



Beispiele: Berechnung von Wellenbelastungen an vertikalen Wänden

A. Hafenmole

Vergleichende Bemessung einer Hafenmole auf *Standicherheit* für Wassertiefen $d_1 = 10\text{m}$ und $d_2 = 20\text{m}$.

Bestimmung der *erforderlichen Aufstandsbreiten* b_1 und b_2 [in m] unter Berücksichtigung vorgegebener Sicherheitskriterien für (gegen) Gleiten und Kippen.

Der Untergrund sei durchlässig; Sickervorgänge sollen aber unberücksichtigt bleiben.

Definitionen:

Gleitsicherheit

$$\nu = \frac{\mu \cdot F_N}{F_H} \geq 1,3$$

Kippsicherheit

$$\nu = \frac{M_{St}}{M_K} \geq 1,3$$

Charakteristische Wellenwerte:



Fall 1
 $d_1 = 10\text{m}$

Fall 2
 $d_2 = 20\text{m}$

$H = 2\text{m}$

$H = 2\text{m}$

$L = 50\text{m}$

$L = 50\text{m}$

$$\frac{H}{d} =$$

$0,2 < 0,78$
 $< 1,0$

$0,1 < 0,78$
 $< 1,0$

$$\max\left(\frac{H}{L}\right) = 0,142 \cdot \tanh \frac{2\pi d}{L} =$$

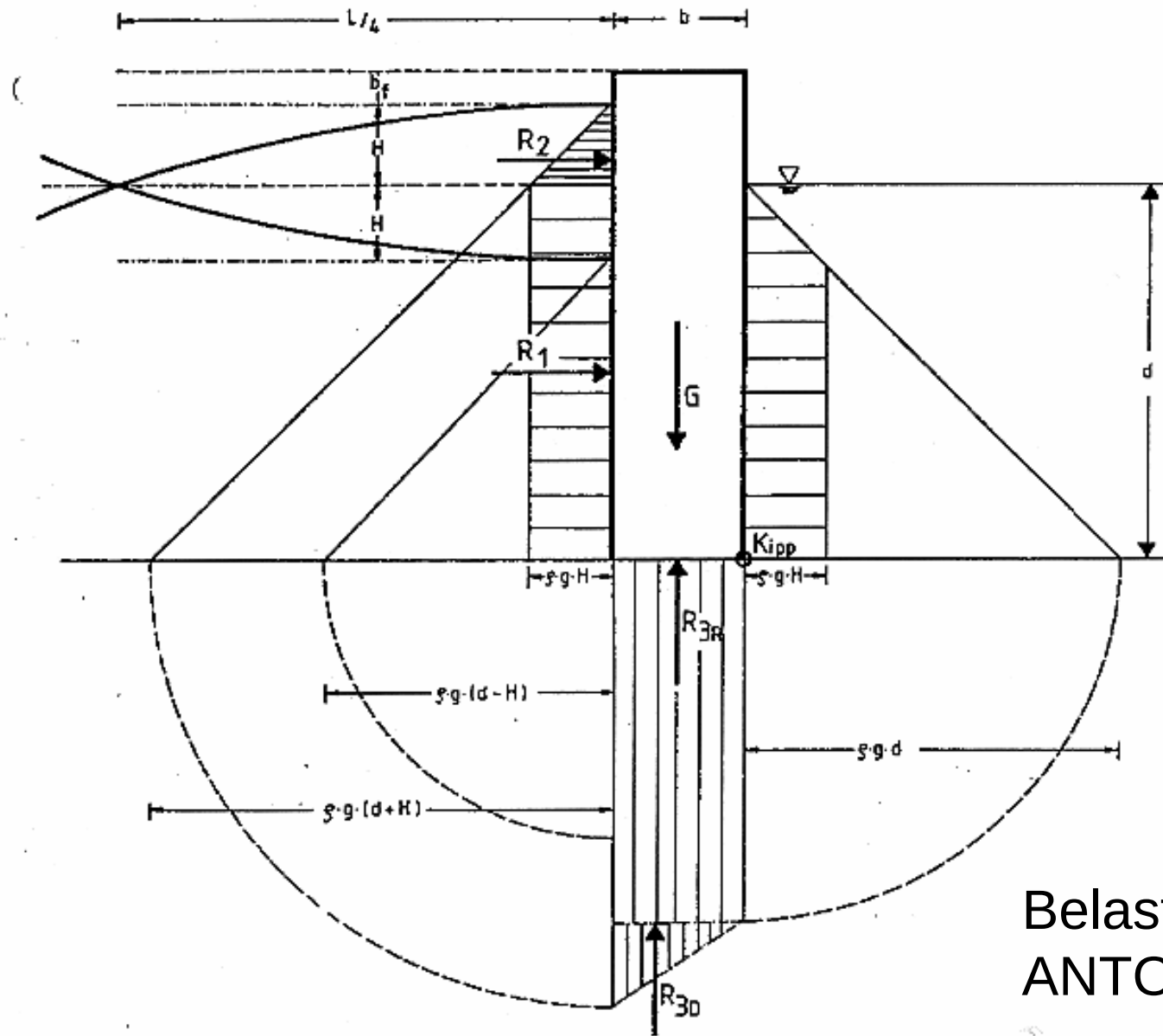
$0,12 > 0,04$

$0,14 > 0,04$

Die Stabilitätskriterien sind für fortschreitende und für reflektierte Wellen erfüllt !



<u>1. Eingangswerte</u>			Fall 1	Fall 2
		Einheit		
Wassertiefe	d	m	10,0	20,0
Wellenhöhe	H	m	2,0	2,0
Wellenlänge	L	m	50,0	50,0
Freibordhöhe	b _f	m	1,0	1,0
Erdbeschleunigung	g	m/s ²	9,81	9,81
Dichte des Molenbaustoffes	ρ _M	t/m ³	2,2	2,2
Wichte des Molenbaustoffes	ρ _M ·g	kN/m ³	2,2 · 9,81 = 21,6	2,2 · 9,81 = 21,6
Dichte von Meerwasser, Salzgehalt 3,5%, t = 10°C	ρ _w	t/m ³	≈1,027	≈1,027
Wichte des Wassers	γ = ρ _w ·g	kN/m ³	1,027 · 9,81 = 10,07	1,072 · 9,81 = 10,07
Reibungsbeiwert zwischen Bausohle und Untergrund	μ = tan α		0,3	0,3
Sicherheit gegen Kippen und Gleiten	v		1,3	1,3
© Büsching, F.: Küsteningenieurwesen				2002/08.3



Belastungsbild nach
ANTONELLI



2. Bemessung nach Antonelli:

Molenhöhe:

$H_M = d + H + b_f$	m	$10 + 2 + 1 = 13$	$20 + 2 + 1 = 23$
---------------------	---	-------------------	-------------------

Moleneigengewicht/Meter:

$G = \rho \cdot g \cdot H_M \cdot b$	kN	$21,6 \cdot 13 \cdot b = 280,8 \cdot b$	$21,6 \cdot 23 \cdot b = 496,8 \cdot b$
--------------------------------------	----	---	---

Wasserlast/Meter:

horizontal: $R_1 = \rho \cdot g \cdot H \cdot d$	kN	$10,07 \cdot 2 \cdot 10 = 201,4$	$10,07 \cdot 2 \cdot 20 = 402,8$
---	----	----------------------------------	----------------------------------

$R_2 = \rho \cdot g \cdot H \cdot \frac{H}{2}$	kN	$10,07 \cdot 2 \cdot 2/2 = 20,14$	$10,07 \cdot 2 \cdot 2/2 = 20,14$
--	----	-----------------------------------	-----------------------------------

$F_H = W_b = R_1 + R_2$	kN	$201,4 + 20,14 = 221,54$	$402,8 + 20,14 = 422,94$
-------------------------	----	--------------------------	--------------------------

vertikal:

$R_{3D} = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot b}{2}$	kN	$\frac{10,07 \cdot 2}{2} \cdot b = 10,07 \cdot b$	$\frac{10,07 \cdot 2}{2} \cdot b = 10,07 \cdot b$
---	----	---	---

$R_{3R} = \rho \cdot g \cdot d \cdot b$	kN	$10,07 \cdot 10 \cdot b = 100,7 \cdot b$	$10,07 \cdot 20 \cdot b = 201,4 \cdot b$
---	----	--	--

$F_V = R_3 = R_{3D} + R_{3R}$	kN	$(10,07 + 100,7) \cdot b = 110,77 \cdot b$	$(10,07 + 201,4) \cdot b = 211,47 \cdot b$
-------------------------------	----	--	--



2.1 Fall I (d = 10 m)

2.1.1 Bemessung auf Gleitsicherheit

$$\nu = \frac{\mu \cdot G}{W_B} \geq 1,3$$

$$\nu \cdot (R_1 + R_2) = \mu \cdot (G - R_3)$$

$$\nu \cdot (R_1 + R_2) = \mu \cdot (280,8 \cdot b - 110,77 \cdot b)$$

$$\nu \cdot (R_1 + R_2) = \mu \cdot 170,03 \cdot b \Rightarrow$$

$$b_{\text{erf}} = \frac{\nu \cdot (R_1 + R_2)}{\mu \cdot 170,03}$$

$$b_{\text{erf}} = \frac{1,3 \cdot 221,54}{0,3 \cdot 170,03} = \frac{288,00}{51,01}$$

$$b_{\text{erf}} = 5,65 \text{ m}$$



2.1.2 Nachweis der Kippsicherheit

$$\nu = \frac{M_{\text{Stand}}}{M_{\text{Kipp}}}$$

$$\nu = \frac{G \cdot \frac{b}{2}}{R_1 \cdot \frac{d}{2} + R_2 \cdot \left(d + \frac{H}{3}\right) + R_{3R} \cdot \frac{1}{2} \cdot b + R_{3D} \cdot \frac{2}{3} \cdot b}$$

$$\nu = \frac{280,8 \cdot b \cdot \frac{b}{2}}{201,4 \cdot \frac{10}{2} + 20,14 \cdot \left(10 + \frac{2}{3}\right) + 100,7 \cdot b \cdot \frac{1}{2} \cdot b + 10,07 \cdot b \cdot \frac{2}{3} \cdot b}$$

$$\nu = \frac{140,4 \cdot b^2}{1221,83 + 57,06 \cdot b^2}$$

aus 2.1.1 bekannt: $b = 5,65 \text{ m}$

$$\nu = \frac{140,4 \cdot 5,65^2}{1221,83 + 57,06 \cdot 5,65^2} \quad \nu = \frac{4481,92}{3043,33}$$

$$\nu = 1,47 > 1,3$$



2.2 Fall II (d = 20 m)

2.2.1 Bemessung auf Kippsicherheit

$$\nu = \frac{M_{\text{Stand}}}{M_{\text{Kipp}}}$$

$$\nu = \frac{G \cdot \frac{b}{2}}{R_1 \cdot \frac{d}{2} + R_2 \cdot \left(d + \frac{H}{3}\right) + R_{3R} \cdot \frac{1}{2} \cdot b + R_{3D} \cdot \frac{2}{3} \cdot b}$$

$$\nu = \frac{496,8 \cdot b \cdot \frac{b}{2}}{402,8 \cdot \frac{20}{2} + 20,14 \cdot \left(20 + \frac{2}{3}\right) + 201,14 \cdot b \cdot \frac{1}{2} \cdot b + 10,07 \cdot b \cdot \frac{2}{3} \cdot b}$$

$$\nu = \frac{248,4 \cdot b^2}{4444,23 + 107,28 \cdot b^2} \quad 1,3 = \frac{248,4 \cdot b^2}{4444,23 + 107,28 \cdot b^2} \Rightarrow$$

$$1,3 \cdot (4444,23 + 107,28 \cdot b^2) = 248,4 \cdot b^2$$

$$5777,50 + 139,46 \cdot b^2 = 248,4 \cdot b^2$$

$$5777,50 = 108,94 \cdot b^2 \quad 53,03 = b^2$$

$$b = 7,28 \text{ m}$$



2.2.2 Nachweis der Gleitsicherheit

$$v = \frac{\mu \cdot (G - F_V)}{F_H}$$

$$v = \frac{0,3 \cdot (496,8 \cdot b - 211,21 \cdot b)}{422,94}$$

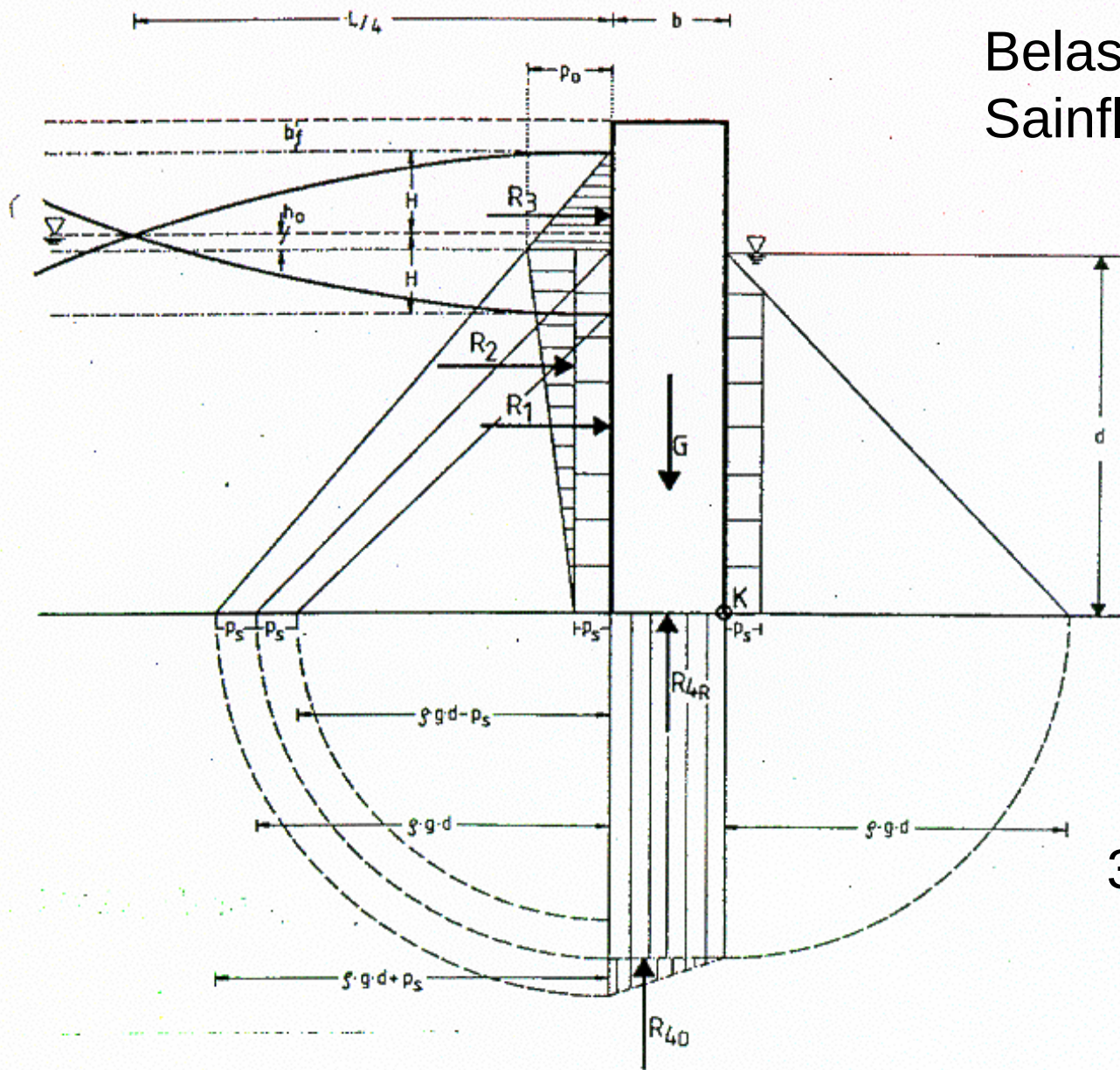
aus 2.2.1 bekannt: $b = 7,28 \text{ m}$

$$v = \frac{0,3 \cdot 285,33 \cdot 7,28}{422,94}$$

$$v = 1,47 > 1,3$$



Belastungsbild nach Sainflou



3. Bemessung nach Sainflou



Wasserspiegelhebung:

$$h_0 = \pi \cdot \frac{H^2}{L} \cdot \coth\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L}\right)$$

$$= \pi \cdot \frac{H^2}{L} \cdot \frac{1}{\tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L}\right)}$$

m

$$\pi \cdot \frac{2^2}{50} \cdot \frac{1}{\tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 10}{50,0}\right)}$$

$$= 0,296$$

$$\pi \cdot \frac{2^2}{50} \cdot \frac{1}{\tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 20}{50,0}\right)}$$

$$= 0,255$$

Wasserdruck an der Sohle:

$$p_s = \frac{\rho \cdot g \cdot H}{\cosh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L}\right)}$$

kN/m²

$$\frac{10,07 \cdot 2,0}{\cosh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 10}{50,0}\right)}$$

$$= 10,61$$

$$\frac{10,07 \cdot 2,0}{\cosh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 20}{50,0}\right)}$$

$$= 3,24$$

Wasserdruck bezüglich der Bauwerkssohle:

dynamisch:

$$p_{\text{dyn}} = p_s + \rho \cdot g \cdot d$$

kN/m²

$$10,61 + 10,07 \cdot 10$$

$$= 111,31$$

$$3,24 + 10,07 \cdot 20$$

$$= 204,64$$

quasihydrostatisch:

$$p_{\text{quasistat}} = \rho \cdot g \cdot (d + H + h_0)$$

kN/m²

$$10,07 \cdot (10 + 2 + 0,296) =$$

$$123,82$$

$$10,07 \cdot (20 + 2 + 0,255) =$$

$$224,11$$

Wasserdruck in ungestörter
Wasserspiegellinie:

$$p_0 = \rho \cdot g \cdot \frac{(H + h_0) \cdot \left(d + \frac{p_s}{\rho \cdot g} \right)}{(d + H + h_0)} \quad \text{kN/m}^2$$

$$10,07 \cdot (2,0 + 0,296) \cdot \frac{\left(10 + \frac{10,61}{10,07} \right)}{(10 + 2 + 0,296)} = 20,78$$

$$10,07 \cdot (2,0 + 0,255) \cdot \frac{\left(20 + \frac{3,24}{10,07} \right)}{(20 + 2 + 0,255)} = 20,74$$

Molenhöhe:

$$H_M = d + H + h_0 + b_f$$

m

$$10 + 2 + 0,296 + 1 = 13,296$$

$$20 + 2 + 0,255 + 1 = 23,255$$

Moleneigengewicht/Meter:

$$G = \rho \cdot g \cdot H_M \cdot b$$

kN

$$21,6 \cdot 13,296 \cdot b = 287,2 \cdot b$$

$$21,6 \cdot 23,255 \cdot b = 502,3 \cdot b$$

Wasserlast/Meter:

horizontal:

$$R_1 = p_S \cdot d \quad \text{kN}$$

$$10,61 \cdot 10 = 106,1$$

$$3,24 \cdot 20 = 64,8$$

$$R_2 = \frac{(p_0 - p_S) \cdot d}{2} \quad \text{kN}$$

$$\frac{(20,78 - 10,61) \cdot 10}{2} = 50,85$$

$$\frac{(20,74 - 3,24) \cdot 20}{2} = 175,0$$

$$R_3 = \frac{p_0 \cdot (h_0 + H)}{2} \quad \text{kN}$$

$$\frac{20,78 \cdot (0,296 + 2,0)}{2} = 23,86$$

$$\frac{20,74 \cdot (0,255 + 2,0)}{2} = 23,38$$

$$F_H = W_b = R_1 + R_2 + R_3$$

$$106,1 + 50,85 + 23,86 = 180,81$$

$$64,8 + 175,0 + 23,38 = 263,18$$

vertikal:

$$R_{4D} = \frac{p_S \cdot b}{2} \quad \text{kN}$$

$$\frac{10,61}{2} \cdot b = 5,31 \cdot b$$

$$\frac{3,24}{2} \cdot b = 1,62 \cdot b$$

kN

$$R_{4R} = \rho \cdot g \cdot d \cdot b$$

$$10,07 \cdot 10 \cdot b = 100,7 \cdot b$$

$$10,07 \cdot 20 \cdot b = 201,4 \cdot b$$

$$R_4 = R_{4D} + R_{4R} \quad \text{kN}$$

$$F_V = R_4 = \left(\frac{p_S}{2} + \rho \cdot g \cdot d \right) \cdot b$$

$$(5,31 + 100,7) \cdot b = 106,01 \cdot b$$

$$(1,62 + 201,14) \cdot b = 202,76 \cdot b$$



3.1 Fall I (d = 10 m)

3.1.1 Bemessung auf Kippsicherheit

$$\nu = \frac{M_{\text{Stand}}}{M_{\text{Kipp}}}$$

$$\nu = \frac{G \cdot \frac{b}{2}}{R_1 \cdot \frac{1}{2} \cdot d + R_2 \cdot \frac{2}{3} \cdot d + R_3 \cdot \left(d + \frac{1}{3} \cdot (H + h_0) \right) + R_{4D} \cdot \frac{2}{3} \cdot b + R_{4R} \cdot \frac{1}{2} \cdot b}$$

$$\nu = \frac{287,2 \cdot b \cdot \frac{b}{2}}{106,1 \cdot \frac{1}{2} \cdot 10 + 50,85 \cdot \frac{2}{3} \cdot 10 + 23,86 \cdot \left(10 + \frac{1}{3} \cdot (2,0 + 0,296) \right) + 5,31 \cdot b \cdot \frac{2}{3} \cdot b + 100,7 \cdot b \cdot \frac{1}{2} \cdot b}$$

$$1,3 = \frac{143,6 \cdot b^2}{1126,36 + 53,89 \cdot b^2} \Rightarrow \quad 1,3 \cdot (1126,36 + 53,98 \cdot b^2) = 143,6 \cdot b^2$$

$$1464,27 + 70,17 \cdot b^2 = 143,6 \cdot b^2 \quad 1464,27 = 73,43 \cdot b^2$$

$$19,94 = b^2 \quad b = 4,47 \text{ m} < 5,65 \text{ m (n. Antonelli !)}$$



3.1.2 Nachweis der Gleitsicherheit

$$\nu = \frac{\mu \cdot (G - F_V)}{F_H} \geq 1,3$$

$$\nu = \frac{\mu \cdot (287,2 \cdot b - 106,01 \cdot b)}{180,81} \geq 1,3$$

$$\nu \cdot 180,81 = 0,3 \cdot (287,2 \cdot b - 106,01 \cdot b)$$

$$\nu \cdot 180,81 = 54,33 \cdot b$$

aus 3.1.1 bekannt: $b = 4,47 \text{ m}$

$$\nu = 1,34 > 1,3$$

3.2 Fall II ($d = 20 \text{ m}$)

3.2.1 Bemessung auf Kippsicherheit

$$\nu = \frac{M_{\text{Stand}}}{M_{\text{Kipp}}}$$



$$v = \frac{G \cdot \frac{b}{2}}{R_1 \cdot \frac{1}{2} \cdot d + R_2 \cdot \frac{2}{3} \cdot d + R_3 \cdot \left(d + \frac{1}{3} \cdot (H + h_0) \right) + R_{4D} \cdot \frac{2}{3} \cdot b + R_{4R} \cdot \frac{1}{2} \cdot b}$$

$$v = \frac{502,3 \cdot b \cdot \frac{b}{2}}{64,8 \cdot \frac{1}{2} \cdot 20 + 175,0 \cdot \frac{2}{3} \cdot 20 + 23,38 \cdot \left(10 + \frac{1}{3} \cdot (2,0 + 0,296) \right) + 5,31 \cdot b \cdot \frac{2}{3} \cdot b + 100,7 \cdot b \cdot \frac{1}{2} \cdot b}$$

$$1,3 = \frac{143,6 \cdot b^2}{3233,03 + 53,89 \cdot b^2} \Rightarrow$$

$$1,3 \cdot (3233,03 + 53,98 \cdot b^2) = 143,6 \cdot b^2$$

$$4202,94 + 70,17 \cdot b^2 = 143,6 \cdot b^2$$

$$4202,94 = 73,43 \cdot b^2$$

$$57,24 = b^2$$

$$b = 7,57 \text{ m} > 7,28 \text{ m (n. Antonelli)}$$

3.2.2 Nachweis der Gleitsicherheit

$$v = \frac{\mu \cdot (G - F_v)}{F_H} \geq 1,3$$

$$v = \frac{\mu \cdot (502,3 \cdot b - 202,76 \cdot b)}{263,18} \geq 1,3$$

$$v \cdot 263,18 = 0,3 \cdot (502,3 \cdot b - 202,76 \cdot b)$$

$$v \cdot 263,18 = 89,86 \cdot b$$

$$\text{aus 3.1.1 bekannt: } b = 7,57 \text{ m} \quad v = 2,58 > 1,3$$