

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

**Franke, Eberhard**

## **Einige Beispiele zur Strömungsdruckwirkung des Grundwassers**

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103048>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Franke, Eberhard (1970): Einige Beispiele zur Strömungsdruckwirkung des Grundwassers. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 30. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 11-20.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Dr.-Ing. E. Franke

## **Einige Beispiele zur Strömungsdruckwirkung des Grundwassers**

### **Some examples on the effects of seepage pressures**

#### **Zusammenfassung**

Zunächst wird kurz der Strömungsdruck als Reibung des Wassers beim Durchströmen poröser Medien an der Grenzfläche zwischen fester und flüssiger Phase geschildert. Zur Darstellung der Wirkung des Strömungsdruckes werden vier Beispiele aus der Praxis beschrieben, bei denen der Strömungsdruck zu Schäden geführt hat.

#### **Summary**

Seepage pressure is described as friction developed by water at the boundary surface between solid and liquid matter, when it is flowing through porous media. Four case histories are presented, where damages caused by seepage pressures have been observed.

**INHALT**

	Seite
1. Allgemeines	13
2. Definition des Strömungsdruckes	13
3. Beispiel 1: Spundwand einer Baugrubenumschließung in rolligem Material	14
4. Beispiel 2: Spundwand einer Baugrubenumschließung in bindigem Material	15
5. Beispiel 3: Wassereinbruch in eine Rohrvorpressung bei der Unterdükerung eines Kanals	17
6. Beispiel 4: Rutschung eines Hanges	18
7. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	18
8. Schrifttum	19

### 1. Allgemeines

Beim Bauen am Wasser können bei nicht ausreichender Berücksichtigung des Strömungsdrucks Schäden auftreten. Deshalb soll hier nach einer kurzen Darstellung der mecha-

nischen Grundlagen des Strömungsdruckes sein Einfluß an einigen praktischen Beispielen erläutert werden.

### 2. Definition des Strömungsdruckes

Wasser bewegt sich unter dem Einfluß eines Gefälles (Bild 1), wobei das Gefälle als eine Druckhöhendifferenz  $\Delta h$  längs eines vom Wasser zurückgelegten Weges  $\Delta l$  definiert ist. Bei laminaren und stationären Strömungsvorgängen, auf die man sich bei dieser Betrachtung der Einfachheit halber beschränken kann, ist das Gefälle erforderlich, um

Die geometrische Form der Leitungswand ist dabei in weiten Grenzen beliebig. Sie kann wie beispielsweise bei einer Wasserleitung üblicher Art kreisrund und geschlossen oder wie bei einem Graben trapezförmig und nach oben offen sein. In dem hier interessierenden Fall einer Grundwasserströmung im Lockergestein hat die Leitungswand keine so

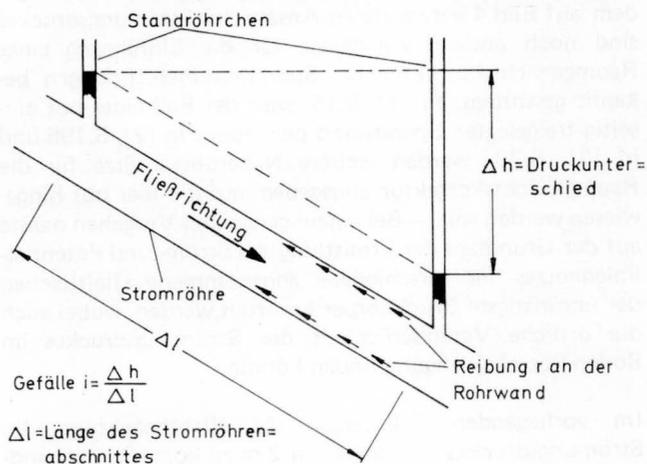


Abb. 1: Druckverhältnisse und Gefälle in einer Stromröhre

die Reibung zwischen dem bewegten Wasser und der Leitungswand einer Stromröhre zu überwinden. Die Reibung kann man sich als eine Schubspannung zwischen dem Wasser und der Leitungswand denken; sie wirkt – als Reaktionskraft  $r$  – auf das Wasser entgegengesetzt zur Fließrichtung und – als Aktionskraft  $s$  – auf die Leitungswand (Bild 2).

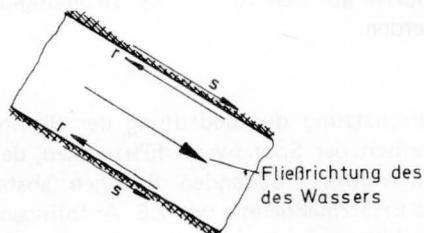


Abb. 2: Ausschnitt aus einer Stromröhre; Wirkung der Reibung auf das Wasser =  $r$ , auf die Rohrwand =  $s$ , wobei  $r = -s$ ;  $s$  = Strömungsdruck auf die Rohrwand

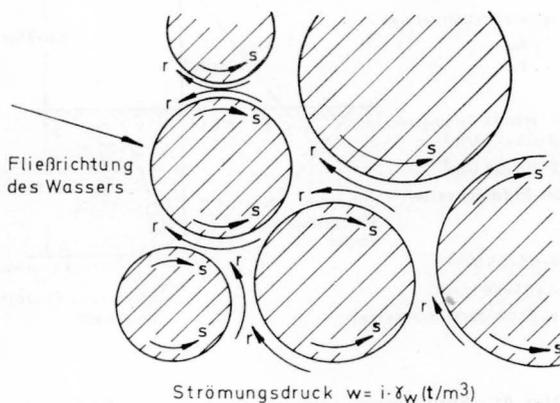


Abb. 3: Reibung  $r$  und Strömungsdrücke  $s$  bei der Durchströmung eines körnigen Haufwerkes.

regelmäßige Form, sondern wird von den Oberflächen des durchströmten Korngerüsts gebildet (Bild 3). Die Gerinne wand ist hier also sozusagen im vom Wasser durchströmten Bodenvolumen verteilt. Unter der Voraussetzung, daß die im betrachteten durchströmten Bodenvolumen befindliche Anzahl von Einzelkörnern groß ist, kann ferner der Charakter des durchströmten Bodens als körniges Haufwerk außer Betracht bleiben und der Boden als homogenes Kontinuum angesehen werden (wenn man dabei Bodenschichtgrenzen ausschließt).

Mit diesen Grundlagen folgt, daß die Reibungsschubspannungen  $s$  nicht wie bei der Strömung in einer Rohrleitung oder in einem Graben an einer das durchströmte Volumen umschließenden Fläche angreifen, sondern ebenfalls über das durchströmte Volumen verteilt sind. Darin besteht die wesentliche Besonderheit der Durchströmung eines körnigen Haufwerkes.

Die an den Einzelkörnern angreifenden Reibungsschubspannungen  $s$  (s. Bild 3) summieren sich also zu einer auf das durchströmte Bodenvolumen wirkenden Kraft, die entgegengesetzt zur Fließrichtung wirkt. Sie wird – auf die Volumeneinheit bezogen – Strömungsdruck  $w$  genannt, wobei  $w = i \cdot \gamma_W$  mit  $i =$  Gefälle und  $\gamma_W =$  Raumbgewicht des Wassers ist. Die Dimension von  $w$  ist  $t/m^3$ ,  $w$  greift also wie die Schwerkraft am Volumen an.

Wenn der Strömungsdruck  $w$  senkrecht gerichtet ist, kann man ihn auch als eine Raumbgewichtskorrektur  $\Delta\gamma_a$  berücksichtigen,

die am Raumbgewicht des Bodens unter Auftrieb  $\gamma_a$  anzubringen ist, und zwar bei Abwärtsströmung als Zuschlag und bei Aufwärtsströmung als Abzug ( $\Delta\gamma_a = \pm i \cdot \gamma_W$ ). In diesem Falle kann der mit der Wasserströmung verbundene Druckverbrauch im Wasser ebenfalls einfach als eine Raumbgewichtskorrektur berücksichtigt werden, die am Raumbgewicht des Wassers  $\gamma_W$  angebracht wird, und zwar bei Abwärtsströmung als Abzug und bei Aufwärtsströmung als Zuschlag ( $\Delta\gamma_W = \mp i \cdot \gamma_W$ ).

### 3. Beispiel 1:

#### Spundwand einer Baugrubenumschließung in rolligem Material

Die Abmessungen der Konstruktion sind auf Bild 4 dargestellt. Hinter der Spundwand wurde in 2 m Abstand eine Brunnenreihe angeordnet. Die Brunnenlänge war etwa gleich der Rammtiefe der Spundwand; der Brunnenabstand war etwa 7,5 m.

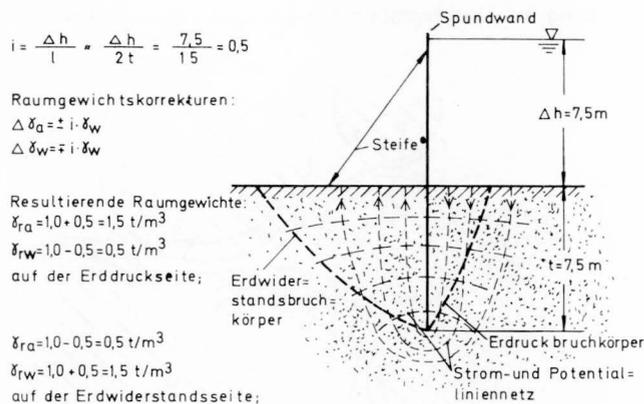


Abb. 4: Spundwand in einheitlichem, rolligen Boden mit  
 $\gamma = 1,800 \text{ t/m}^3$   
 $\gamma_a = 1,000 \text{ t/m}^3$ , ebener Fall

Nach Inbetriebnahme der Grundwasserabsenkungsanlage zeigte es sich, daß der Filter eines Brunnens nicht einwandfrei war und aus diesem Brunnen in unzulässigem Maß Sand mitgefördert wurde. Der Brunnen wurde deshalb abgestellt. Nach einiger Zeit stürzte die Spundwand neben diesem Brunnen ein.

Die Nachprüfung ergab, daß in der statischen Berechnung der Strömungsdruck und somit die Wirkung der Umströmung der Spundwand auf Erddruck und Erdwiderstand nicht berücksichtigt worden waren, was nur zulässig ist, wenn die Spundwand mit ihrem unteren Ende in eine dichte Bodenschicht einbindet oder wenn die gefährliche Aufwärtsströmung vor der Spundwand durch Anordnung von Brunnen verhindert wird. Wird ein Brunnen abgeschaltet, so muß die Spundwandumströmung berücksichtigt werden.

Wie auf Bild 4 gezeigt wird, hätte diese Umströmung der Spundwand näherungsweise in der Form berücksichtigt wer-

den können, daß der Strömungsdruck  $w$  als Raumbgewichtskorrektur  $\Delta\gamma_a$  auf der Erddruckseite zum Raumbgewicht des Bodens zugezählt und auf der Erdwiderstandsseite vom Raumbgewicht abgezogen wird. Entsprechend wäre das Raumbgewicht des Wassers auf der Erddruckseite um  $\Delta\gamma_W$  zu vermindern und auf der Erdwiderstandsseite um  $\Delta\gamma_W$  zu vergrößern gewesen. Der Ansatz einheitlicher Werte von  $\Delta\gamma_a$  und  $\Delta\gamma_W$  im gesamten Erddruck- und Erdwiderstandskörper wird i.a. zu einer ungünstigen, auf der sicheren Seite liegenden Näherung führen, obwohl die  $\Delta\gamma_a$ -Werte stellenweise höher als der angesetzte Wert sein können. – Neben dem auf Bild 4 verwendeten Ansatz des Strömungsdruckes sind noch andere Vorschläge für die Einführung einer Raumbgewichtskorrektur bei Spundwandberechnungen bekannt geworden. In [1], S.15, wird der Fall einer nur einseitig freigelegten Spundwand behandelt; in [2], S.196 und in [3], S.70, werden weitere Näherungsansätze für die Raumbgewichtskorrektur angegeben, auf die hier nur hingewiesen werden soll. – Bei einem genaueren Vorgehen müßte auf der Grundlage der Ermittlung des Strom- und Potentialliniennetzes für verschiedene angenommene Gleitflächen der ungünstigste Bruchkörper ermittelt werden, wobei auch die örtliche Veränderlichkeit des Strömungsdruckes im Boden Berücksichtigung finden könnte.

Im vorliegenden Fall ergab die Nichtbeachtung des Strömungsdruckes eine etwa um 2 m zu kurze Spundwandrammtiefe.

Die Unkenntnis der Wirkung des Strömungsdruckes auf das Raumbgewicht wirkte sich hier dahingehend aus, daß man nicht bemerkte, daß die Brunnen nicht etwa eine zusätzliche Sicherheit darstellten, sondern für die Standsicherheit der Spundwand unbedingt erforderlich waren. Nur dann, wenn die Brunnen bewirkten, daß im Erdwiderstandskörper vor der Spundwand keine nach oben gerichtete Strömung auftrat, durfte auf den Ansatz des Strömungsdruckes verzichtet werden.

Die Unterschätzung der Bedeutung der Brunnen für die Standsicherheit der Spundwand führte dazu, daß man den nicht einwandfrei arbeitenden Brunnen abstellte, ohne irgendeine Ersatzmaßnahme wie z.B. Aufbringen einer Auflast-Filterschüttung im Bereich des abgestellten Brunnens zu treffen, die den Einsturz sicherlich verhindert hätte. Das Gewicht dieser Schüttung hätte sich zu  $\Delta\gamma \times$  Rammtiefe leicht ermitteln lassen.

Es ist noch vermutet worden, daß die Schadensursache in der Vernachlässigung von Schichten geringerer Durchlässigkeit im Bereich der Rammtiefe gelegen hat. Wie nach dem Schadensfall ausgeführte Untersuchungen zeigten, steht nämlich unterhalb der Rammtiefe der Spundwand stärker

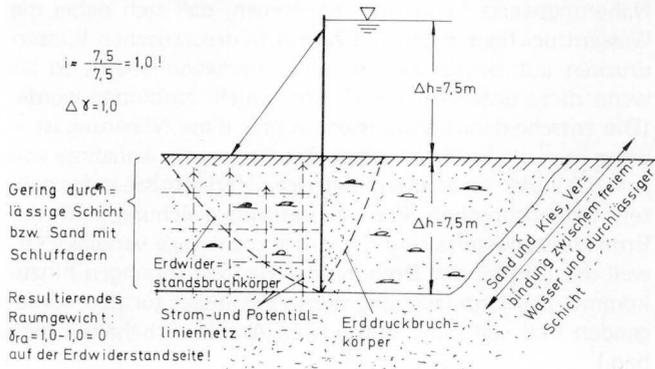


Abb. 5: Spundwand wie auf Bild 4, jedoch mit einer bindigen Schicht im Rammtiefenbereich  
 $\gamma = 1,800 \text{ t/m}^3$   
 $\gamma_a = 1,100 \text{ t/m}^3$

durchlässiges Material an, das Verbindung mit dem freien Kanalwasser haben soll. Wie Bild 5, auf dem vereinfacht eine geringdurchlässige Schicht über die ganze Rammtiefe

angenommen wurde, zeigt, bleiben die vorstehenden Überlegungen auch in diesem Fall grundsätzlich gültig. Falls tatsächlich die durchlässigeren Schichten unterhalb der Rammtiefe eine solche Verbindung mit dem freien Kanalwasser hatten, daß in ihnen der volle, dem Kanalwasserspiegel entsprechende Wasserdruck gewirkt hätte, wäre der Strömungsdruck im Erdwiderstandskörper noch wesentlich größer anzusetzen gewesen. Dieser Fall hätte dann nach der Empfehlung E 52 des Arbeitsausschusses Ufereinfassungen berechnet werden müssen. Wie mit Hilfe von Bild 4 gezeigt worden ist, ergibt aber schon die günstigere Annahme einheitlichen Untergrundes eine Gefährdung der Spundwand durch Strömungsdruck bei Ausfall von Brunnen.

Wenn neben der Nichtbeachtung des Strömungsdruckes zusätzlich noch weitere Möglichkeiten für die Schadensursachen vorhanden sind, wobei vor allem an eine rückschreitende Erosion im Bereich des wegen Sandförderung abgestellten Brunnen zu denken ist, so besteht doch einige Wahrscheinlichkeit, daß der Unfall nicht eingetreten wäre, wenn man die empfindliche Abhängigkeit der Standsicherheit der Konstruktion von der Funktionsfähigkeit der Brunnen erkannt und nach Ausfall eines Brunnen entsprechende Gegenmaßnahmen getroffen hätte. Allerdings hätte man bei Kenntnis der Wirkung des Strömungsdruckes von vornherein eine größere Rammtiefe berechnet oder eine andere Konstruktion gewählt, wie es dann später geschehen ist.

4. Beispiel 2:

Spundwand einer Baugrubenumschließung in bindigem Material

Eine Spundwand war für eine Baugrubenumschließung 3,7 m in Tonmergel eingerammt worden (Bild 6). Im Grundriß bildete die Spundwand ein geschlossenes Rechteck oder einen sog. Spundwandkasten. Im Innern des Kastens wurde dann das Wasser ausgepumpt, so daß die Spundwand zunächst einer Horizontalbeanspruchung aus 4 m Wasser ausgesetzt war. In 2 m Tiefe unter Oberkante der Spundwand war eine Aussteifung in den Spundwandkasten eingebaut worden. Nachdem man dann im Spundwandkasten auf etwa 10 m Kastenlänge einen Aushub von 1,8 m Tiefe (s. Bild 6) ausgeführt hatte, um die für die Gründung eines Brückenpfeilers vorgesehene Sohle zu erreichen, gab das Erdwiderlager der Spundwand nach und der Kasten klappte in diesem Bereich unten zusammen.

Die Nachprüfung der statischen Berechnung ergab, daß auch hier kein Strömungsdruck angesetzt worden war. Auf Bild 6 ist bei Ansatz des Strömungsdruckes gezeigt, daß auf der Erdwiderstandsseite das resultierende Raumgewicht praktisch gleich Null gewesen wäre.

Im Grunde liegt also hier derselbe Fehler vor, wie bei dem im vorigen Abschnitt geschilderten Schadensfall. Es kommen, da es sich hier um eine Spundwand in bindigem Boden handelt, jedoch noch einige Besonderheiten hinzu, die zu beachten sind:

Bei bindigem Boden besteht die Möglichkeit, daß sich bei einer relativ schnellen Belastungsänderung die Festigkeits-

eigenschaften des Bodens dem neuen Belastungszustand noch nicht angepaßt haben. Deshalb wird für diesen Fall bekanntlich mit der sogenannten Anfangsfestigkeit des

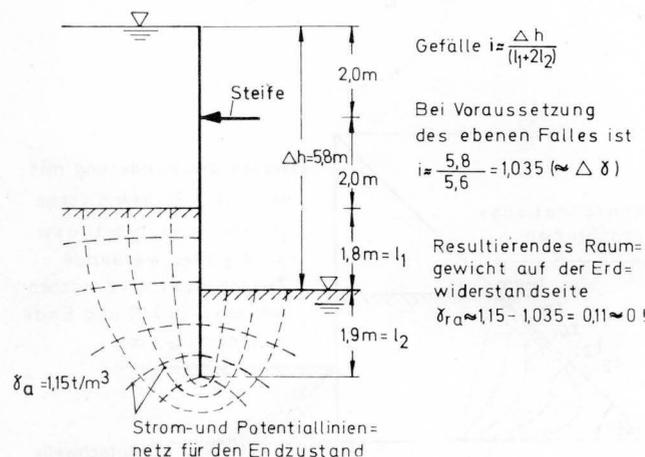


Abb. 6: Spundwand in bindigem Boden

Bodens,  $c_u$  genannt, gerechnet. Sie ist die Bodenfestigkeit, die vor Eintritt der Belastungsänderung, d.h. bei konstantem Wassergehalt im Boden vorhanden war. – Außerdem ist aber auch der andere Fall zu untersuchen, bei dem sich der Wassergehalt der Belastungsänderung voll angepaßt hat. Für diesen Fall ist die Endscherfestigkeit des Bodens zu verwenden, die durch die sog. "wirksamen Scherparameter"  $c'$  und  $\rho'$  (Kohäsion und Reibungswinkel) gegeben ist (s. dazu auch

die Empfehlungen E 88 und 89 des Arbeitsausschusses Ufereinfassungen). Der Fall, der die ungünstigere Standsicherheit ergibt, ist maßgebend.

Die vorstehende, bekannte Verfahrensweise ist nun mit den hier vorliegenden geometrischen Randbedingungen in Verbindung zu bringen (s. Bild 7). Dabei führt der Strömungsdruck im Anfangs- und im Endzustand zu verschiedenen Wasser- und Erddruckbelastungen:

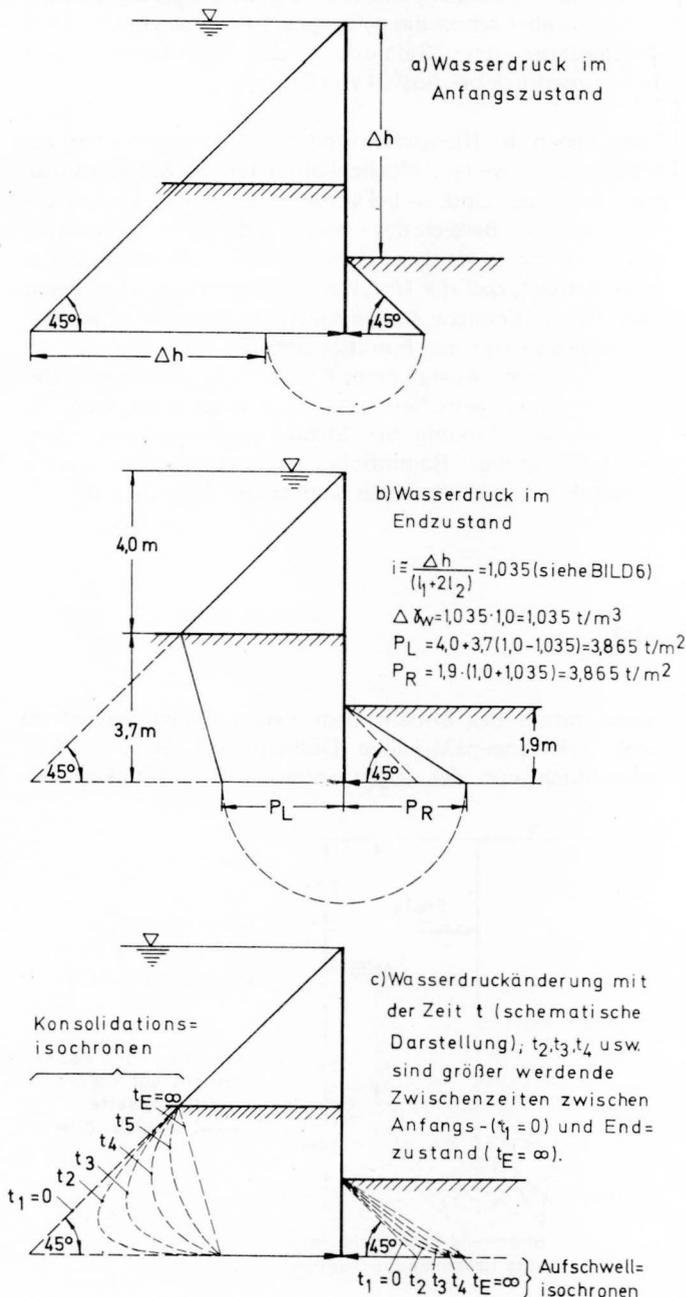


Abb. 7: Spundwand wie auf Bild 6, Wasserdruckansätze für verschiedene Zeiten nach Herstellung der Baugrube

Im Falle 1 wird der Anfangszustand der Standsicherheit unter Ansatz von  $c_u$  untersucht, wobei angenommen ist, daß der Wassergehalt sich noch nicht dem neuen Belastungszustand nach Auspumpen und Aushub der Baugrube angepaßt hat. In diesem Falle muß – entsprechend dem jetzigen Stand unserer Kenntnisse – näherungsweise angenommen werden, daß der Strömungsdruck genau wie andere Be-

lastungen wassergesättigten bindigen Bodens den sog. "vollen Porenwasserüberdruck" erzeugt. Der Strömungsdruck erzeugt also in diesem Zustand keine Spannungen im Korngerüst (die als Raumgewichtskorrektur zu berücksichtigen wären), sondern entsprechende Drücke im Porenwasser. Näherungsweise kann man annehmen, daß sich dabei die Wasserdruckfigur nach Bild 7a mit hydrostatischen Wasserdrücken auf beiden Seiten der Spundwand ergibt, so als wenn diese unten in eine dichte Schicht einbinden würde. (Die entscheidende Voraussetzung für diese Näherung ist – wenn man die Erddruckseite betrachtet – die Annahme von  $A = 1,0$  in der für axialsymmetrische Verhältnisse aufgestellten Skemptonischen Porenwasserdruckgleichung; auf der Erdwiderstandsseite sind die Zusammenhänge verwickelter, weil der Einfluß der Drehung der Hauptspannungen hinzukommt. Die Untersuchung dieses Einflusses für den vorliegenden Fall soll einer besonderen Arbeit vorbehalten bleiben.)

Die Wasserdruckfigur nach Bild 7a verändert sich dann im Laufe der Zeit durch Konsolidation des Bodens (auf der Erddruckseite) und durch Aufschwellen (auf der Erdwiderstandsseite). Auf Bild 7c ist gezeigt, wie die Wasserdruckänderung zeitlich fortschreitet. Schließlich wird der Fall 2, der Endzustand, erreicht (der theoretisch erst nach unendlicher Dauer eintritt). Mit den Wasserdruckänderungen gehen Wassergehalts- und Festigkeitsänderungen einher. Ferner bildet sich im Endzustand ein stationärer Durchströmungszustand aus, der genau dem im vorigen Abschnitt behandelten entspricht. Dieser Fall ist in Bild 7b dargestellt. Er wird unter Ansatz der Raumgewichtskorrekturen  $\Delta \gamma_a$  und  $\Delta \gamma_w$  genauso behandelt wie die Durchströmung rolligen Bodens.

Es sei hier betont, daß es für den Ansatz des Strömungsdruckes nicht darauf ankommt, ob man eine Wasserströmung sehen kann oder nicht. Die Tatsache, daß man in bindigem Boden oft keinen offensichtlichen Wasserzutritt z.B. auf der Baugrubensohle feststellen kann, darf kein Anlaß sein zu glauben, daß es in solchen Böden keine Strömung und keinen Strömungsdruck gibt.

Die vorstehenden Überlegungen für den Anfangszustand gelten vor allem für normal- und leicht überkonsolidierten Boden. Im Tonmergel, in dem der hier behandelte Schaden aufgetreten ist, wird der Endzustand maßgebend sein, weil der Boden stark vorbelastet ist ( $A$ -Wert nach Skempton  $< 0$ ). Unabhängig davon wäre man bei der Berechnung des Endzustandes unter Berücksichtigung des Strömungsdruckes darauf gestoßen, daß die Spundwand nicht stand sicher ist und hätte die Spundwand tiefer bis auf eine tatsächlich viel undurchlässigere Schicht gerammt, was dann später geschehen ist.

### 5. Beispiel 3:

#### Wassereinbruch in eine Rohrvorpressung bei der Unterdückerung eines Kanals

Ein Kanal sollte mittels des Rohrvorpreßverfahrens unterdükert werden. Als sich der Schneidkopf bereits unter der Kanalsohle befand, trat schnell zunehmend Wasser längs des Rohres in die Vorpreßgrube ein und strömte auch an der Grenze zwischen der Spundwand der Vorpreßgrube und dem Erdreich der Böschung des seitlichen Begrenzungsdammes des Kanals aus.

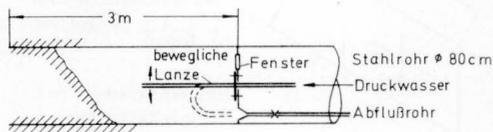


Abb. 8: Schneidkopf

Das Vorpreßverfahren besaß im vorliegenden Fall die Eigenart, daß der Boden an der Ortsbrust im Spülverfahren abgebaut werden sollte (Bild 8). 3 m hinter der Rohrschneide befand sich ein Schott, in dem ein Fenster, eine bewegliche Spüllanze und ein Abflußrohr eingebaut waren. Ein Mann sollte hinter dem Schott sitzen und mit dem Wasserstrahl aus der Lanze den Boden lösen, der mit dem abfließenden Wasser dann hydraulisch durch das Abflußrohr abgefördert werden sollte. In dem im vorliegenden Fall anstehenden schluffigen Feinsand wurde dieses Verfahren abgeändert. Man nahm an, daß der kohäsionslose, schluffige Boden praktisch von selbst in einen "schwimmenden" Zustand gerät und sozusagen dem Abflußrohr von selbst zulaufen würde. Man bog daher die Lanze, wie auf Bild 9 gezeigt, um und baute sie in diesem Zustand fest ein, um den Einlauf des Abflußrohres stets gut freispülen zu können. Beim Vorpressen lief dann auch – wie erwartet – der Boden wie eine Flüssigkeit der Abflußleitung zu. Es wurde ein äußerst schneller Vorpreßfortschritt erzielt, bis unter der Kanalsohle ein Hindernis angefahren wurde. Nach einiger Zeit erfolgte dann der Wassereinbruch. Er hatte folgende Ursache:

Der Kanalwasserspiegel stand etwa 1,5 m über Gelände und normalerweise etwa 2 m über dem Grundwasserspiegel. Gedichtet waren nur die wasserseitigen Böschungen der Kanalseitendämme. Die Kanalsohle schnitt in den schluffigen, wenig durchlässigen Feinsand ein. Im Bauzustand war um den Spundwandkasten der Vorpreßgrube eine Grundwasserabsenkung angeordnet, so daß die Druckdifferenz vom Kanalwasserspiegel bis zum Grundwasserspiegel an der Vorpreßgrube und damit bis zur Abflußleitung im Rohrschott mehr als 6 m betragen haben wird (Bild 9).

Beim Vorpressen unter der Kanalsohle war dann eine Druckdifferenz von  $\Delta h \approx 6$  m auf eine Sickerweglänge  $l \approx 4$  m wirksam, wie sich aus Bild 9 ablesen läßt. Das Gefälle von  $6/4 = 1,5$  und der entsprechende Strömungsdruck,

der nach der Abflußleitung im Schott hin gerichtet war, hatten also erhebliche Größen. Da die Abflußleitung im Schneidkopf mit der umgebogenen Lanze ständig freigespült wurde, konnte der Strömungsdruck den beim Vorpressen des Rohres in den Schneidkopf hineinwandernden Boden in den "schwimmenden" Zustand versetzen und auf das Abflußrohr zuschwimmen. Dabei ist es jedoch nicht geblieben. Wenn das Rohr nämlich nicht schnell genug vorgepreßt wurde, hat sich der in den "schwimmenden" Zustand versetzte Bodenbereich auch bis vor die Rohrschneide ausgebreitet, und es ist Boden aus der Umgebung des Rohres abgefördert worden, d.h. mehr Boden als dem vorgepreßten Rohrvolumen entsprach. Dadurch entstand um das Rohr herum eine Auflockerungszone (s. Bild 9). Vom Taucher ist dann tatsächlich eine Furche aus Einbruchtrichtern längs der Vortriebsachse in der Kanalsohle festgestellt worden.

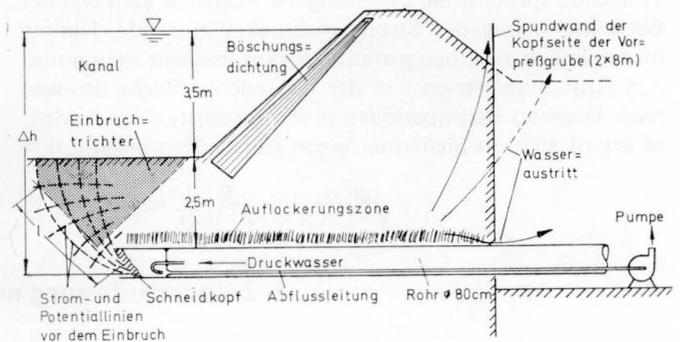


Abb. 9: Wassereinbruch in eine Rohrvorpressung

Beim Vorpressen unter dem Kanalseitendamm ist das Gefälle zwar kleiner als das oben berechnete gewesen. Bei dem anstehenden schluffigen Feinsand genügen allerdings auch schon wesentlich kleinere Gefälle, um den Boden in den schwimmenden Zustand zu versetzen und ihn dem Abflußrohr in unkontrollierbarer Überschußmenge zuzuführen.

Als dann der Spülvorgang infolge des Hindernisses längere Zeit auf eine Stelle konzentriert war, wird sich ein größerer Einbruch über dem Schneidkopf gebildet haben (s. Bild 9). In der Auflockerungszone längs des Rohres hat das Wasser nur noch wenig Sickerwiderstand gefunden. So kam es zu den Wasseraustritten auf der Böschung und um die Vorpreßgrube, die beinahe einen Bruch des Kanalseitendammes zur Folge gehabt hätten.

An der Beschreibung dieses Beispiels ist insofern eine kleine Korrektur anzubringen, als es sich bei den zum Schaden führenden Einflüssen nicht nur um Strömungsdrücke, sondern vielleicht mehr noch um rückschreitende Erosionen gehandelt hat. Da diese Wirkungen aber untereinander eine starke Verwandtschaft besitzen, wird es erlaubt sein, diesen Fall hier mit aufzuführen.

## 6. Beispiel 4:

### Rutschung eines Hanges

Bei der Rutschung kamen durch verhältnismäßig geringfügige Baggerarbeiten im Umfang von etwa 15 000 m<sup>3</sup> nach und nach eine halbe Million m<sup>3</sup> in Bewegung. Eine 15 m starke Gehängelehmschicht rutschte auf dem etwa parallel zur Böschungsoberfläche anstehenden Felsen ab. Nach der Rutschung stellte sich heraus, daß der Reibungswinkel des abgerutschten Bodens mit 28° weit über dem Böschungswinkel des Hanges von 15° lag. Damit berechnet sich eine Rutschsicherheit von

$$\frac{\tan \rho}{\tan \beta} = \frac{0,53}{0,27} \approx 2,$$

was im Widerspruch zur Tatsache der Rutschung steht (Bild 10).

Eine widerspruchsfreie Erklärung der Vorgänge kam erst bei Berücksichtigung des Strömungsdruckes zustande. Nimmt man nämlich eine hangparallele Sickerwasserströmung und den Grundwasserspiegel in der Geländeoberfläche an, was nach längeren Regenperioden nicht unrealistisch sein wird, so ergibt sich als Sicherheit gegen Abrutschen bekanntlich

$$\eta = \frac{\tan \rho}{2 \cdot \tan \beta} = \frac{0,53}{2 \cdot 0,27} \approx 1,0$$

Daraufhin war klar, daß es die Sickerwasserströmung war, die den Hang empfindlich selbst gegen relativ geringfügige Eingriffe in seine Oberfläche machte. Sonst hätten solche geringen Eingriffe von nur ca. 15 000 m<sup>3</sup> unter den vorliegenden Verhältnissen nie eine Rutschung von einer halben Million Kubikmeter auslösen können.

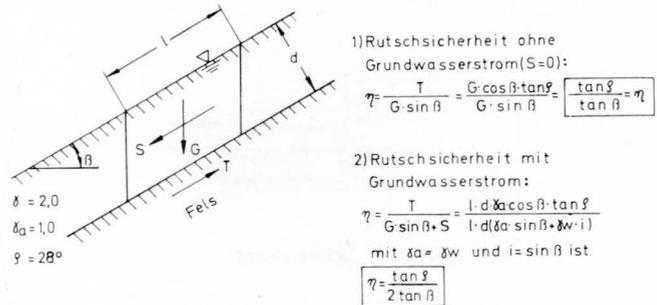


Abb. 10: Hang mit böschungsparallelem Grundwasserstrom, Wasserspiegel in der Geländeoberfläche

## 7. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Es wurde an einigen Beispielen gezeigt, welche Folgen eintreten können, wenn der Strömungsdruck nicht gebührend beachtet wird.

Bei der Behandlung der eingestürzten Spundwandbauwerke wurden außerdem Angaben und Vorschläge zur näherungsweise rechnerischen Berücksichtigung des Strömungsdruckes bei der Bauwerksbemessung gemacht. Im Beispiel 2 wurde dabei besonders auf die Behandlung bindigen Baugrundes eingegangen, weil dieser Fall bisher in der einschlägigen Literatur nach Kenntnis des Verfassers noch nicht zufriedenstellend behandelt worden ist.

Deshalb soll hier auch besonders hervorgehoben werden, daß in der Praxis hinsichtlich bindiger Böden ziemlich allgemein Unklarheiten darüber bestehen, ob ein Einfluß von Strömungsdruck und – als Grenzzustand – hydraulischer Grundbruch überhaupt möglich sind oder nicht. Im Beispiel 2 der Spundwand-Baugrubenumschließung in bindigem Boden ist der Versuch gemacht worden, auch in bindigem Boden die Strömungsdruckwirkung näherungsweise zu berücksichtigen. Es ist jedoch erforderlich, das Verhalten bindiger Böden unter Strömungsdruck noch genauer zu erforschen, wobei besonders an die Aufschwellung im Erdwiderstandskörper vor Spundwänden und an die Wirkung eines Gefälle-Schwellenwertes  $i_0$  zu denken ist.

Ferner fällt bei der Bearbeitung von Schadensfällen an Spundwänden auf, daß vielfach angenommen wird, es reiche ganz allgemein die Berechnung der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch vor der Spundwand aus, um sich gegen die Wirkung von Sickerströmungen zu sichern. Dabei wird aber vergessen, daß die Spundwand in einem solchen Falle als unnachgiebig gestützt vorausgesetzt wird, d.h. es

bleibt unberücksichtigt, daß z.B. freistehend- eingespannte oder einfach verankerte Spundwände unten im Erdwiderstandsbereich schon vor Eintritt eines hydraulischen Grundbruchs ausweichen können, weil neben dem Strömungsdruck dort auch noch Auflagerkräfte der Spundwand wirken und ein Bruch aus dem Zusammenwirken beider entsteht.

Bei freistehend- eingespannten, einfach verankerten oder ähnlich gestützten Spundwänden reicht es also nicht aus, die z.B. in [4,5 und 6] angegebenen Gefällegrenzwerte einzuhalten, weil dort immer nur die unnachgiebig gestützte Spundwand behandelt wurde, bei der allein Strömungsdruck auftritt und keine Erdauflagerkraft aus der Spundwand wirkt. Wird der Erdwiderstand vor der Spundwand in Anspruch genommen und wirkt gleichzeitig dort eine Sickerströmung, so müssen Untersuchungen der Art, wie sie in den Beispielen 1 und 2 angegeben wurden, ausgeführt werden, d.h. bei der Erdwiderstands- und Rammtiefenberechnung sind die erläuterten Raumgewichtskorrekturen  $\Delta \gamma$  auszuführen. Darauf ist bereits 1943 von Kastner [7] hingewiesen worden. Geht man auf diese Weise vor, so wird man annehmen können, daß ausreichende Sicherheit sowohl gegen Ausweichen des Erdauflegers der Spundwand als auch gegen hydraulischen Grundbruch gegeben ist.

In der letzten Zeit sind in der Bundesanstalt für Wasserbau einige Modellversuche an Spundwänden mit verschiedenen Auflager-Randbedingungen ausgeführt worden, und zwar wurden vergleichsweise die freistehend- eingespannte, die einfach verankerte und die unnachgiebig gestützte Spundwand untersucht. Die Modellversuche bestätigen die vorstehend gemachten Ausführungen. Über ihre Ergebnisse wird später noch besonders berichtet.

## 8. Schrifttum

- [ 1] Terzaghi, K. : Verankerte Spundwände, VEB Verlag Technik, Berlin 1957
- [ 2] Brinch - Hansen, I. : Earth pressure calculation. Technisk Forlag, Kopenhagen 1953
- [ 3] Norwegian Geotechnical Institute : Publication Nr. 16, Oslo 1956
- [ 4] Davidenkoff, R. und Franke, L. : Räumliche Sickerströmung in eine umspundete Baugrube im Grundwasser. Bautechnik 12/1966
- [ 5] Sentko, M. : Der zeitliche Ablauf des Schwimmsandaufbruchs und der Einfluß der geometrischen Anordnung der Baugrubenumschließung auf das kritische Gefälle  
Heft 7 der Veröff. des Inst. f. Bodenmechanik und Grundbau der TH Karlsruhe, 1961
- [ 6] Müller - Kirchenbauer, H. : Zur Mechanik der Fließsandbildung und des hydraulischen Grundbruches.  
Heft 17 der Veröff. des Inst. f. Bodenmechanik und Grundbau der TH Karlsruhe, 1964
- [ 7] Kastner, H. : Über die Standsicherheit von Spundwänden in strömendem Grundwasser, Bautechnik, 1943

