, addieren sich folgende Spannungen :

Boden, aus Längsfest	nach Tab. 5 / 10.6	Zeile 7 Spalte 7	738 N / cm <sup>2</sup>
Längstr. " Wasserdruck	" " 2 / 10.3	" 7 " 11	158 "
Boden " " " " 4 / 10.3	" 3 " 11	66 "	

Es ist also zu rechnen mit

$$\sigma_{\max \text{ Boden}} = |962| \text{ N / cm}^2$$

$$< \sigma_{\text{zul}} = 1\,000 \text{ N / cm}^2$$

Im Hauptdeck, im Bereich von Oberkante Unterzüge, addieren sich folgende Spannungen :

Deck, aus Längsfest,	nach Tab. 5 / 10.6	Zeile 7 Spalte 6	859 N / cm <sup>2</sup>
" " Decksbelast.,	" " 5 / 10.3	" 3 " 11	42 "
Unt.z. " " " " 6 / 10.3	" 3 " 11	133 "	

Es ist also zu rechnen mit

$$\sigma_{\max \text{ Deck}} = |1\,034| \text{ N / cm}^2$$

$$\approx \sigma_{\text{zul}} = 1\,000 \text{ N / cm}^2$$

### 10.7 Querfestigkeit

Für die Darstellung des Lastfalles nach Abb. 13a wählen wir das ganz einfache statische Modell nach Abb. 14, mit statisch bestimmter Lagerung der Spanten. Mit den Ausgangswerten :

$q_1 = 15 \text{ kN / m}^2$  und  $q_2 = 35 \text{ kN / m}^2$  (Kap 10.2), der Länge  $l$  des 6,0 m – Abschnittes und dem Abstand der Decks  $h = 5,0 \text{ m}$  bekommt man auf einfachste Weise Werte für die Druckkräfte in den Raumbalken.:

$$F_1 = (q_1 \times l \times h) / 2 = (15 \times 6 \times 5) / 2 = 225 \text{ kN}$$

$$F_2 = F_1 + (q_2 \times l \times h) / 2 = 225 + (35 \times 6 \times 5) / 2 = 750 \text{ kN}$$

$$F_3 = q_2 \times l \times h = 35 \times 6 \times 5 = 1\,050 \text{ kN}$$

$$F_4 = (q_2 \times l \times h) / 2 = (35 \times 6 \times 5) / 2 = 525 \text{ kN}$$

$F_4$  wirkt unmittelbar in die Boden- und Querschott-Struktur und interessiert daher hier nicht.

Die Kräfte  $F_{1-3}$  werden von der anderen Rumpffseite aufgenommen, wobei außer dem dort herrschenden Wasserdruck auch die Stützkräfte der Flügelschotte und des Querschottes mitwirken. Die Stützkräfte der Schotten der berechneten Rumpffseite vermindern auch schon die Kräfte  $F_{1-3}$ , d.h. die gemachte Last- und Struktur-Annahme liegt sehr auf der sicheren Seite.

Als zul. Druckspannung nehmen wir auch hier  $1,0 \text{ kN / cm}^2$  an, siehe Kap. 10.1 . Dann ergeben sich die folgenden Kräfte in den Raumbalken und deren Abmessungen :

Höhe Hauptdeck :  $F_{\text{HD}} = F_1 = 225 \text{ kN}$  Querschnitt  $10 \times 27 \text{ cm}$

" ob.ZwD :  $F_{\text{oZD}} = F_2 = 750 \text{ kN}$  "  $20 \times 37 \text{ cm}$

" unt.ZwD :  $F_3$  wird vom Querschott übernommen

Die Balken stehen immer hochkant, um den Licht- und Luftquerschnitt im Mittelschacht möglichst wenig einzuengen. Bei den beiden Decks ist zu bedenken, daß die Diagonal-Streben des Fachwerks nach Kap. 4.6 bzw. 7.2 auch Komponenten der Kräfte  $F_{1-3}$  aufnehmen und damit die zugehörigen Raumbalken entlasten. Zur Ausbildung der Fachwerks-Knoten siehe Abb. 22 .

### 10.8 Torsionsfestigkeit

Wie in Kap. 4.2 erwähnt, wollen wir die mangelnde Torsionssteifigkeit der Arche durch Anordnung von liegenden Fachwerken im Mittelschacht beheben. Diese Fachwerke ver- bzw. behindern die bei Torsion des Rumpfes auftretende gegenseitige Verschiebung der Decksanten des Mittelschachtes, dazu Abb. 24, und erhöhen damit die Torsionsfestigkeit um ein Vielfaches. Dabei beschränken wir uns auf das Haupt- und das ob.Zwischen-Deck, da das unt.Zwischen-Deck nahe an der Längs-Schwerachse liegt, in der keine Kantenverschiebungen aus der Torsion entstehen. Die Fachwerkstreben bemessen wir in Anlehnung an die Abmessungen der Raumbalken (Kap. 10.7), verstärken aber die Streben im Hauptdeck, da dort wegen der größeren, zu verhindernden Kantenverschiebungen die Kräfte auch größer sind.

Hauptdeck  $20 \times 27 \text{ cm}$  hochkant

ob.ZwD  $20 \times 37 \text{ cm}$  "

Zur Ausbildung der Fachwerks-Knoten siehe Abb. 22 .

**10.9 Stabilität und Seeverhalten**Zur Stabilität

Zu der eigentlichen Stabilität der Arche verweisen wir auf Gitt (2001) bzw. Kap. 7.3, Berechnungen haben wir dazu nicht durchgeführt.

Zum Seeverhalten

Berechnet wird die Eigen-Roll-Schwingungs-Periode  $T_p$ , s.u. Dafür ist das Massenträgheitsmoment der Arche wichtig. Wir sind ähnlich wie bei der Massenermittlung der Arche vorgegangen. Grundlage der folgenden Tabelle 1 / 10.9 zur Berechnung des Massenträgheitsmoments  $M_I$  bzw. des Massen- Trägheitsradius  $i$  ist also die Tabelle 1 / 10.4. Definitionsgemäß ist :

$$M_I = m \times i^2 \quad [\text{tm}^2]$$

$i$  ist auf eine Längsachse 6,0 m üb. UKK bezogen und wird in den Spalten 6 – 8 nach Pythagoras errechnet, wobei die Radius-Anteile aus der Abb. 21 stammen. Dort sind die angenommenen Schwerpunkte der einzelnen Positionen, d.h. Teil-Massen, eingezeichnet.

**Tab. 1 / 10.9 Massenträgheitsmomente je 6 m – Abschnitt einschl. Reserve**

1	2	3	4	5	6	7	8
2	Pos. .Abb 21	<i>Text</i> kursiv : Pauschalzuschlag f. Kleinteile <i>Faktor für anteilige Reserve : 1,079</i>	Masse $m_4$	Masse $m_5 =$ $m_4 \times$ 1,079	$i_Y$	$i_Z$	$m_5 \times i_x^2$ $i_x^2 =$ $i_Y^2 + i_Z^2$
3	---	---	t	t	m	m	tm <sup>2</sup>
4	1	Lüftungshaus,.: 66 t, hier : = 2,6 t <span style="float:right">(66 / 25 1,05</span>	2,7	2,9	0	10,5	320
5	2	HD, (einseitig, 11× 6×0,25× 0,9) × 2 1,05	31,2	33,7	6,5	9,1	4 210
6	2	HD, Unt.züge + Decksbalk. (einseitig 0,6×0,15× 4×6×0,9)×2 = 3,9 t, × 1,1 (Decksb.) <span style="float:right">1,25</span>	5,4	5,8	6,5	8,8	690
6a		Σ Pos. 1 + 2	39,3	42,4			5 220
7	4	ob.Zw.D (einseitig, 11×6×0,06×0,9)×2 1,05	7,5	8,1	6,5	4,0	470
8	4	ob.Zw.D Unt.züge + Decksb. (einseitig 0,6× 0,07× 6×4×0,9)×2 = 1,8 t 1,25	2,3	2,5	6,5	3,8	140
9	5	unt.Zw.D (eins., 11×6×0,06×0,9)×2 <span style="float:right">1,05</span>	7,5	8,1	6,5	-1,0	350
10	5	unt.Zw.D Unt.züge + Decksb. (einseitig 0,6×0,07× 6×4×0,9)×2 = 1,8 t × <span style="float:right">1,25</span>	2,3	2,5	6,5	-1,2	110
11	6	Bodenbepl. (einseitig 12,5×6×0,25×0,9) × 2 <span style="float:right">1,05</span>	35,5	38,3	6,5	-5,9	2 950
12	6	Bodenbepl., L-Träg. + Bod.sptn (einseitig 0,6×0,15× 4×6×0,9+0,6×0,07×4,5×6×0,9) × 2 = (1,9+1,0) × 2 = <span style="float:right">1,5</span>	8,7	9,4	6,5	-5,7	700
12a		Σ Pos.4 – 6	63,8	68,9			4 720
13	7	Außenhaut, oben, Planken (einseitig 2,6×6×0,18× 0,9)×2 = <span style="float:right">1,05</span>	5,3	5,7	12,4	7,7	1 210
14	7	Außenhaut, mitte, Spanten (einseitig 9,5×6×0,06×0,9×1,2 <sup>+) × 2 = 7,4 t = <span style="float:right">1,5</span></sup>	2,2	2,4	12,4	7,7	510
15	8	Außenhaut, mitte, Planken (einseitig 9,5×6×0,06×0,9×1,2 <sup>+) × 2 = 7,4 t = <span style="float:right">1,4</span></sup>	5,2	5,6	12,4	1,5	870
16	8	Außenhaut, mitte, Spanten bis Boden (eins. 10×0,8×0,1×0,9×6)×2 = 8,6 = <span style="float:right">1,5</span>	13,0	14,0	12,3	-1,0	2 130
17	9	Außenhaut, unten, Planken (einseitig 2,5×6×0,25×0,9)×2 = <span style="float:right">1,05</span>	7,1	7,7	12,4	-4,5	1 340

17a		$\Sigma$ Pos. 7 – 9	32,8	35,4			6 060
18	10	Spiegel (eins. $114 / 2 / 25 = 2,3$ ) $\times 2$ 1,5	6,8	7,3	6,5	1,0	320
19	11	Einbauten im Mittelsch. 40/25 1,25	2,0	2,2	0	-1,0	$\approx 0$
20	11a	Schotten 343 / 25 =	13,7	14,8	6,5	0,2	630
21		$\Sigma$ Pos. 10 – 11a	22,5	24,3			950
22		$\Sigma$ Pos. 1 – 11a Leerer Rumpf	158,4	170,9			10 890
		<i>Masse des leeren Rumpfes ohne Reserve</i> <i>= 158,4 <math>\times</math> 25 = 3 960 t <math>\approx</math> 3 975 t</i> <i>vgl. Tab. 1 / 10.6</i>					
22		$\Sigma$ Pos. 1 – 11a Leerer Rumpf	158,4	170,9			10 890
23	3	Frischwasser	73,6	79,4	8,5	6,5	8 430
24	12	Lebende Masse ob.Zw.Deck	2,4	2,6	6,5	5,0	170
25	13	“ “ unt.Zw.Deck	2,4	2,6	6,5	0	110
26	14	Trockenvorräte	100,0	107,9	6,5	-3,8	6 120
27	---	$\Sigma$ Pos. 1 – 14 Arche Anfang d. Reise	336,8	363,4			14 830
28	15	mitschwingende Wassermasse *)	45,0	45,0	6,5	6,1	3 580
29	---	$\Sigma$ Pos. 1 – 15 Arche Anfang d. Reise im Seegang **)		408,4			18 410

\*) ohne Reserve ! \*\*) mit Reserve !  $i = \sqrt[2]{(Sp\ 8 / Sp\ 5)}$

Arche, Leerer Rumpf  $i = 7,98\ m = 0,32\ B$  (Zeile 22)

Arche, Anfang der Reise, glattes Wasser  $i = 6,39\ m = 0,26\ B$  (Zeile 27)

Arche, Anfang der Reise, im Seegang  $i = 6,71\ m = 0,27\ B$  (Zeile 29)

### Berechnung der Eigen-Roll-Schwingungs-Periode $T_p$

Nach Herner-Rusch (1952) ist :

$$\underline{T_p} = (2 \times \pi \times i) / \sqrt{(g \times MG)} \quad [s]$$

Darin sind :  $i$  der Trägheitsradius [ m ] des Massenträgheitsmomentes  $I_m$  der Arche [  $tm^2$  ]

nach Tab. 1 / 10.9 ist  $i = 6,71\ m$

$g$  = Schwerefaktor =  $9,81\ [m/s^2]$

$MG$  = metazentrische Höhe [ m ] nach (Schneekluth (1980)) und Abb. 26 :

$MG = MF + KF - KG$

$MF = I_{WL} / V$  [ m ]

$I_{WL}$  = Träg.h.mom. der Wasserlinie (Rechteck !)

$$= (L \times B^3) / 12 = 195\ 000\ m^4$$

$V$  = Wasserverdrängung. =  $L \times B \times T = 9\ 100\ m^3$  (vgl. Tab. 2 / 3)

$$MF = 195\ 000 / 9\ 100 \approx 21,4\ m$$

$$KF = T / 2 \approx 1,2\ m$$

$KG = 7,22\ m$  nach Tab. 2 / 3

$$\mathbf{MG} = 21,4 + 1,2 - 7,2 = \mathbf{15,4\ m}$$

$$\underline{T_p} = (2 \times \pi \times 6,71) / \sqrt{(9,81 \times 15,4)} = 42,1 / 12,3 = \mathbf{3,4\ s}$$

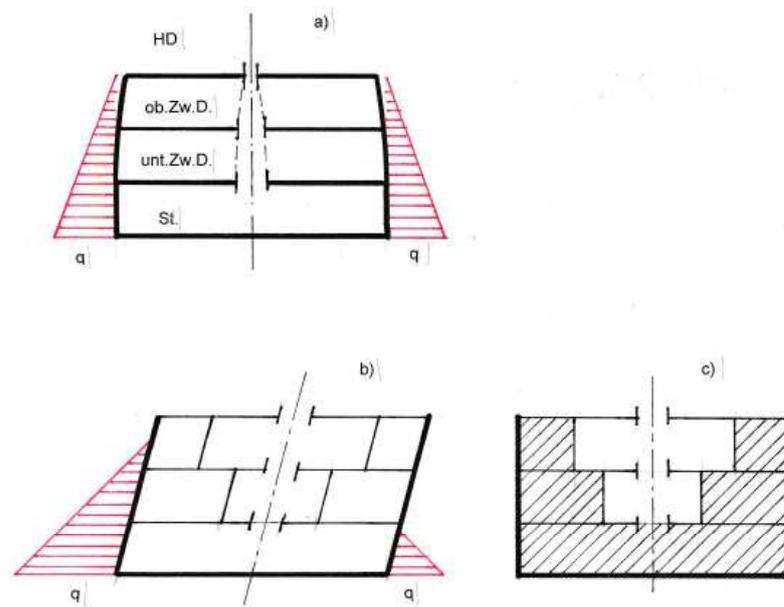


Abb. 13 Querschnittverformung im Seegang

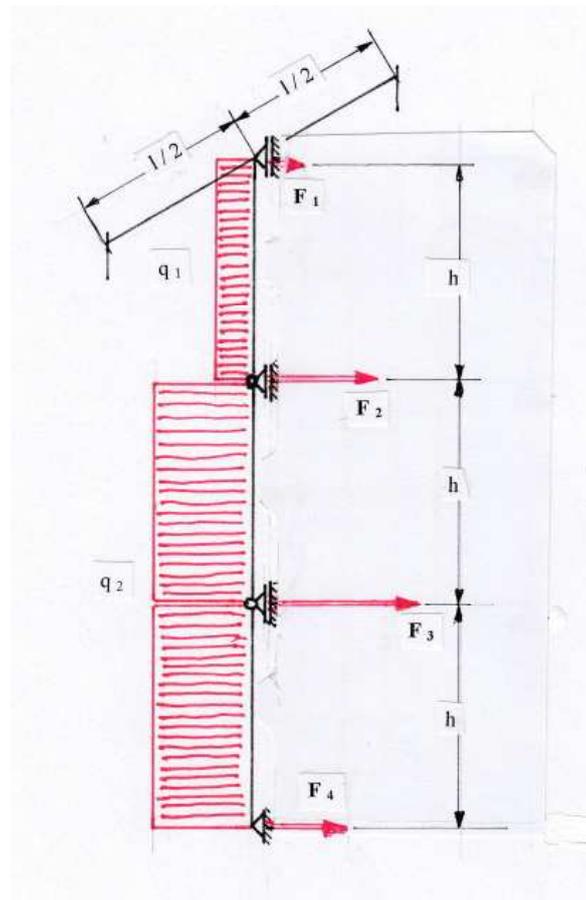


Abb. 14 Statisches Modell zur Querfestigkeitsberechnung



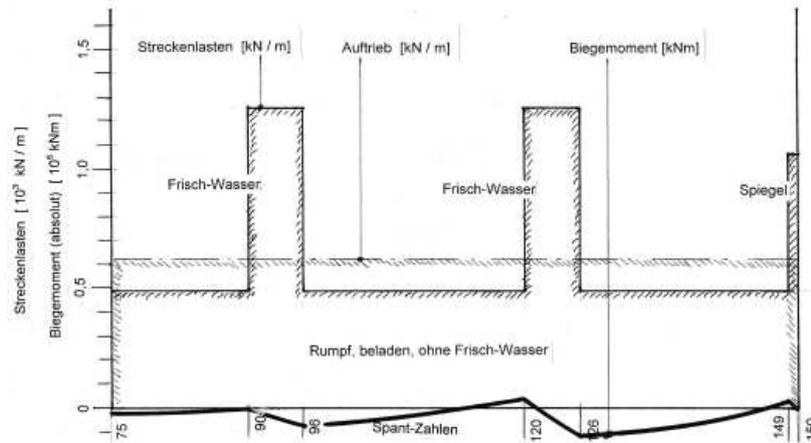


Abb. 17 Längsfestigkeit im glatten Wasser

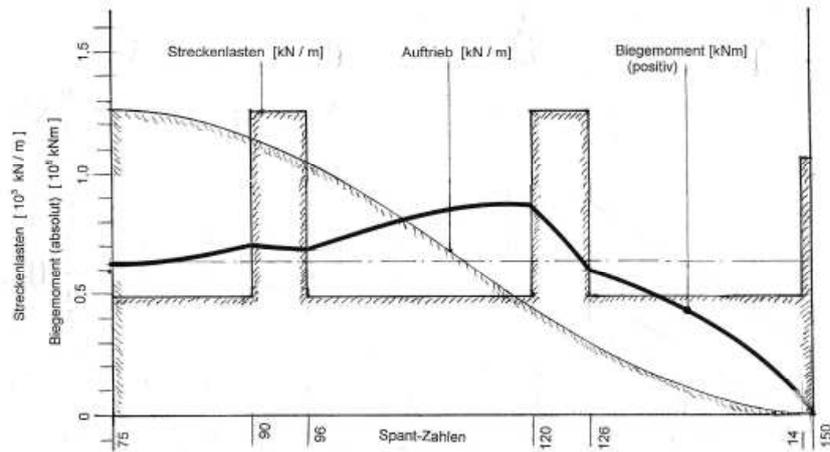


Abb. 18 Längsfestigkeit im Wellenberg

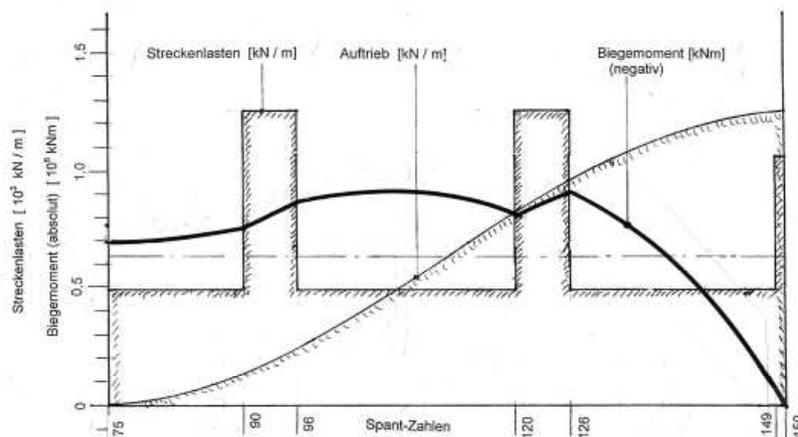
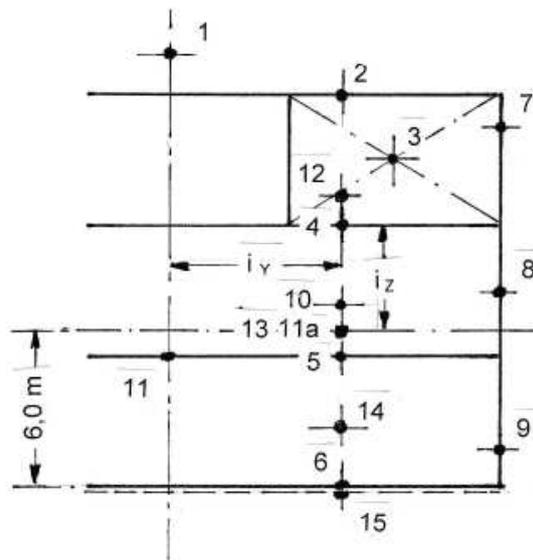


Abb. 19 Längsfestigkeit im Wellental



- 1 Lüftungshaus 2 Hauptdeck 3 Frischwasser 4 ob.Zw.Deck 5 unt.Zw.Deck  
6 Boden 7 Außenhaut oben 8 Außenhaut mitte 9 Außenhaut unten 10 Spiegel  
11 Einbauten Mitt.schacht 11a Schotten 12 Lebende Masse ob.Zw.Deck  
13 Lebende Masse unt.Zw.Deck 14 Trockenvorräte 15 mitschwing. Wassermasse

**Abb. 21 Zur Berechnung des Massenträgheitsmome**

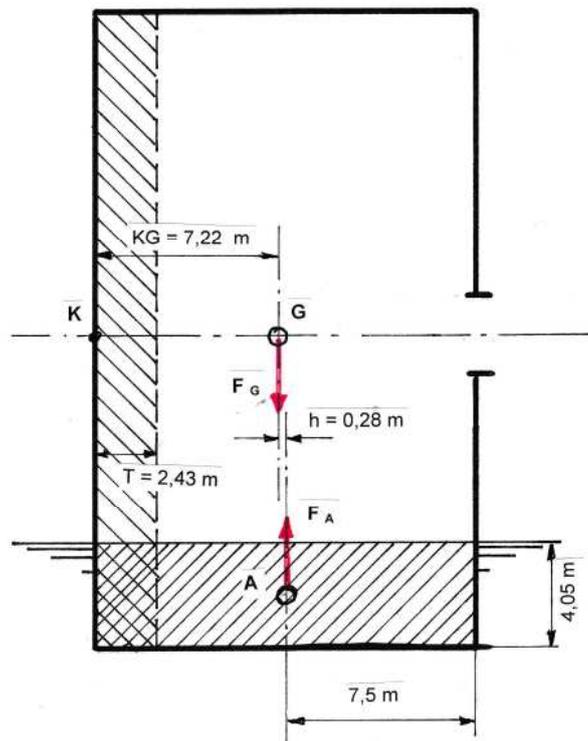


Abb. 25 Stabilität bei 90° Neigung

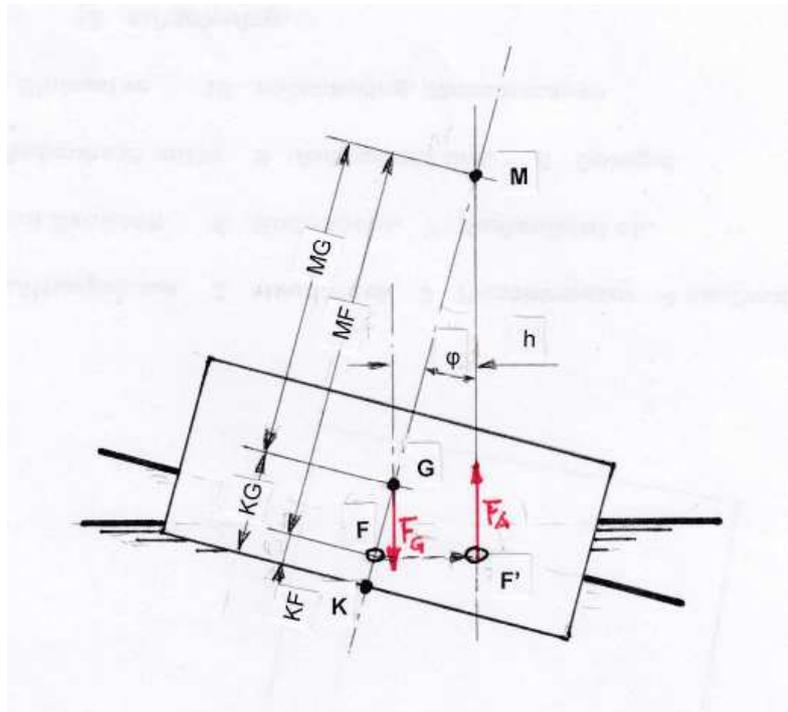


Abb. 26 Kräfte am geneigten Schiff