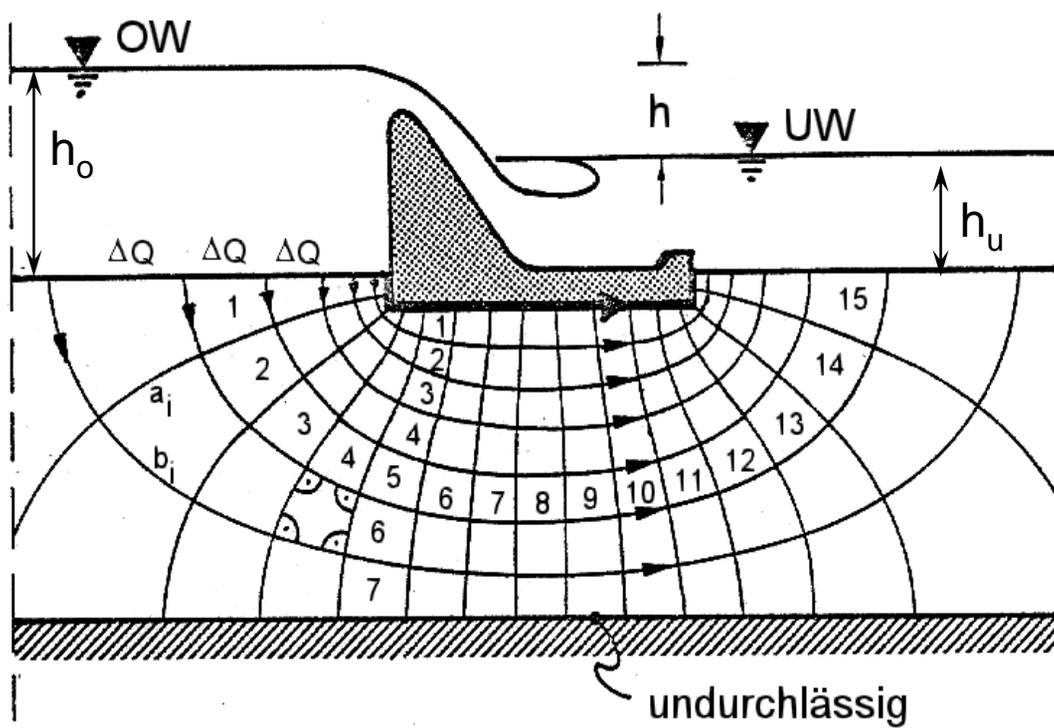




# Hydrodynamische Druckspannungen infolge von Bauwerks- untersickerungen



Bei Sickerströmungen sind die Potentiallinien Linien gleichen Druckes. Ist an einem beliebigen Punkt in einem Feld der Sickerströmung  $ds$  eine Länge in Strömungsrichtung, für die der Druckunterschied  $dh$  gilt, ergibt sich die Filtergeschwindigkeit nach DARCY zu:

$$v = k_f \cdot \frac{dh}{ds}$$

$$v = \frac{d\varphi}{ds}$$

$$k_f \cdot h = \varphi + C$$

In der Potentialtheorie ist :  
Aus Gleichsetzung und  
Integration folgt somit:



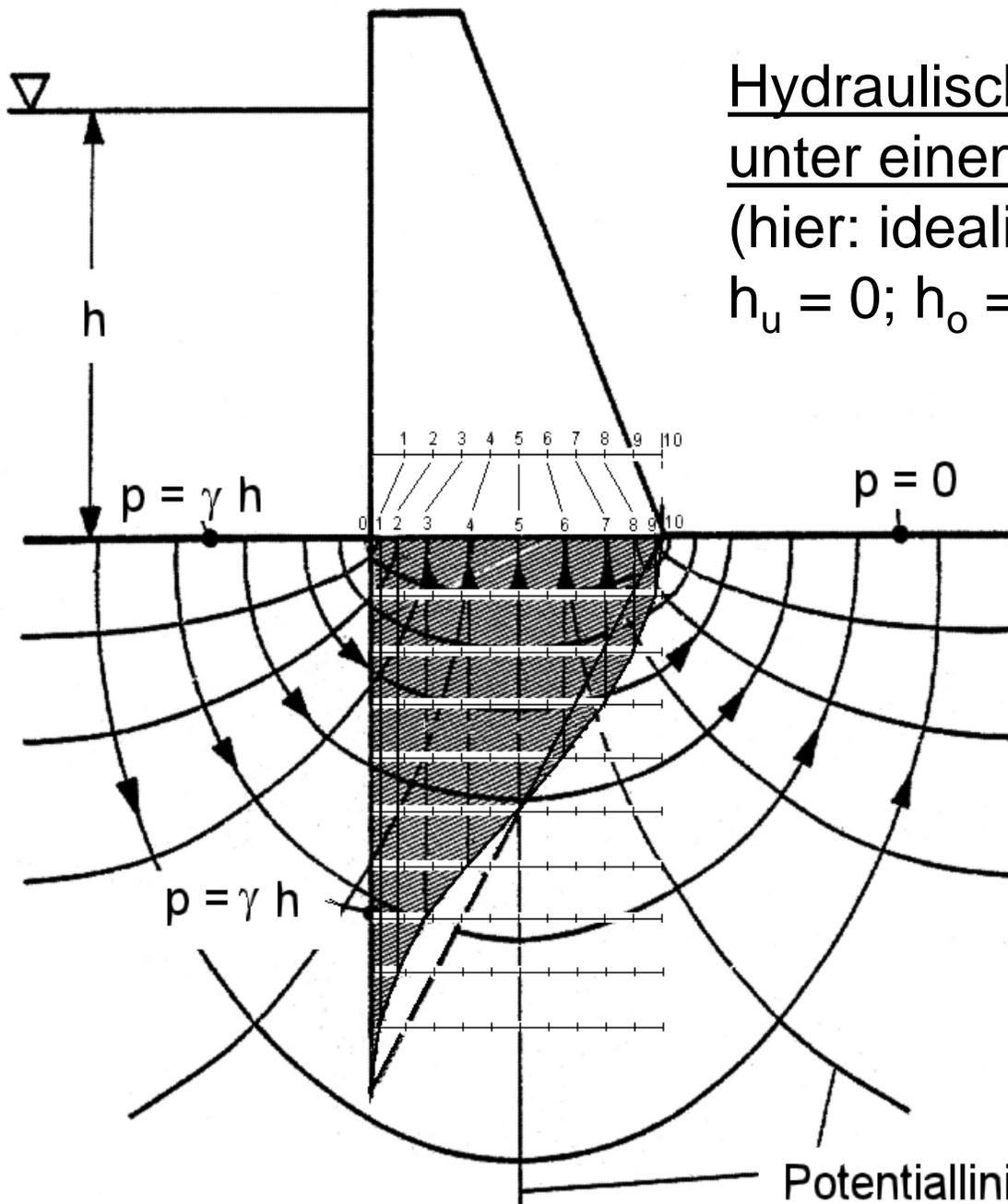
Die Linien gleichen Potentials  $\varphi$  sind zugleich Linien gleichen Druckes  $h$ :

Bei Sickerströmungen sind die Äquipotentiallinien Linien gleichen Druckes

Bei der Untersickerung von Staubaauwerken ist eine singuläre (erste) Potentiallinie die Sohle vor dem Bauwerk (OW-seitig) mit der Druckhöhe  $h_o$  und eine zweite die Oberfläche des Bodens unterhalb (UW-seitig) des Staubaauwerkes mit der Druckhöhe  $h_u$ . Dazwischen *verteilt sich der Druck linear* auf die Potentiallinien.

Das resultierende hydraulische Druckfeld unter einem Bauwerk (*Sohlwasserdruck*) ergibt sich demnach aus der Überlagerung aus

- einem hydrostatischen Druckfeld infolge der Wirkung des Unterwassers (*UW-Druck*) und
- einem dynamischen Strömungsdruckfeld infolge unterschiedlicher Druckpotentiale an der Sohle des OW und des UW (*Sickerwasserdruck*)



# Hydraulische Druckspannungen unter einem Staubauwerk

(hier: idealisiertes Bauwerk ohne UW  
 $h_u = 0$ ;  $h_o = h$ , nur Sickerwasserdruck)

Infolge des Sickervorganges weicht die tatsächliche Druckspannungsverteilung von der hydrostatischen ab.

Zur Ermittlung der Druckspannungsverteilung unter dem Bauwerk ist die Kenntnis der Potentiallinienabstände am Bauwerk ausreichend.

Potentiallinien = Linien gleichen



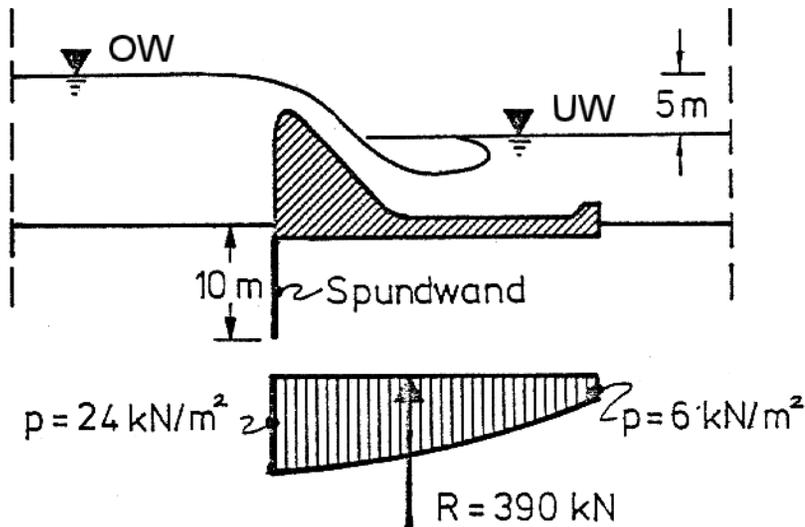
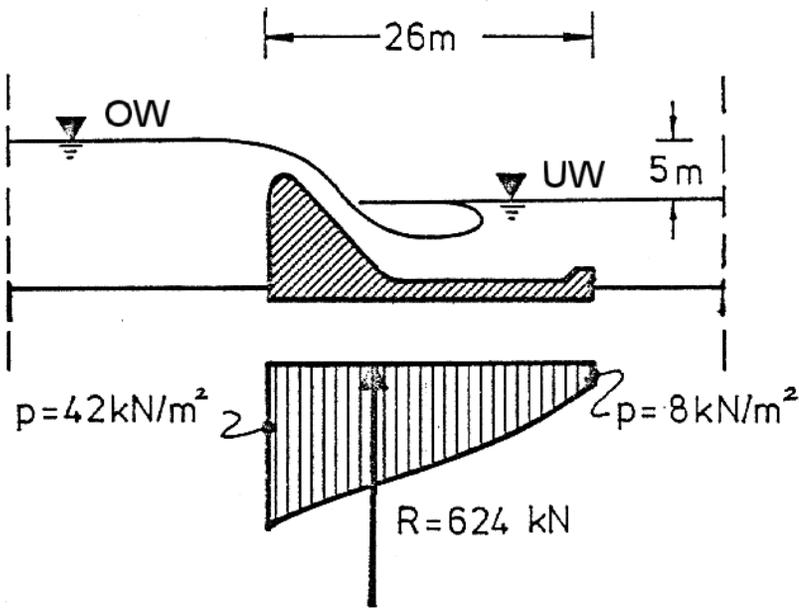
Das auf die Potentiallinien zu verteilende Druckspannungspotential ist  $p = \gamma \cdot h$ . Bei  $n$  Potentiallinienabständen ändert sich der Druck von Potentiallinie zu Potentiallinie um:

$$\Delta p = \frac{p}{n} = \frac{\gamma \cdot h}{n} \quad (\text{Potentialabfall})$$

Hier ergibt sich für  $n = 10$  mit  $\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$  und  $h = 5\text{m}$

$$\Delta p = \frac{10 \cdot 5}{10} = 5 \text{ kN/m}^2$$

Die sich aus der Integration der in 08.03 dargestellten Druckspannungsfigur ergebende nach oben gerichtete hydraulische Kraft wird sich dem Betrage nach nur unwesentlich von der hydrostatischen Kraft (Dreieck) unterscheiden. Im Sinne der Kippsicherheit des Bauwerkes ist aber von Bedeutung, dass ihr Angriffspunkt gegenüber demjenigen der hydrostatischen nach UW verlagert ist. Anders als die Sickerwassermenge ist die Kraft vom  $K_f$ - Wert unabhängig !



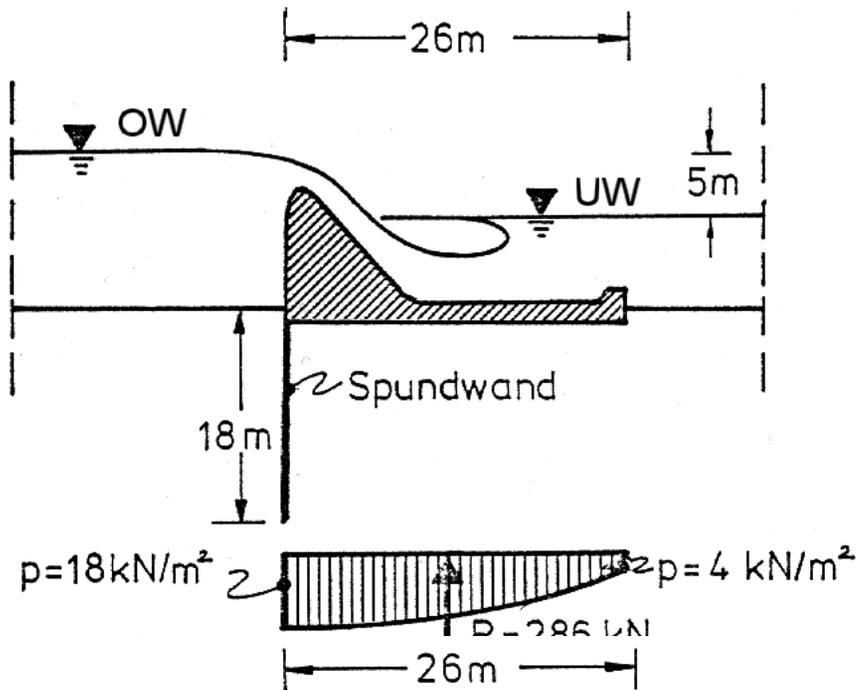
## Möglichkeiten zur Beeinflussung des Sickerwasserdruckes

Die nachfolgend dargestellten Druckspannungsverteilungen beinhalten nicht den Druck des Unterwassers !

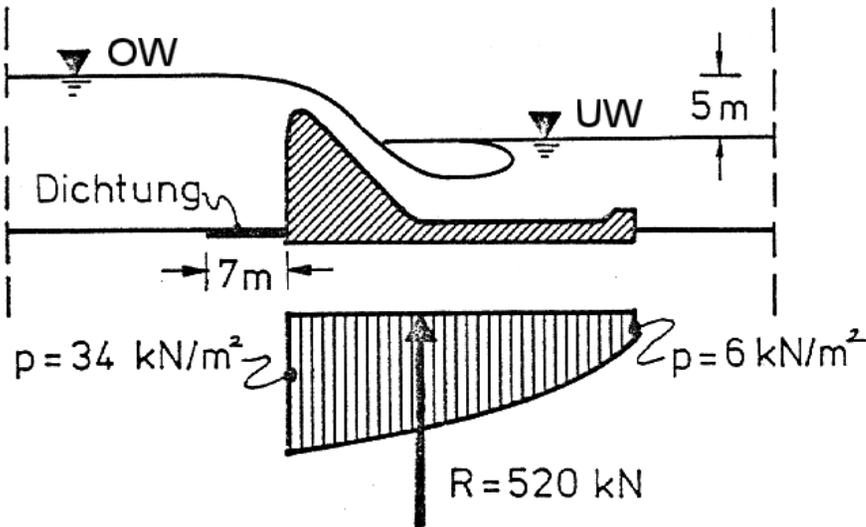
Die angegebenen *Kräfte* sind Näherungswerte, die unter Verwendung der Trapezformel erhalten wurden.

%-Angaben beziehen sich auf die Ursprungsconfiguration.

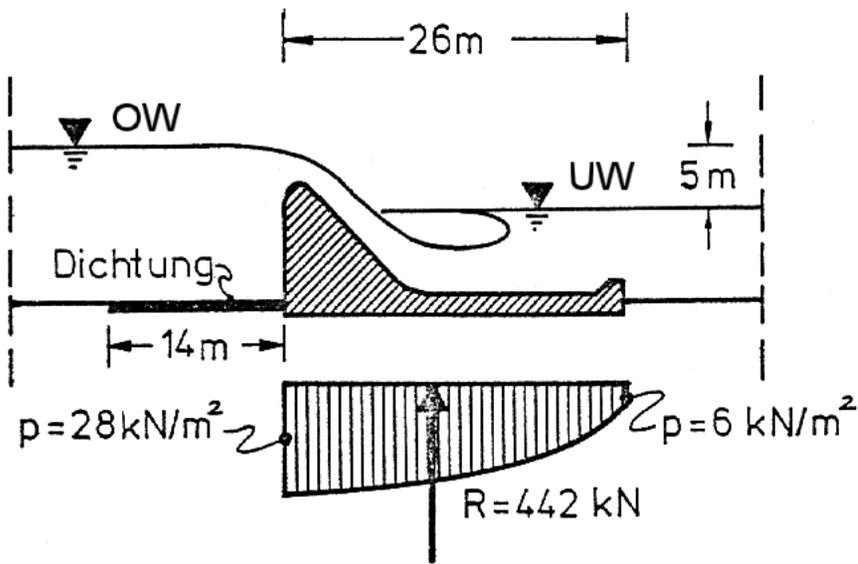
Eine relativ kurze OW-Spundwand reduziert die Druckkraft *merklich*; hier: -37,5%



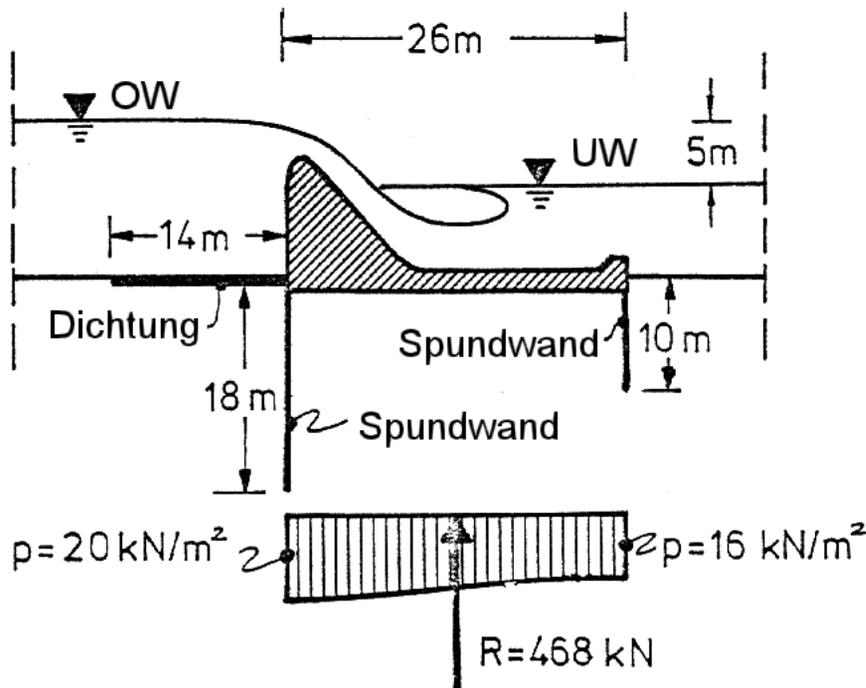
Eine lange Spundwand reduziert die Druckkraft *beträchtlich*; hier: -54,2%



Eine kurzer Vorboden reduziert die Druckkraft *eher gering*; hier: -16,3%



Ein breiter Vorboden reduziert die Druckkraft geringer als eine kurze Spundwand;  
hier: -29,8%



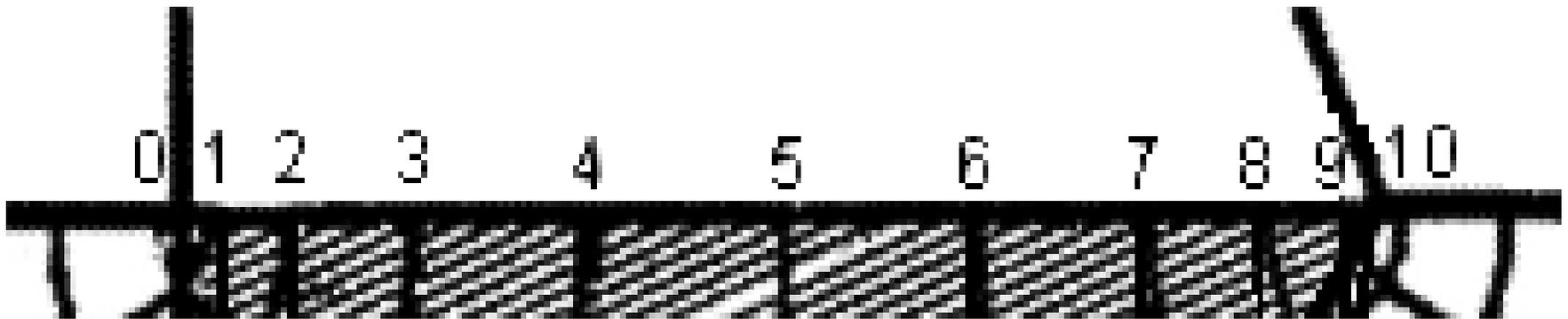
Auch eine nur kurze *UW-Spundwand* bewirkt tendenziell eine *Zunahme* der Druckkraft.  
Die Anordnung eines breiten Vorbodens zusätzlich zu einer langen Spundwand bringt kaum Vorteile.  
hier: - 25%



# Sicker-geschwindigkeit unter einem Staubauwerk

Die Gründungsfuge des Bauwerkes von 08.3 ist etwa im Maßstab 1 : 200 dargestellt. Die Potentiallinien haben die Abstände [m]:

1,2	3,6	6,0	6,0	3,6	1,2	m
2,0	5,2	5,2	2,0	m		



Durchlässigkeit  $k_f = 10^{-4}$  m/s.

Die Entwicklung der Sicker-geschwindigkeit nach DARCY unter dem Bauwerk wird nachfolgend tabellarisch ermittelt.

Der Potentialabfall zwischen den Potentiallinien beträgt bei  $n = 10$  Potentialabständen:

$$\Delta h = \frac{h}{n} = \frac{50m}{10} = 5m$$



1	2	3	4	5	6
Nr.	Abst.	Sicker-	Pot. Diff.	Gefälle I	Geschwindigkeit
n	[m]	weg [m]	[m]	[-]	$v_f$ [m/s]
0		0			
	1,2				
1		1,2	5,0	4,166667	0,000417
	2,0				
2		3,2	10,0	3,125000	0,000313
	3,6				
3		6,8	15,0	2,205882	0,000221
	5,2				
4		12,0	20,0	1,666667	0,000167
	6,0				
5		18,0	25,0	1,388889	0,000139
	6,0				
6		24,0	30,0	1,250000	0,000125
	5,2				
7		29,2	35,0	1,198630	0,000120
	3,6				
8		32,8	40,0	1,219512	0,000122
	2,0				
9		34,8	45,0	1,293103	0,000129
	1,2				
10		36,0	50,0	1,388889	0,000139

Minimum !

Die Potentialdifferenz in Spalte 4 ist:  $h - (h - n \cdot \Delta h)$



## Anmerkungen:

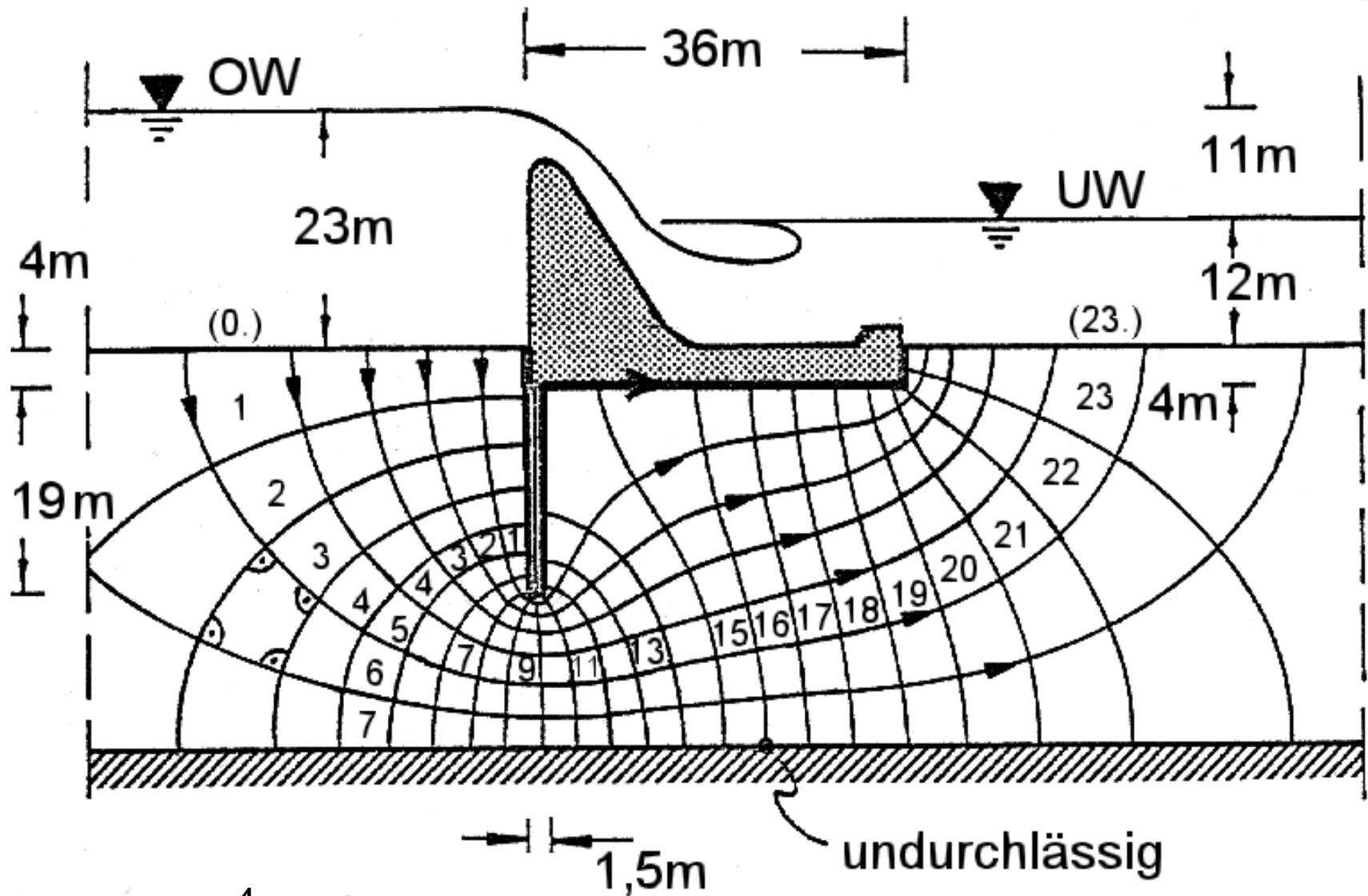
Obwohl die Potentiallinienabstände zur vertikalen Bauwerksachse symmetrisch sind, ist die Geschwindigkeitsverteilung *bei der hier gewählten* Anwendung der Darcy-Formel unsymmetrisch.

In Übereinstimmung mit der *relativ* zur hydrostatischen Druckspannungsverteilung veränderten hydrodynamischen Druckspannungsverteilung, vergl. 08.3, tritt in diesem Falle eine minimale Geschwindigkeit bei der 7. Potentiallinie auf.

Die anschließend wiederum abnehmenden Potentiallinienabstände bewirken eine erneute Zunahme der Geschwindigkeit zur UW-Kante hin.

Obwohl die Austrittsgeschwindigkeit an der UW-Seite des Bauwerks klein erscheint, ist die Standsicherheit des Bauwerks wegen des großen Gefälles gefährdet, vergl. hydraul. Grundbruch !

# Aufgabe



$$k_f = 10^{-4} \text{ m/s}$$

Die Bauwerksgeometrie, Wasserstandsverhältnisse sowie das Potentialnetz sind bekannt.

1. Zur Vermaßung der Auftreffpunkte an der Bauwerkskontur wird der Maßstab aus bekannten Bauwerksabmessungen ermittelt, der UW-Spiegel als horizontale und die Bauwerksvorderkante (OW) als vertikale Achse gewählt.
2. Die Berechnung erfolgt tabellarisch mit folgenden Spalten:  
Nr. der Pot.-Linie (hier: 0 bis 23)

x-Koordinate

$\Delta x$

z-Koordinate

$\Delta z$

UW-Druck

Sickerwasserdruck

Gesamtdruck (Sohlwasserdruck = UW- & Sickerwasserdruck)

Teilkräfte  $F_x$

Teilkräfte  $F_z$



Druckspannungspotential:

$\rho = \Delta h \cdot \rho \cdot g$

$h_o = 23 \text{ m}$

$h_u = 12 \text{ m}$

$\Delta h = h_o - h_u = 11 \text{ m}$

$\rho = 107,91 \text{ kN/m}^2$

Potentialabfall:

mit  $n = 23$

$\Delta p = (\rho/n) = 4,692$

i	z [m]	UW-Druck [kN/m <sup>2</sup> ] z*ρ*g	Sickerwas- serdruck ρ-Δp*i	Sohlerwas- serdruck UW+Sickerdr.
0	12,0	117,72	107,91	225,63
1	16,5	161,87	103,22	265,08
2	21,0	206,01	98,53	304,54
3	25,0	245,25	93,83	339,08
4	28,5	279,59	89,14	368,73
5	31,0	304,11	84,45	388,56
6	33,0	323,73	79,76	409,49



5	31,0	304,11	84,45	388,56
6	33,0	323,73	79,76	403,49
7	34,5	338,45	75,07	413,51
8	35,0	343,35	70,38	413,73
9	35,0	343,35	65,68	409,03
10	35,0	343,35	60,99	404,34
11	34,5	338,45	56,30	394,75
12	32,0	313,92	51,61	365,53
13	23,0	225,63	46,92	272,55
14	16,0	156,96	42,23	199,19
15	16,0	156,96	37,53	194,49
16	16,0	156,96	32,84	189,80
17	16,0	156,96	28,15	185,11
18	16,0	156,96	23,46	180,42
19	16,0	156,96	18,77	175,73
20	16,0	156,96	14,08	171,04
21	16,0	156,96	9,38	166,34
22	14,5	142,25	4,69	146,94
23	12,0	117,72	0,00	117,72



### 3. Sickergeschwindigkeit $v_{f0}$ am Fuße der Schmalwand und darunter bis zur undurchlässigen Schicht

Der Sickerweg (an der Schmalwand) bis zur 9. Potentiallinie ist:  
 $s = 35,5 - 12,0 = 23,5\text{m}$ .

Der Potentialabfall ist  $\Delta h = \frac{h}{n} = \frac{11}{23} = 0,478\text{m}$

Das Gefälle bis zur 9. Potentiallinie ist  $i = \frac{9 \cdot \Delta h}{s} = \frac{9 \cdot 0,478}{23,5} = 0,183$

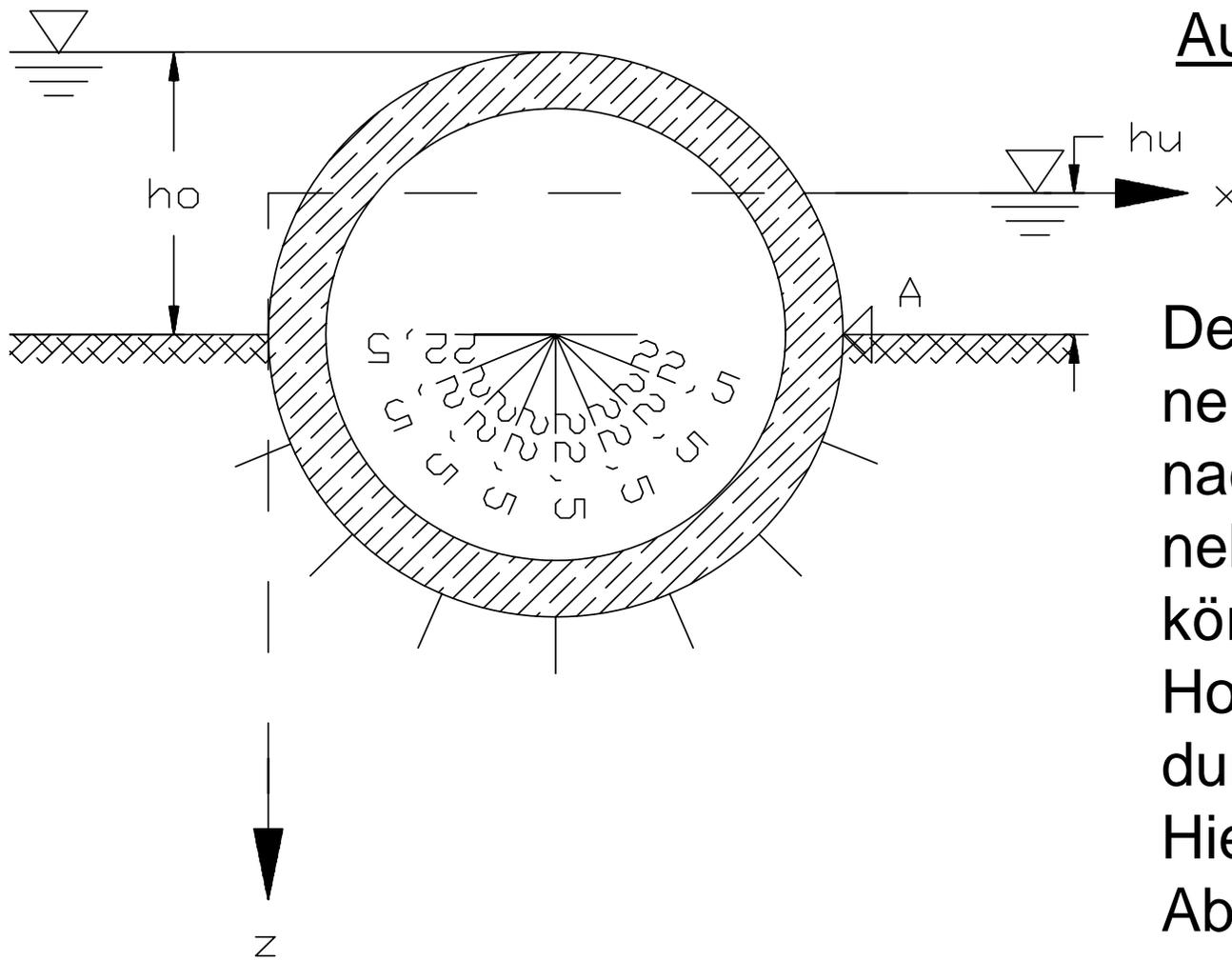
Sickergeschwindigkeit  $v_{f0} = k_f \cdot i = 10^{-4} \cdot 0,183 = 1,83 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ .

Die Verteilung der Sickergeschwindigkeit entlang der 9. Potentiallinie erfolgt tabellarisch.

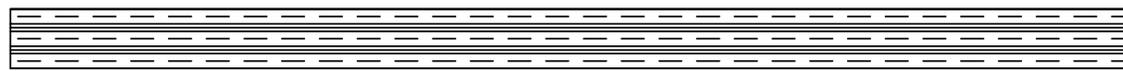
Stromlinie Nr. m	z - Koordinate [m]	Stromlinien- abstand a[m]	Geschwindigkeit v <sub>m</sub> [m/s]
0	35,00	1,00	1,830E-05
		1,00	1,830E-05
1	36,00		
		1,00	1,830E-05
2	37,00		
		1,50	1,220E-05
3	38,50		
		2,50	7,320E-06
4	40,50		
		3,00	6,100E-06
5	43,50		
		3,00	6,100E-06
6	46,50		
		3,00	6,100E-06
7	49,50		

© Büsching, F.: Stauanlagenbau  $v_m = \frac{v_{f0} \cdot a_0}{a_m}$  2000/08.16

# Aufgabe



Der oben angegebene Rechengang ist nachfolgend für den nebenstehenden Wehrkörper, der aus einem Hohlzylinder besteht, durchgeführt worden. Hierfür sind gleiche Abstände der Auftreffpunkte der Potentiallinien am Bauwerk gewählt worden.

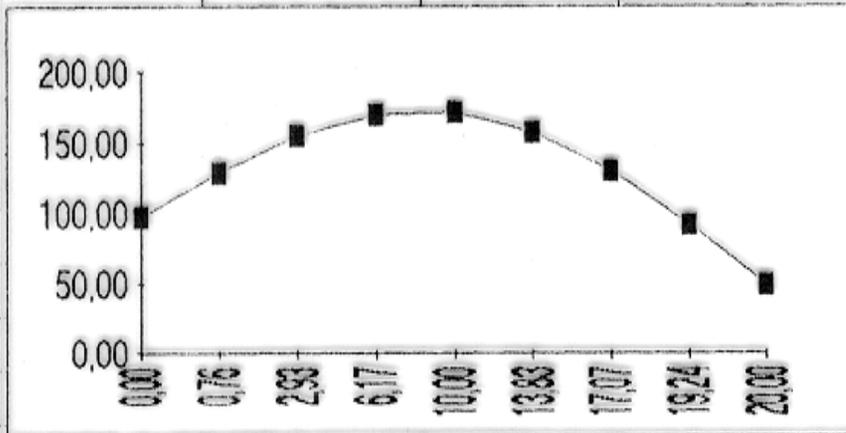




Sohlwasserdruck = UW-Druck + Sickerwasserdruck								
Randbedingungen:								
OW-Tiefe $h_o =$	10,00	m	Dichte	$\rho =$	1	t/m <sup>3</sup>		
UW-Tiefe $h_u =$	5,00	m	Erdbeschl.	$g =$	9,81	m/s <sup>2</sup>		
$h = h_o - h_u =$	5,00	m	Durchlässigk.	$k_f =$	1,00E-04	m/s		
Druckpotential $\rho \cdot g \cdot h$	49,05	kN/m <sup>2</sup>	Potlin.-Abst.	$n =$	8			
Potentialabfall $\rho \cdot g \cdot h / n$	6,13	kN/m <sup>2</sup>						
Geometrie des in den Untergrund einbindenden Bauteils:								
Radius $r =$	10	m						
Winkel:	°Grad	Bogen	sin	cos				
	22,50	0,392699082	0,382683432	0,923879533				
	45,00	0,785398163	0,707106781	0,707106781				
	67,50	1,178097245	0,923879533	0,382683432				
	90,00	1,570796327	1	0				
Nr. der Potentiallinie	x-Koordinate [m]		z-Koordinate [m]		UW-Druck [kN/m <sup>2</sup> ]	Sickerwasserdruck [kN/m <sup>2</sup> ]		Gesamtdruck [kN/m <sup>2</sup> ]
					$\rho \cdot g \cdot z$			
0	0	0,00	$h_u$	5,00	49,05	$49,05 - 6,13 \cdot 0$	49,05	98,10
1	$r \cdot \cos(22,5)$	0,76	$h_u + r \cdot \sin(22,5)$	8,83	86,59	$49,05 - 6,13 \cdot 1$	42,92	129,51
2	$r \cdot \cos(45)$	2,93	$h_u + r \cdot \sin(45)$	12,07	118,42	$49,05 - 6,13 \cdot 2$	36,79	155,20
3	$r \cdot \cos(67,5)$	6,17	$h_u + r \cdot \sin(67,5)$	14,24	139,68	$49,05 - 6,13 \cdot 3$	30,66	170,34
4	$r$	10,00	$h_u + r$	15,00	147,15	$49,05 - 6,13 \cdot 4$	24,53	171,68
5	$r + r \cdot \cos(67,5)$	13,83	$h_u + r \cdot \sin(67,5)$	14,24	139,68	$49,05 - 6,13 \cdot 5$	18,39	158,08
6	$r + r \cdot \cos(45)$	17,07	$h_u + r \cdot \sin(45)$	12,07	118,42	$49,05 - 6,13 \cdot 6$	12,26	130,68
7	$r + r \cdot \cos(22,5)$	19,24	$h_u + r \cdot \sin(22,5)$	8,83	86,59	$49,05 - 6,13 \cdot 7$	6,13	92,72
8	$2 \cdot r$	20,00	$h_u$	5,00	49,05	$49,05 - 6,13 \cdot 8$	0,00	49,05



Nr. der Potentiallinie	x-Koordinate [m]	delta x	z-Koordinate [m]	delta z	Gesamtdruck [kN/m <sup>2</sup> ]	Teilkräfte [kN]	
		$x(i+1) - x(i)$		$z(i+1) - z(i)$		F <sub>x</sub> (i, i+1)	F <sub>z</sub> (i, i+1)
0	0,00	0,76	5,00	3,83	98,10	435,51	86,63
1	0,76	2,17	8,83	3,24	129,51	461,83	308,59
2	2,93	3,24	12,07	2,17	155,20	352,84	528,06
3	6,17	3,83	14,24	0,76	170,34	130,17	654,43
4	10,00	3,83	15,00	-0,76	171,68	-125,51	630,97
5	13,83	3,24	14,24	-2,17	158,08	-312,98	468,40
6	17,07	2,17	12,07	-3,24	130,68	-362,38	242,14
7	19,24	0,76	8,83	-3,83	92,72	-271,27	53,96
8	20,00		5,00		49,05		



S.W.-Druck x-Komponente:

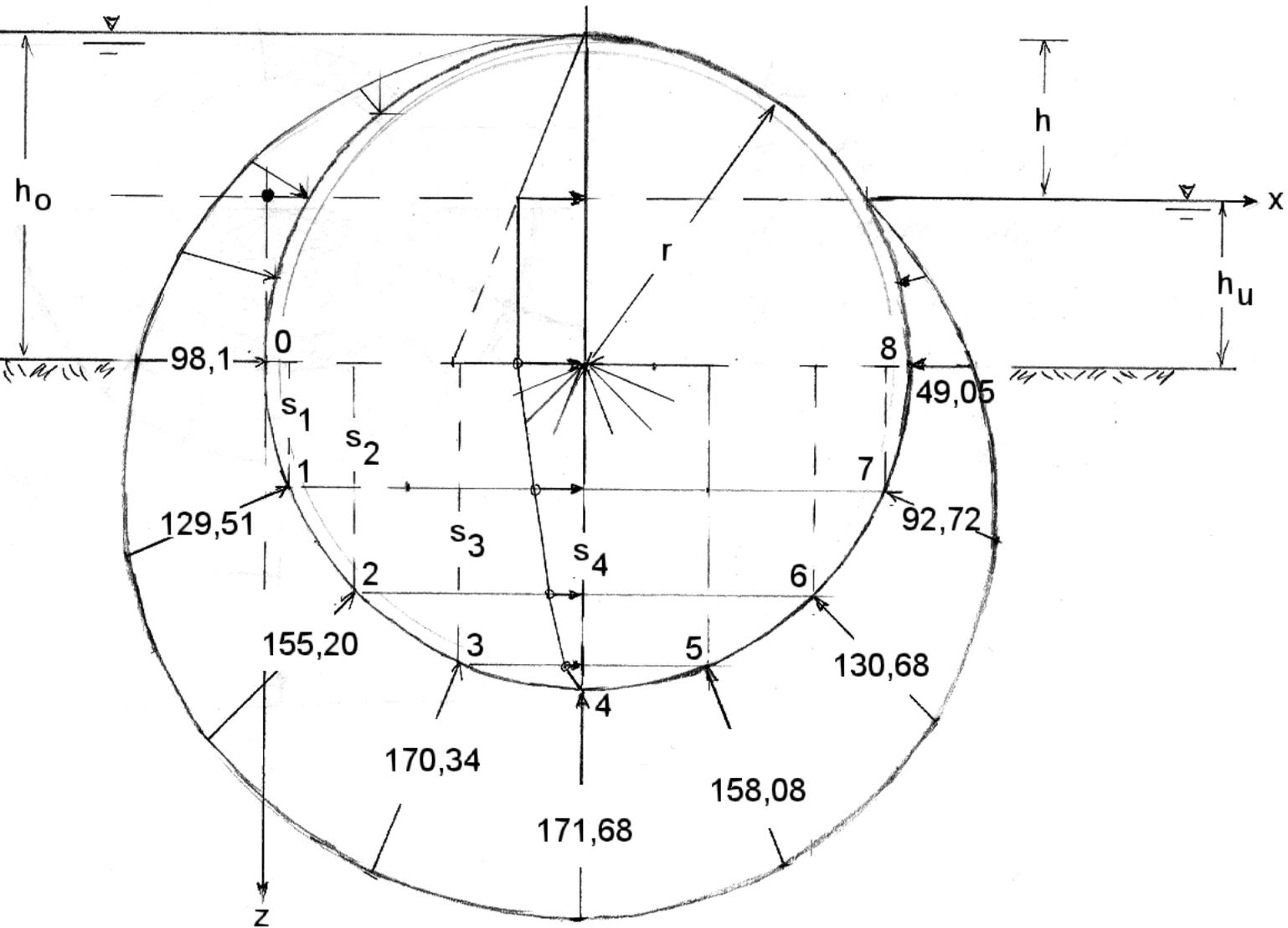
308,23

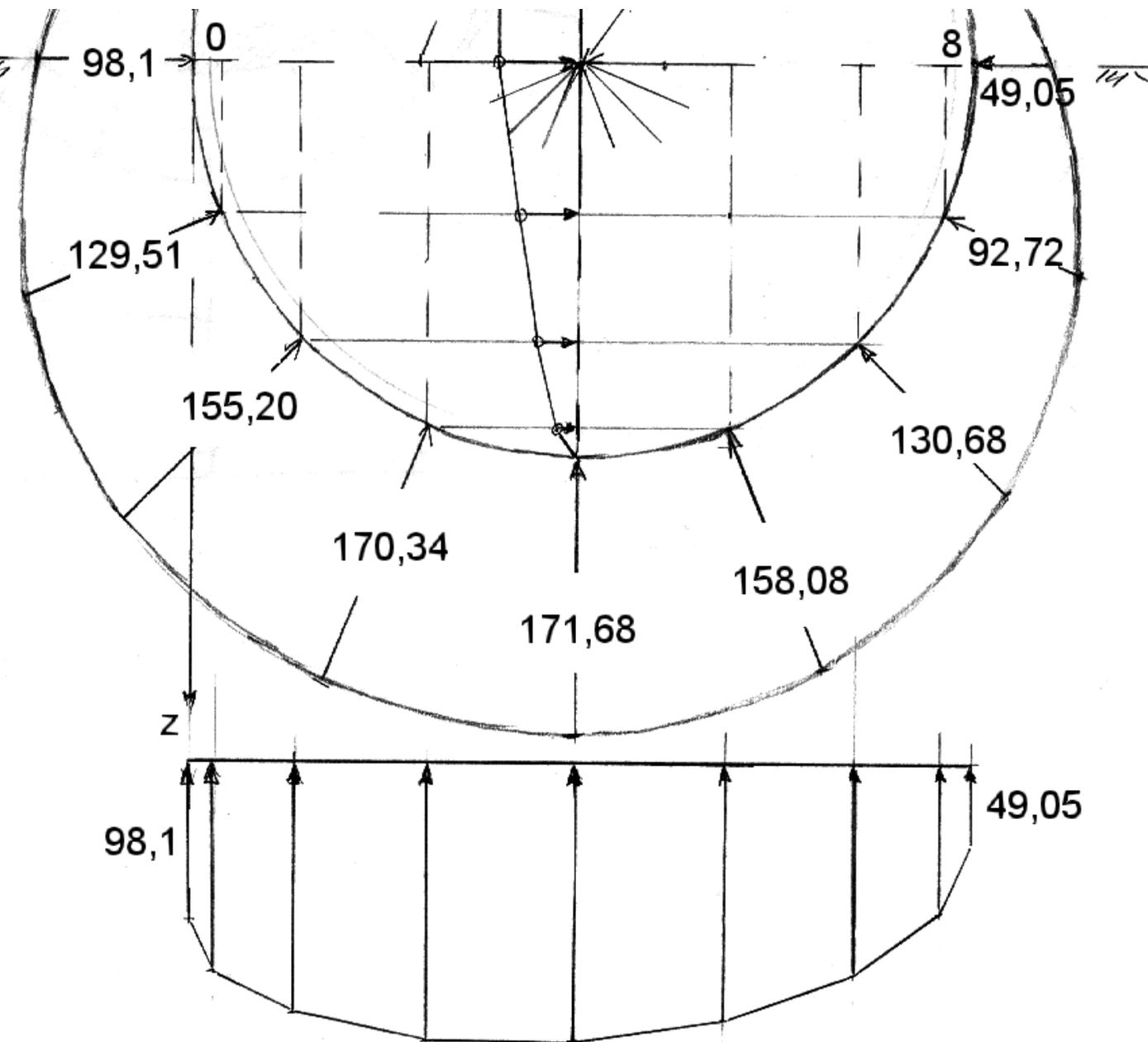
n. rechts

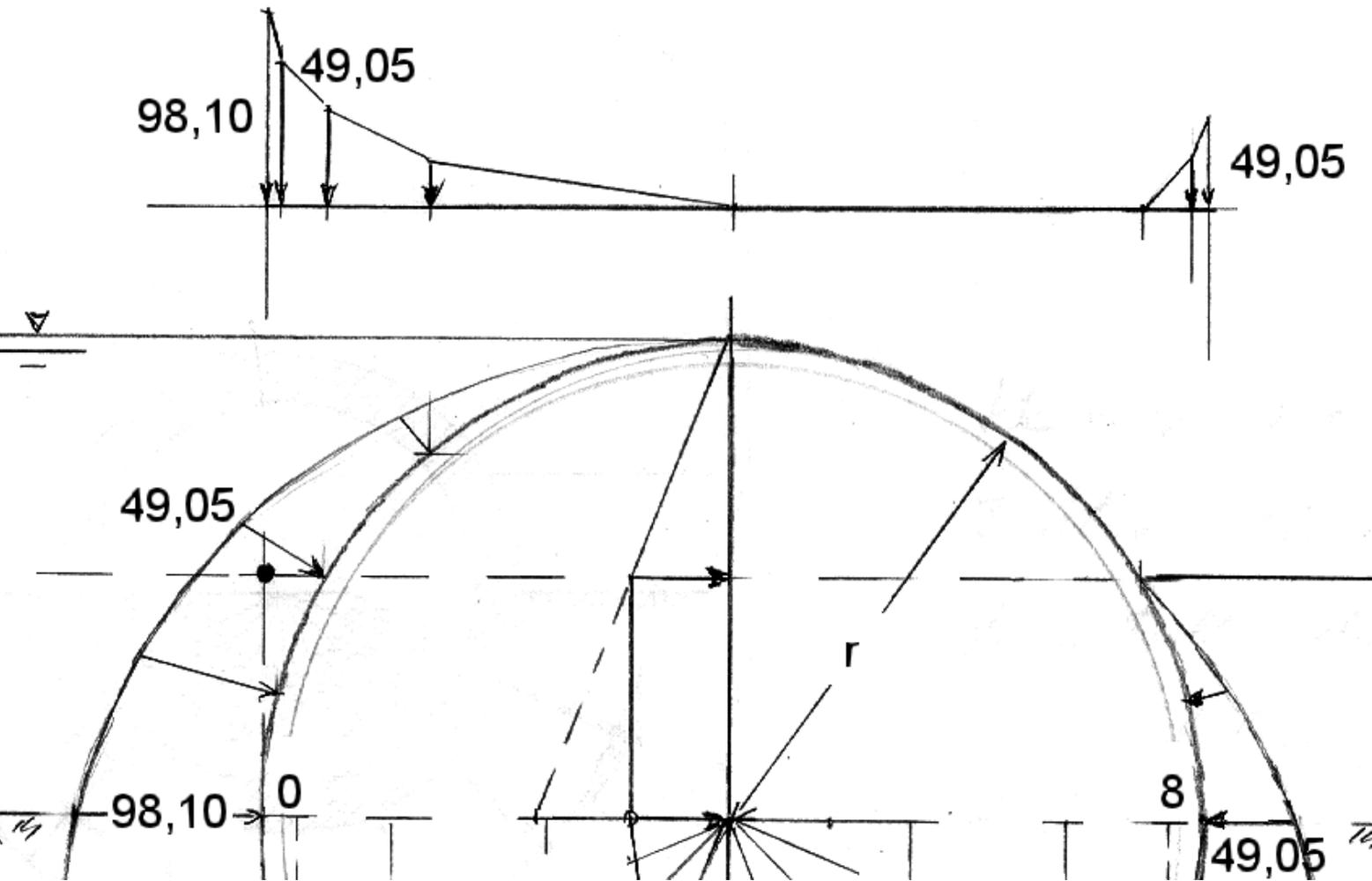
S.W.-Druck z-Komponente:

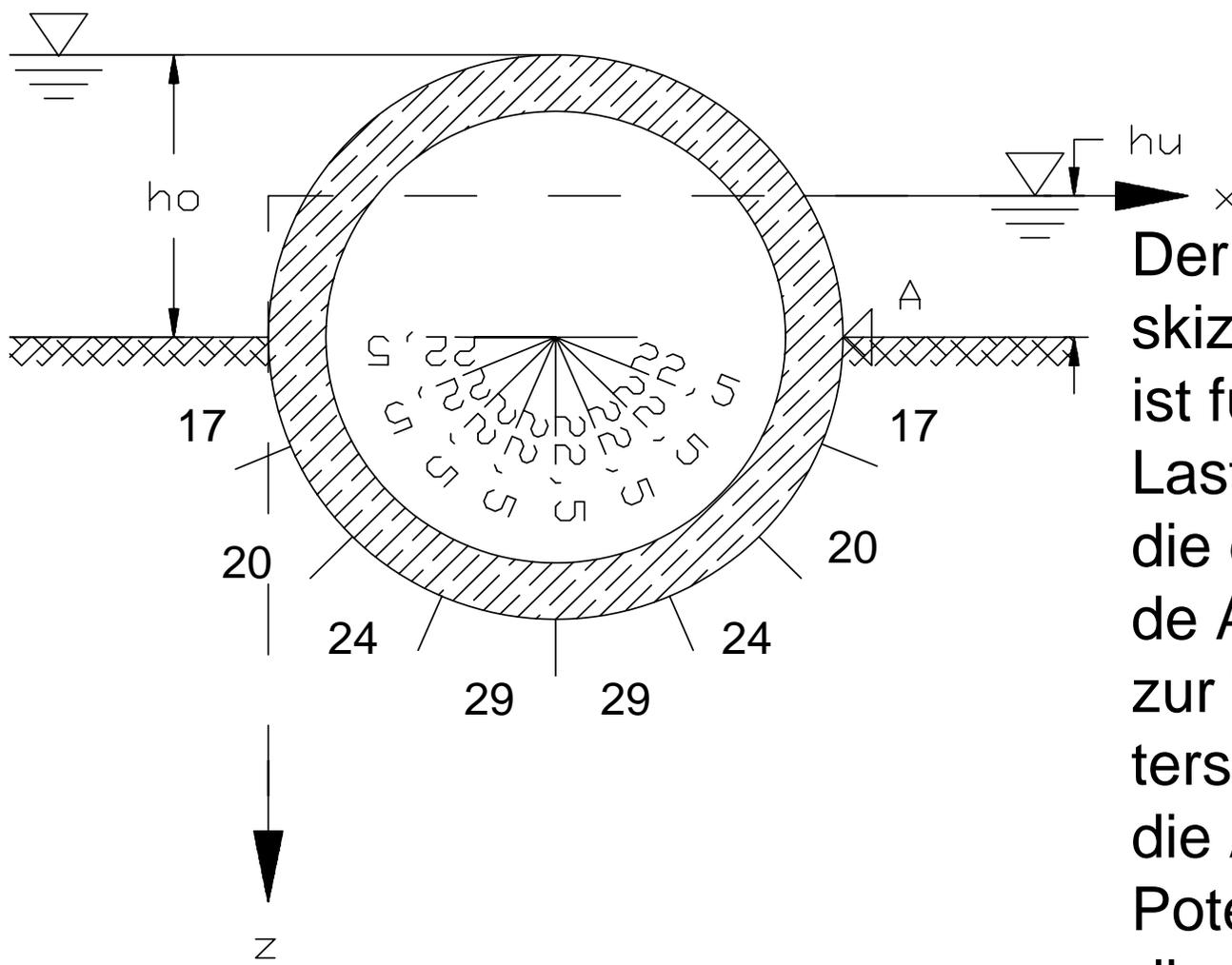
2973,17

n. oben





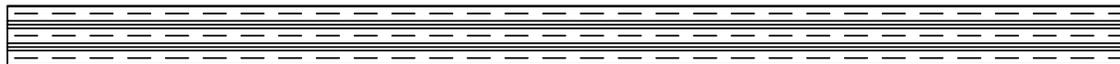




## PVL-Aufgabe 01:

Der nebenstehend skizzierte Wehrkörper ist für den dargestellten Lastfall auf Kippen um die durch A verlaufende Achse (senkrecht zur Tafelebene) zu untersuchen. Dabei sind die Auftreffpunkte der Potentiallinien durch die am Umfang angegebenen Zentriwinkel gegeben.

Undurchlässige Schicht!





Die Berechnung soll für die Bauwerksbreite 1m senkrecht zur Tafelebene durchgeführt werden.

Gegeben:

Durchmesser	$D = MM,DD \text{ m}$ (Geburtsmonat, -tag)
Wandstärke	$s = D/10$
Oberwasserstand	$h_o = D/2$
Unterwasserstand	$h_u = D/4$
Durchlässigkeit	$k_f = 10^{-4} \text{ m/s}$
Wichte des Wassers	$\gamma_W = 10 \text{ kN/m}^3$
Wichte des Baustoffes	$\gamma_B = 25 \text{ kN/m}^3$



Verlangt werden:

1. Verteilung der hydraulischen Druckspannungen oberhalb und unterhalb der Sohle.
2. Horizontale und vertikale Komponenten der hydraulischen Kräfte (Trapezformel), deren Resultierende und Richtung.
3. Durchführung des Kippsicherheitsnachweises
4. Ermittlung des Sickerverlustes unter der Voraussetzung, dass unter dem Bauwerk die Schar der Potentiallinien durch 3 Stromröhren bis zur undurchlässigen Schicht zu einem Sicker-netz ergänzt wird.
5. Nachweis der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch.
6. Berechnung der Verteilung der Sicker-geschwindigkeiten in der Randstromlinie und bezüglich der 4. Potentiallinie .