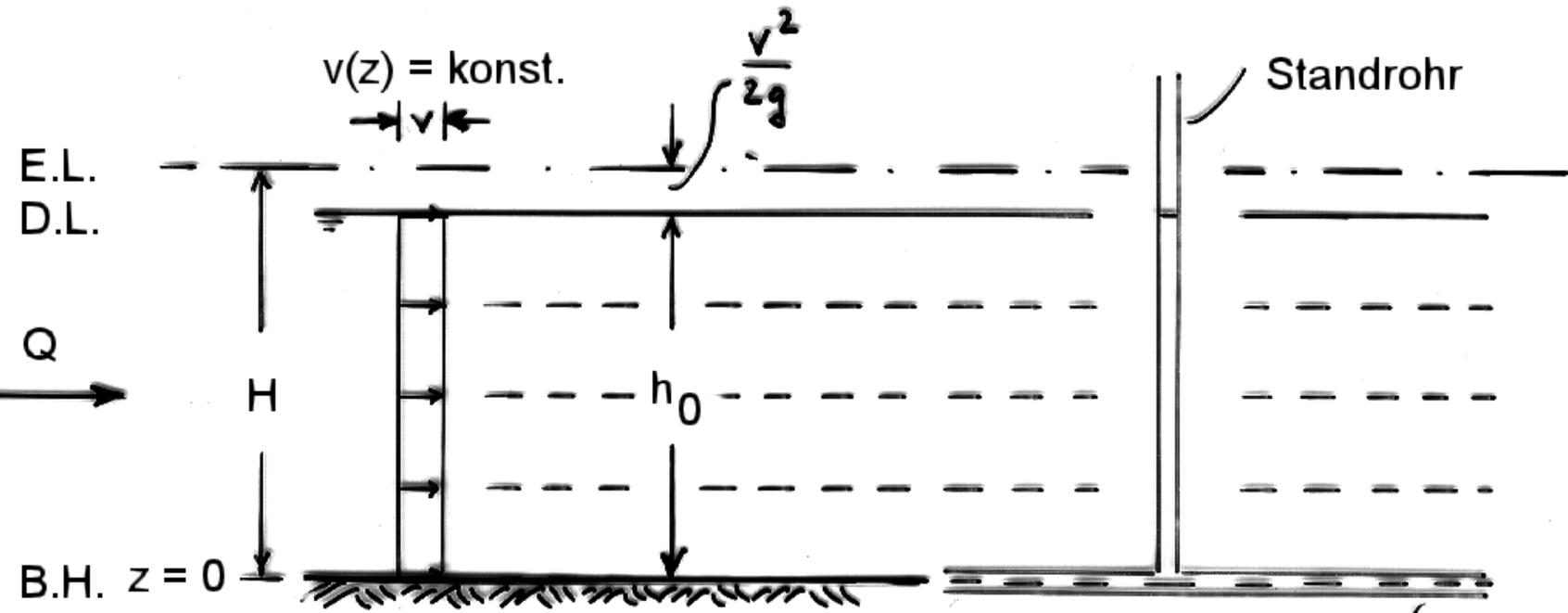


## 1. Parallelströmung:



$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}$$

Stromlinie = infinitesimale Rohrleitung

Für  $z = 0$  ist  $\frac{p}{\gamma} = H - \frac{v^2}{2g} = h_0$  und  $p = \gamma \cdot h_0$

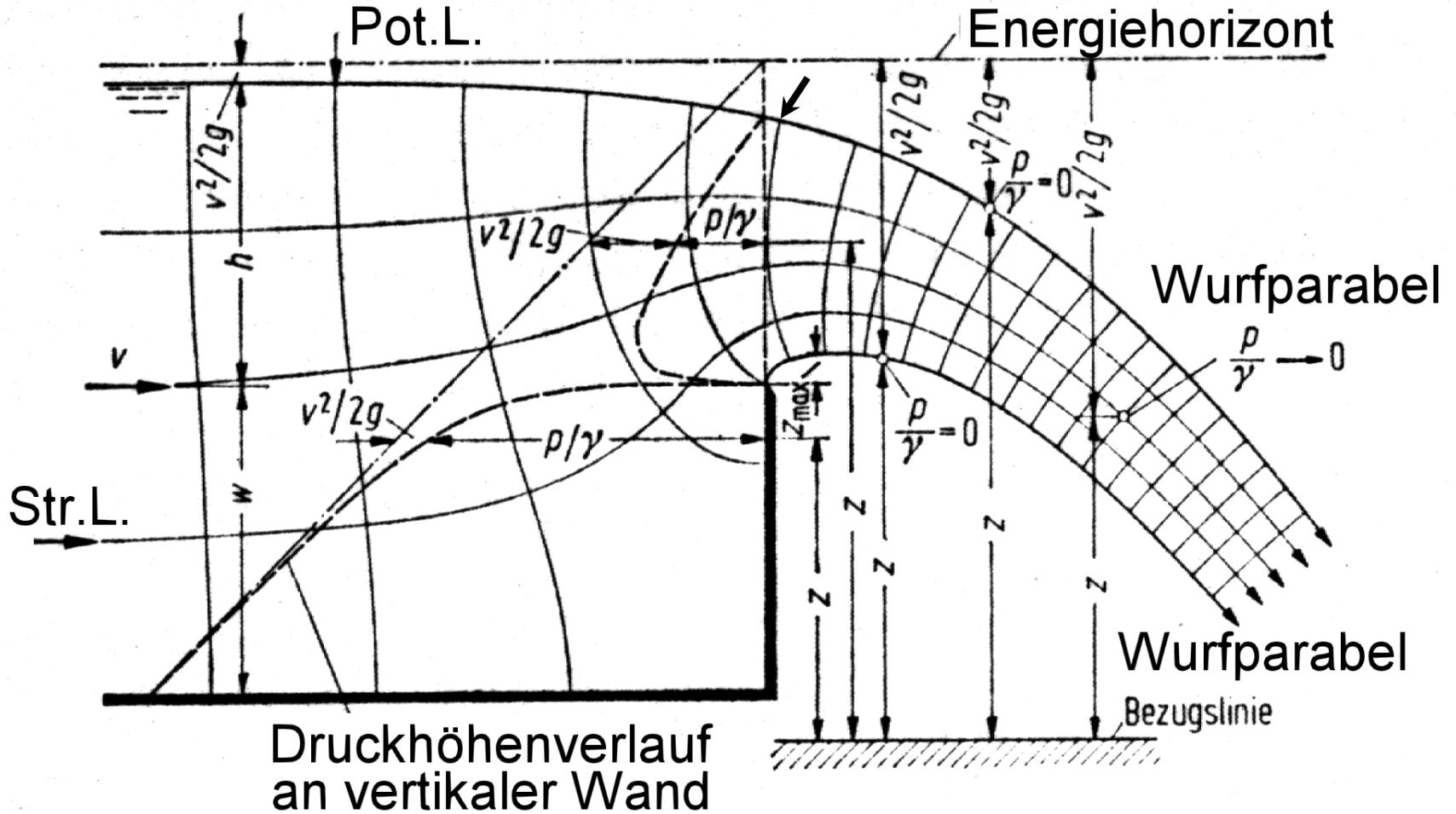
Für  $z = h_0/2$  ist  $\frac{p}{\gamma} = H - \frac{v^2}{2g} - \frac{h_0}{2}$  und  $p = \gamma \cdot \frac{h_0}{2}$



Die Annahme konstanter Strömungsgeschwindigkeit im Querschnitt (Potentiallinien = Isotachen) hat die Folgen:

- Die Druckspannungsverteilung ist hydrostatisch (linear mit der Tiefe zunehmend).
- Die Potentiallinien (Normalen zu den Stromlinien) sind hier nicht Linien gleichen Druckes.

## 2. Überfallströmung (gekrümmte Stromlinien):



$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}$$

An den Oberflächen des Überfallstrahls wirkt nur der barometrische Luftdruck:  $\frac{p}{\gamma} = 0$

Die Stromlinien der Überfallströmung sind Wurfparabeln:



$$\frac{v^2}{2g} = H - z$$

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot (H - z)}$$

(Torricelli)

- Die Strahldicke nimmt nach unten ab, da die Geschwindigkeit (nach Torricelli) nach unten zunimmt.
- Da die Maschenweite (auch) entlang der geneigten Potentiallinie kleiner wird, tritt Krümmung bei Strom- und Potentiallinien auf mit der Folge, dass (im Gegensatz zur Parallelströmung)
- die Druckspannung sich *nicht mehr linear* ändert und
- die Geschwindigkeitsverteilung *nicht mehr konstant* ist.



Die *Verteilung der Druckspannungen* (oder der Druckhöhen) kann bezüglich einer Potentiallinie berechnet werden, wenn die Strömungsgeschwindigkeit an einer Stelle des Netzes bekannt ist.

- Hier kann die Geschwindigkeit aus der Fallparabel des Wasserspiegels für bekanntes  $H$  und  $z$  berechnet werden.
- Im Feld verhalten sich die Geschwindigkeiten reziprok zu den Maschenseiten.

- $$\frac{p(z)}{\gamma} = H - z - \frac{v_{(z)}^2}{2 \cdot g}$$

Für die mit *Pfeil* gekennzeichnete Potentialfläche wurden die Gesamthöhe  $H = 10,6\text{m}$  und die Ortshöhen  $z$  der Knotenpunkte aus der Zeichnung im Maßstab 1:100 abgegriffen. Die Berechnung erfolgt nachfolgend tabellarisch.



Ortshöhe z (gemessen) [m]	Stroml.-Abst (gemessen) [m]	Geschwindig- keit [m/s]	Druckhöhe [m]	Druck [kPa]
9,6	1,25	4,43	0	0
8,4	1,1	5,03	0,91	8,93
7,35	0,85	6,51	1,09	10,69
6,5	0,65	8,52	0,40	3,93
5,9		9,6	0	0

Am oberen Wasserspiegel ist die Strömungsgeschwindigkeit:

$$v_{(z=9,6)} = \sqrt{2 \cdot g \cdot (10,6 - 9,6)} = 4,43 \text{ m/s}$$

Am unteren Wasserspiegel:

$$v_{(z=5,9)} = \sqrt{2 \cdot g \cdot (10,6 - 5,9)} = 9,6 \text{ m/s}$$

Die Genauigkeiten der Feldwerte sind von der Maschendichte abhängig.



### 3. Ausströmung (Partielle Senkenströmung; Unterströmung)

Abschätzung der horizontalen und vertikalen hydraulischen Belastungskomponenten eines Talsperrentiefschützes.

Hydraulische Modelluntersuchungen für die Ermittlung der hydrodynamischen Lasten hochbelasteter Talsperrentiefschützen sind aufwendig. Zur Abschätzung derartiger Belastungen können Berechnungen auf der Grundlage der Potentialtheorie durchgeführt werden, wenn das Potentialnetz die reale Umströmung hinreichend zutreffend beschreibt.

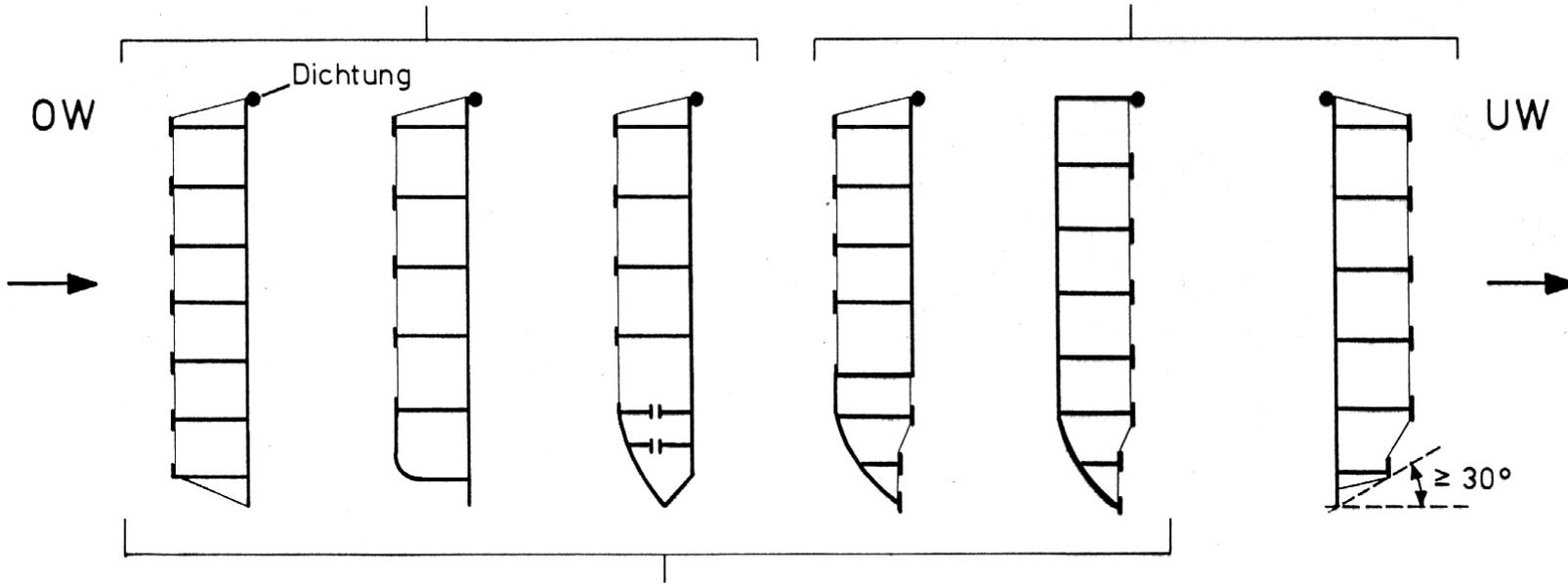
Wird die Auslassöffnung durch Anordnung eines Strahlleitbleches etwa keilförmig ausgebildet, kann nach Kulka (1928) angenommen werden, dass die Stromlinien in der Vertikalebene durch den Mittelpunkt konzentrischer Kreise verlaufen, die selbst die Potentiallinien darstellen (vergl. Quell- bzw. Senkenströmung).



# BAUFORMEN DER TALSPERRENTIEFSCHÜTZEN

Unterwasserseitige Stauwand

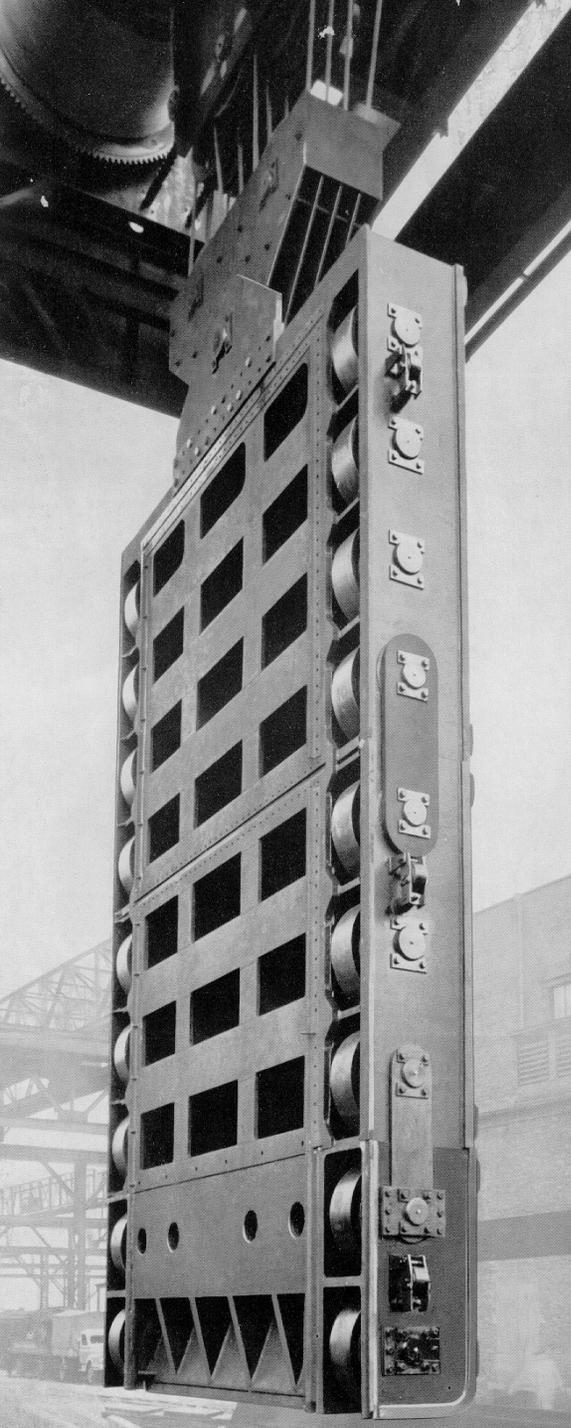
Oberwasserseitige Stauwand



Unterwasserseitige Dichtung

Oberwasserseitige Dichtung

Die betreffende Annahme trifft am ehesten auf Schützen mit OW-seitiger Anordnung der Stauwand und UW-seitiger Anordnung der Dichtungen zu.



Einlaufschütze dreiteilig

Stauwand OW-seitig,  
geneigtes Strahlleitblech.

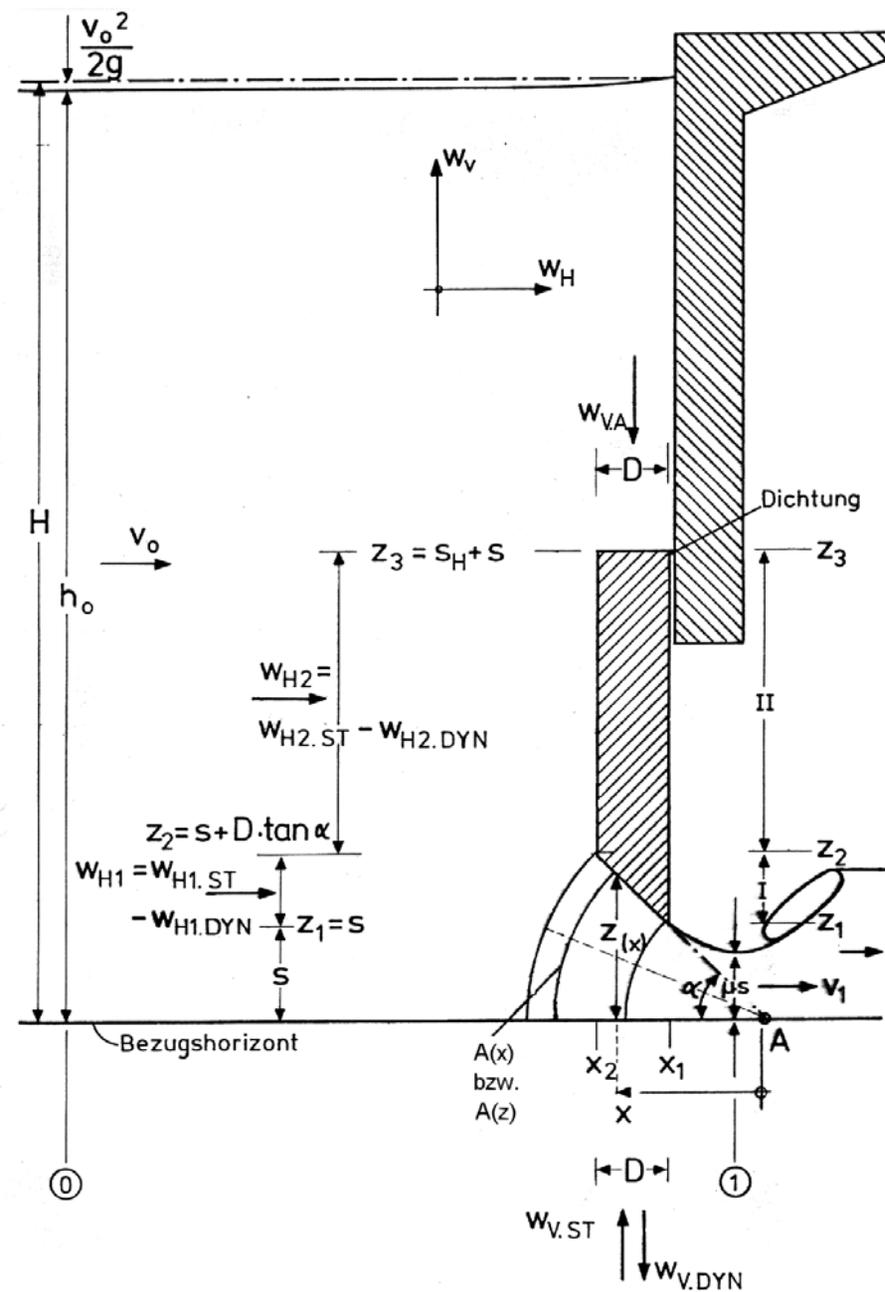
Dichtung UW-seitig.

Antrieb mit Seilwindwerk.

Vielrollenschütz (MAN) Dokan, Irak  
l.W.: 3,14m, l.H.: 6,59m, Druckhöhe: 95,10m.

© Büsching, F.: Stauanlagenbau

2000/06.9



### 3.1 Aufgabenstellung:

Ermittlung der hydraulischen Belastung aus den an der Wandung (= in der Randstromlinie !) herrschenden hydrodynamischen Druckverhältnissen für das Öffnungsverhältnis  $s/s_0 = 25\%$ .

#### 3.1.1. Randbedingungen:

$H = h_0 = 50\text{m}$

Breite OW-seitig  $B_0 = 200\text{m}$

I. Öffnungsweite  $B = 5,0\text{m}$

I. Öffnungshöhe  $s_0 = s_H = 5,0\text{m}$

Bauhöhe des Schützes  $D = 1,0\text{m}$ .

Rückstaufreier Abfluss mit

Einschnürungsbeiwert  $\mu = 0,6$ ;

$g = 9,81\text{m/s}^2$ ;  $\rho = 1\text{t/m}^3$ .

$n = B_0/B = 40$



## Weitere Festwerte:

Neigung der keilförmigen Schützunterkante  $\alpha = 60^\circ$

$$\sin \alpha = 0,866; \sin^2 \alpha = 0,750;$$

$$\cos \alpha = 0,5; \cos^2 \alpha = 0,25; \tan \alpha = 1,732$$

$$c = \frac{\alpha}{360} \cdot 2 \cdot \pi = 1,047; c^2 = 1,097$$

Vertikale Stauwand  $\beta = 90^\circ$

$$d = \frac{\beta}{360} \cdot 2 \cdot \pi = 1,571; d^2 = 2,467$$

Schützkoordinaten:

$$x_1 = 0,722\text{m}$$

$$x_2 = 1,722\text{m}$$

$$z_1 = s = 1,25\text{m}$$

$$z_2 = 1,25 + 1,732 = 2,982\text{m}$$

$$z_3 = 1,25 + 5,0 = 6,250\text{m}$$



### 3.1.2 Durchfluss

Voraussetzung für die Lösung ist die Kenntnis des Durchflusses, vergl. Hydromechanik ....., „Abfluss Q unter einem Schütz“.

Der Energiesatz

$$h_0 + \frac{v_0^2}{2g} = \mu \cdot s + \frac{v_1^2}{2g} \quad (2)$$

liefert:

$$Q(s) = \mu \cdot s \cdot B \cdot v_1 = \mu \cdot s \cdot B \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h_0^2 \cdot n^2 \cdot (\mu \cdot s - h_0)}{\mu^2 \cdot s^2 - h_0^2 \cdot n^2}} \quad (8)$$

$$Q(s = 1,25m) = 0,6 \cdot 1,25 \cdot 5,0 \cdot \sqrt{966,46} = 116,58m^3 / s$$

$$Q(s = 2,5m) = 233,58m^3 / s$$

Die Berechnung wird nachfolgend für vertikale und horizontale Belastungskomponenten *getrennt* durchgeführt.

Die Kontinuitätsgleichung lautet :

$$B_o \cdot h_o \cdot v_o = \mu \cdot s \cdot B \cdot v_1 \quad (3)$$

$$v_o = \frac{\mu \cdot s \cdot B}{h_o \cdot B_o} \cdot v_1 \quad (4)$$

eingesetzt in (2) ergibt :

$$H = h_o + \frac{\mu^2 \cdot s^2 \cdot B^2}{h_o^2 \cdot B_o^2 \cdot 2g} \cdot v_1^2 = \mu \cdot s + \frac{v_1^2}{2g} \quad (5)$$

$$\frac{v_1^2}{2g} \left( \frac{\mu^2 \cdot s^2 \cdot B^2}{h_o^2 \cdot B_o^2} - 1 \right) = \mu \cdot s - h_o \quad (6)$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2g(\mu s - h_o) h_o^2 \cdot B_o^2}{\mu^2 \cdot s^2 \cdot B^2 - h_o^2 B_o^2}} \quad (7)$$

mit  $B_o = n \cdot B$  wird



### 3.1.3 Vertikale Belastungskomponenten

#### 3.1.3.1 Belastung an der geneigten Schützunterkante

In der keilförmigen Auslassöffnung sind die Stromlinien näherungsweise Geraden durch den Punkt A und die Potentiallinien Kreise um diesen. Der Energiesatz bezüglich der Randstromlinie lautet in Abhängigkeit von der Koordinate  $x$ :

$$H = z(x) + \frac{p(x)}{\gamma} + \frac{v^2(x)}{2g} \quad (09)$$

Die Druckspannung wird  $p(x) = \gamma \cdot \left( H - z(x) - \frac{v^2(x)}{2g} \right)$  (10)

Darin sind:  $z(x) = x \cdot \tan \alpha$  und (11)

$v(x) = \frac{Q}{A(x)}$  mit der durchströmten Kreissegmentfläche (12)

$$A(x) = B \cdot \frac{\alpha}{360} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{x}{\cos \alpha} = \frac{B \cdot c \cdot x}{\cos \alpha} \quad (13)$$

$$p(x) = \gamma \cdot \left( H - x \cdot \tan \alpha - \frac{Q^2 \cdot \cos^2 \alpha}{B^2 \cdot c^2} \cdot \frac{1}{2g} \cdot \frac{1}{x^2} \right) \quad (14)$$

Die Integration liefert eine Kraft in vertikaler Richtung : (15)

$$W_{V(x)} = \rho \cdot g \cdot B \left[ H \cdot x - \frac{x^2}{2} \tan \alpha \right]_{x_1}^{x_2} + \rho \cdot g \cdot B \cdot \left[ \frac{Q^2 \cdot \cos^2 \alpha}{B^2 \cdot c^2} \cdot \frac{1}{2g} \frac{1}{x} \right]_{x_1}^{x_2} \quad (15)$$

Mit den gegebenen Zahlenwerten lauten die Ausdrücke (14) und (15) :

$$p_{(x)} = 1 \cdot 9,81 \left[ 50 - 1,732 x - \frac{116,582^2 \cdot 0,25}{5^2 \cdot 1,097 \cdot 19,62} \cdot \frac{1}{x^2} \right]$$

$$\underline{p_{(x)} = 490,5 - 16,991 x - 61,950 x^{-2} \text{ kN/m}^2}$$

Hydrostatischer Belastungsanteil :

$$W_{V.ST} = 9,81 \cdot 5 \cdot \left[ 50 x - 0,866 x^2 \right]_{0,722}^{1,722} = 49,05 [83,532 - 36,649]$$

$$\underline{W_{V.ST} = + 2348,68 \text{ kN}}$$

Hydrodynamischer Belastungsanteil :

$$W_{V.DYN} = 9,81 \cdot 5 \left[ 6,315 x^{-1} \right]_{0,722}^{1,722} = 49,05 [3,667 - 8,746]$$

$$\underline{W_{V.DYN} = - 249,14 \text{ kN}}$$

## 3.1.3.2 Wasserauflast auf das Schützoberteil



Es kann angenommen werden, daß hier nur der hydrostatische Wasserdruck wirkt.

$$W_{V.A} = \rho \cdot g \cdot B \cdot D \cdot (H - S_H - s) = 9,81 \cdot 5 \cdot 1 \cdot (50 - 5 - 1,25) \quad (16)$$

$$W_{V.A} = 49,05 \cdot 43,75 = - 2145,94 \text{ kN}$$

## 3.1.3.3 Bilanz der hydraulischen Vertikalkräfte

$$W_V = W_{V.ST} + W_{V.DYN} + W_{V.A} \quad (17)$$

$$= 2348,68 - 249,14 - 2145,94 = \underline{- 46,60 \text{ kN}}$$

## 3.1.3.4 Überprüfung der hydrostatischen Gesamtkraft

$$W_{V.ST} - W_{V.A} = 2348,68 - 2145,94 = \underline{202,74 \text{ kN}}$$

= hydraulischer Auftrieb A

$$A = \rho \cdot g \cdot V = \rho \cdot g \cdot D \cdot B \left( S_H - \frac{z_2 - z_1}{2} \right) \quad (18)$$

$$A = 1 \cdot 9,81 \cdot 1 \cdot 5 \left( 5 - \frac{2,982 - 1,25}{2} \right) = \underline{202,78 \text{ kN}}$$



### 3.1.4 Berechnung der horizontalen Belastungskomponenten

#### 3.1.4.1 Belastung der geneigten Schützunterkante

im Bereich I :  $z_1 \leq z \leq z_2$

Für den Verlauf von Strom- und Potentiallinien gilt dieselbe Annahme wie unter 3.1.3.1

Der Energiesatz in bezug auf die Randstromlinie muß jetzt als Funktion der z-Koordinate ausgedrückt werden :

$$H = z + \frac{p(z)}{\rho g} + \frac{v(z)^2}{2g} \quad (19)$$



Die Rechnungsentwicklung entspricht derjenigen nach 3.1.3.1

$$p(z) = \xi \cdot g \left[ H - z - \frac{v(z)^2}{2g} \right] \quad \text{mit} \quad (20)$$

$$v(z) = \frac{Q}{A(z)} \quad \text{und} \quad (21)$$

$$A(z) = B \cdot \frac{\alpha^\circ}{360^\circ} \cdot 2\pi \cdot \frac{z}{\sin \alpha} = \frac{B \cdot c \cdot z}{\sin \alpha} \quad (22)$$

$$p(z) = \underbrace{\xi \cdot g \cdot [H - z]}_{\text{hydrostat. Anteil}} - \underbrace{\frac{Q^2 \cdot \sin^2 \alpha}{B^2 \cdot c^2 \cdot 2g} \cdot \frac{1}{z^2}}_{\text{hydrodynm. Abminderung}} \quad (23)$$

Die Integration liefert eine Kraft in horizontaler Richtung :

$$W_{H.1}(z) = \xi \cdot g \cdot B \left[ H \cdot z - \frac{z^2}{2} \right]_{z_1}^{z_2} + \xi \cdot g \cdot B \cdot \left[ \frac{Q^2 \cdot \sin^2 \alpha}{B^2 \cdot c^2 \cdot 2g} \cdot \frac{1}{z} \right]_{z_1}^{z_2} \quad (24)$$

Mit den gegebenen Werten lauten die Ausdrücke (23) und (24) :

$$p(z) = 1 \cdot 9,81 \cdot \left[ 50 - z - \frac{116,582^2 \cdot 0,75}{25 \cdot 1,097 \cdot 19,62} \cdot \frac{1}{z^2} \right]$$
$$= 9,81 [ 50 - z - 18,944 z^{-2} ]$$

$$\underline{p(z) = 490,5 - 9,81 z - 185,843 z^{-2} \text{ kN/m}^2}$$

Hydrostatischer Belastungsanteil :

$$W_{HI.ST} = 1 \cdot 9,81 \cdot 5 \left[ 50 \cdot z - 0,5 z^2 \right]_{1,25}^{2,982} = 49,05 [ 144,654 - 61,719 ]$$

$$\underline{W_{HI.ST} = + 4\,067,974 \text{ kN}}$$

Hydrodynamischer Belastungsanteil :

$$W_{HI.DYN} = 1 \cdot 9,81 \cdot 5 \left[ 18,944 \cdot z^{-1} \right]_{1,25}^{2,982} = 49,05 [ 6,353 - 15,155 ]$$

$$\underline{W_{HI.DYN} = - 431,76 \text{ kN}}$$

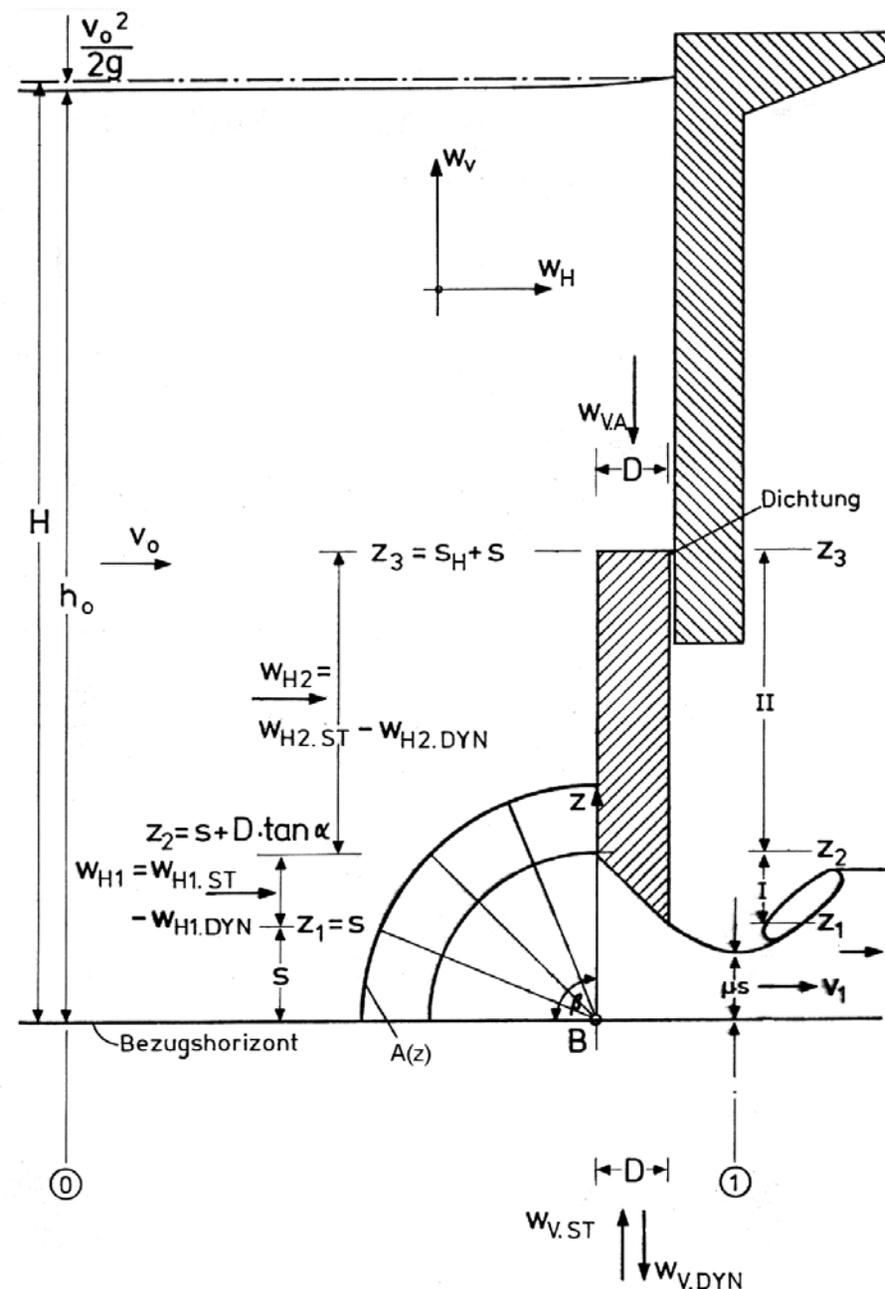


### 3.1.4.2 Belastung der vertikalen Stauwand

Bereich II:  $z_2 \leq z \leq z_3$

Annahme: Die Stromlinien verlaufen durch den Punkt B und die Potentiallinien sind Kreise um diesen.

Der Energiesatz bezüglich der vertikalen Randstromlinie als Funktion der vertikalen z-Koordinate lautet wie unter 3.1.4.1:





### 3.1.4.2

#### Belastung der vertikalen Stauwand

im Bereich II :  $z_2 \leq z \leq z_3$

#### Annahme :

Die Stromlinien verlaufen näherungsweise durch den Punkt B und die Potentiallinien sind näherungsweise Kreise um Punkt B.

Der Energiesatz bezüglich der vertikalen Randstromlinie als Funktion der vertikalen z-Koordinate lautet wie unter **3.1.4.1**

$$H = z + \frac{p(z)}{\rho g} + \frac{v(z)^2}{2g} \quad (19)$$

$$p(z) = \rho \cdot g \cdot \left[ H - z - \frac{v(z)^2}{2g} \right] \quad \text{mit} \quad (20)$$

$$v(z) = \frac{Q}{A(z)} \quad (21)$$

jedoch mit einer gegenüber III.1 und IV. 1 veränderten durchströmten Kreissegmentfläche :

$$A(z) = B \cdot \frac{\beta}{360} \cdot 2 \pi \cdot z = B \cdot d \cdot z \quad (24)$$

Für  $\beta = 90^\circ$  ist  $d = \frac{90}{360} \cdot 2 \cdot \pi = \frac{\pi}{2} = 1,571$

$$p(z) = \underbrace{\rho \cdot g \cdot [H - z]}_{\text{hydrostat. Anteil}} - \underbrace{\frac{Q^2}{B^2 \cdot d^2 \cdot 2g} \cdot \frac{1}{z}}_{\text{hydrodynamische Abminderung}} \quad (25)$$

Die Integration liefert :

$$W_{H,2}(z) = \rho \cdot g \cdot B \left[ H \cdot z - \frac{z^2}{2} \right]_{z_2}^{z_3} + \rho \cdot g \cdot B \left[ \frac{Q^2}{B^2 \cdot d^2 \cdot 2g} \frac{1}{z} \right]_{z_2}^{z_3} \quad (26)$$

Mit den gegebenen Werten lauten die Ausdrücke (25) und (26) :

$$p(z) = 1 \cdot 9,81 \left[ 50 - z - \frac{116,582^2}{25 \cdot 2,468 \cdot 19,62} \cdot \frac{1}{z} \right]$$

$$p(z) = 9,81 [50 - z - 11,227 z^{-2}]$$

$$\underline{p(z) = 490,5 - 9,81 z - 110,139 z^{-2} \text{ kN/m}^2}$$

Hydrostatischer Belastungsanteil :

$$W_{H2.ST} = 1 \cdot 9,81 \cdot 5 \left[ 50 z - 0,5 z^2 \right]_{2,982}^{6,25} = 49,05 [292,969 - 144,654]$$

$$\underline{W_{H2.ST} = + 7.274,859 \text{ kN}}$$

Hydrodynamischer Belastungsanteil :

$$W_{H2.DYN} = 1 \cdot 9,81 \cdot 5 \left[ 11,227 z^{-1} \right]_{2,982}^{6,25} = 49,05 [1,796 - 3.765]$$

$$\underline{W_{H2.DYN} = - 96,58 \text{ kN}}$$



### 3.1.4.3

#### Überprüfung des hydrostatischen Kraftanteiles :

Im Bereich I für  $z_1 \leq z \leq z_2$  :

$$\begin{aligned} W_{H1.ST} &= \rho \cdot g \cdot B \cdot \frac{(H - z_1) + (H - z_2)}{2} \cdot (z_2 - z_1) \\ &= 1 \cdot 9,81 \cdot 5 \cdot \frac{(50 - 1,25) + (50 - 2,982)}{2} \cdot (2,982 - 1,25) \\ &= \underline{4.067,97 \text{ kN}} \end{aligned}$$

im Bereich II für  $z_2 \leq z \leq z_3$  :

$$\begin{aligned} W_{H2.ST} &= \rho \cdot g \cdot B \cdot \frac{(H - z_2) + (H - z_3)}{2} \cdot (z_3 - z_2) \\ &= 1 \cdot 9,81 \cdot 5 \cdot \frac{(50 - 2,982) + (50 - 6,25)}{2} \cdot (6,25 - 2,982) \\ &= \underline{7.274,85 \text{ kN}} \end{aligned}$$



### 3.1.4.1

#### Bilanz der hydraulischen Horizontalkräfte

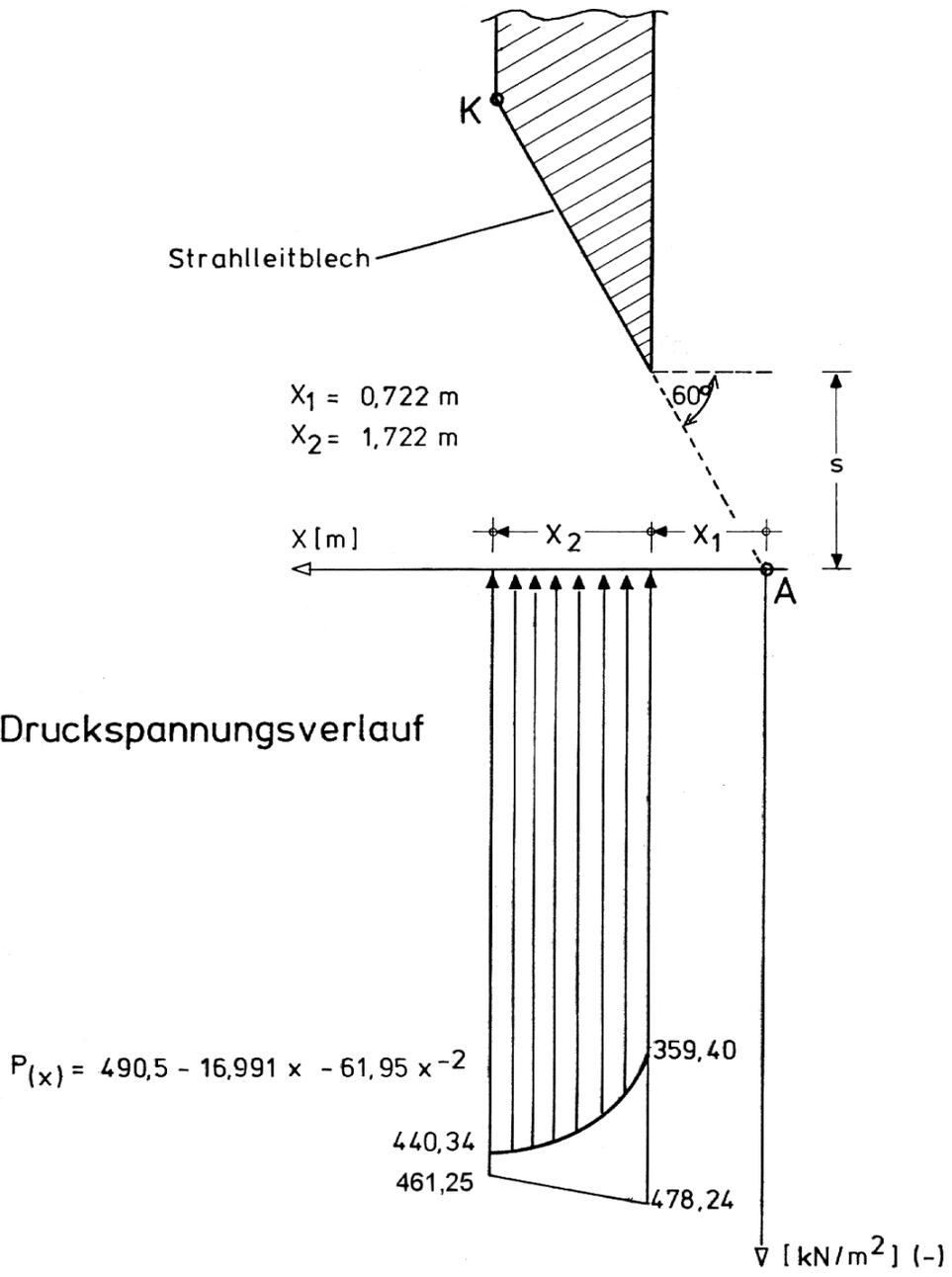
$$W_H = W_{H1.ST} + W_{H1.DYN} + W_{H2.ST} + W_{H2.DYN}$$

$$W_H = + 4.067,97 - 431,76 + 7.274,86 - 96,58$$

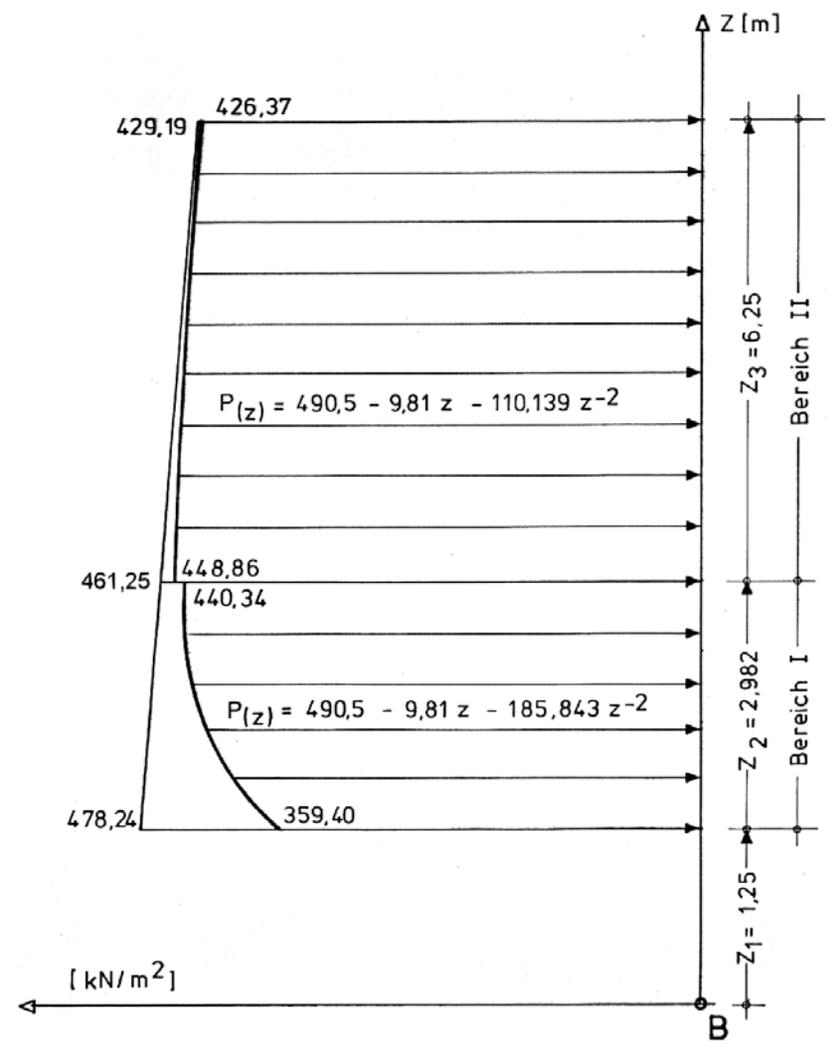
$$\underline{W_H = + 10814,494 \text{ kN}}$$

Anmerkung: Die nachfolgend dargestellten Druckspannungsverläufe sind fehlerhaft

- a). am Knickpunkt K des Strahlleitbleches, weil hier die Stromfadenkrümmung nicht korrekt erfasst wird und
- b). an der Schützunterkante, wo der Druck auf den barometrischen Luftdruck abfallen müsste.



Horizontale hydraulische Schützbelastung  
Druckspannungsverlauf (rechnerisch)



# Resultierende hydraulische Vertikalkraft

$$W_V = W_{V_{St}} + W_{V_{Dyn}} + W_{V_A}$$

