

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

**Armbruster, Heinrich**

## **Die Sickerwasserströmung im Bereich der Stauanlage Kulturwehr Kehl**

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102955>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Armbruster, Heinrich (1980): Die Sickerwasserströmung im Bereich der Stauanlage Kulturwehr Kehl. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 46. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 59-78.

### **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.



Dipl.-Ing. H. A r m b r u s t e r

## DIE SICKERWASSERSTRÖMUNG IM BEREICH DER STAUANLAGE

### KULTURWEHR K E H L

Teil I : Unterströmung und Standsicherheit im Endzustand

The flow of groundwater in the area of the barrage  
"Kulturwehr Kehl"

Part I : Seepage under the construction and stability  
during operation

### Zusammenfassung

Die Wehranlage wird in einem stark durchlässigen sandigen Kies gegründet, der über einer etwa 1,5 m starken Tonschicht in etwa 20 m unter Gelände liegt. Die Baugrubenschlitzwand des Oberwassers bildet zusammen mit der Tonschicht ein Dichtungssystem, dessen Auswirkung auf die Unterströmungsmenge und Standsicherheit mit Hilfe eines numerischen Grundwassermodells untersucht wurde.

### Summary

The weir is founded in a very pervious subsoil of coarse gravel. The thickness of the gravel is about 20 m. It is followed by a clay layer of 1.5 m. The diaphragm of the upstream side influences together with that clay layer the seepage under the construction and his stability. These influences are explored with a mathematical groundwater model.

I N H A L T

	Seite
1 Allgemeines	61
2 Vorhandene Sickerströmungsprobleme und deren Lösungsart	63
2.1 Hochwasserdämme	63
2.2 Unterströmung und Standsicherheit des Wehrs im Endzustand	63
2.3 Zuströmung zu den Baugruben, Standsicherheit im Bauzustand	63
3 Grundwassermodell und seine Parameter	64
4 Potentialverteilung im Strömungsfeld	67
5 Auftrieb auf die Wehrplatte	70
6 Unterströmungsmenge	73
7 Fehlstellen in der Tonschicht	75
8 Hydraulischer Grundbruch, Ausspülungen	77
9 Zusammenfassung	77
10 Literatur	78

## 1 Allgemeines

Bis ins 19. Jahrhundert beherrschte der Rhein zwischen Basel und Kehl als Wildstrom einen Bereich von 2 bis 3 km Breite. Die 1817 von Tulla in Angriff genommene Rheinkorrektur zwang den Rhein in ein 200 bis 240 m breites Bett /1/, brachte aber Nachteile für die Schifffahrt. Die Rheinregulierung von Honsell schuf durch Einbau von Buhnen eine Schifffahrtsrinne auch für niedere Abflüsse, die Grundwasserabsenkung durch die Erosion aber blieb erhalten. Als um die Jahrhundertwende die Erzeugung und Fortleitung elektrischer Energie am Hochrhein verwirklicht wurde, entstanden auch Pläne für die Ausnützung der Wasserkräfte am Oberrhein (Basel bis Mannheim).

Der Ausbau des Oberrheins wurde nach dem Ersten Weltkrieg begonnen. Im ersten Bau-Abschnitt (Basel bis Breisach) entstanden 4 Staustufen mit Kraftwerken in einem neu angelegten Seitenkanal auf der französischen Seite, wodurch im Restrhein keine Schifffahrt mehr möglich war und die Absenkung des Grundwassers weiterging. Im zweiten Bauabschnitt (Breisach bis Straßburg) befinden sich ebenfalls vier Staustufen mit Kraftwerken auf der französischen Seite in einem Seitenkanal, aber dieser ist nur auf etwa der Hälfte der Strecke vorhanden (= Schlingenlösung). Für den Restrhein wurden schadensverhütende Maßnahmen vorgesehen (Wehre, Schwellen) /2/.

Für die letzte der 4 Staustufen (Staustufe Straßburg) waren zur Stützung des Grundwassers ursprünglich 2 feste Schwellen vorgesehen. Als aber mit fortschreitendem Ausbau des dritten Bauabschnitts (unterhalb Straßburg) das Hochwasserschutzproblem in den Vordergrund rückte, wurde 1973 der Bau eines Wehres bei Rhein-km 290.300 (Bild 1) beschlossen, das sowohl eine Stützung des Grundwassers ermöglicht (regionale Bedeutung)

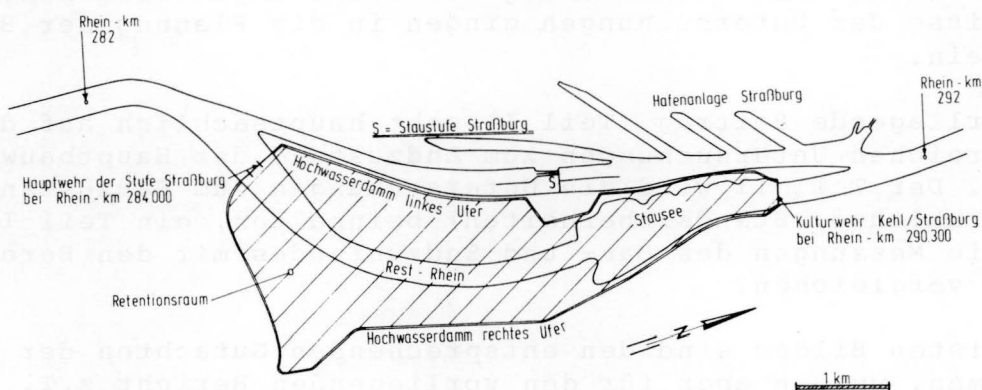


Bild 1 Lage des Kulturwehres Kehl

als auch durch den möglichen Überstau von 700 ha eine Hochwasserretention erlaubt (überregionale Bedeutung). Das Projekt umfaßt den Bau von Hochwasserdämmen auf beiden Ufern des Rest-



rheins, den Bau eines Wehrs mit festem Wehrteil in Strommitte mit seitlich anschließenden Staubalkenwehren (Bild 2 und 3) und den Bau von Nebenanlagen.

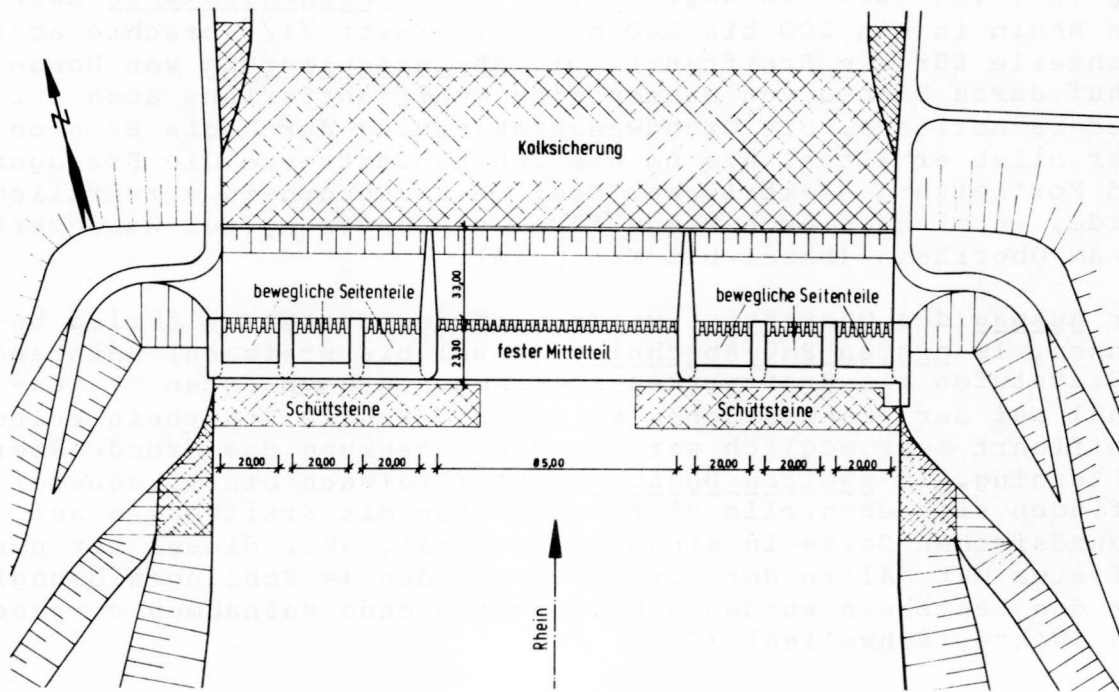


Bild 2 Lageplan der Wehranlage

Im Zusammenhang mit den Sickerströmungsproblemen erhielt die BAW von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes den Auftrag, die Unterströmung des Wehrs, die Zuströmung zu den Baugruben und die Durchströmung der Dämme zu untersuchen. Die Ergebnisse der Untersuchungen gingen in die Planung der Bauwerke ein.

Der vorliegende Beitrag (Teil I) geht hauptsächlich auf die umfangreichen Untersuchungen zum Endzustand der Hauptbauwerke ein. Der Teil II wird die Untersuchungen zum Bauzustand (Wasserhaltung, Standsicherheiten) beinhalten, ein Teil III soll die Messungen des Bau- und Endzustandes mit den Berechnungen vergleichen.

Die meisten Bilder sind den entsprechenden Gutachten der BAW entnommen, wurden aber für den vorliegenden Bericht z.T. ergänzt oder umgestaltet.

## 2 Vorhandene Sickerströmungsprobleme und deren Lösung

Aufgrund der Doppelfunktion der Stauanlage als Kulturwehr (Aufstau des Wassers um etwa 4 m im MW-Fall) und als Steuerungsmöglichkeit der Hochwasserrückhaltung (Aufstau bis zu 8 m) ergeben sich gegenüber Stauanlagen mit konstantem Oberwasser zusätzliche Probleme, auf die i.a. nur kurz eingegangen wird.

### 2.1 Hochwasserdämme

Beim Normalstau trennt im Bereich des Stausees (Bild 1) ein 50 m breiter Vorland-Streifen die Dämme von der Wasserlinie, im südlich angrenzenden Bereich liegt der Restrhein bis zu 1 km von den Hochwasserdämmen entfernt. Dadurch werden die Dämme nur im instationären Retentionsfall direkt durch- bzw. unterströmt. Die Untersuchungen wurden von Dr. Lühr im Auftrag und in Zusammenarbeit mit der BAW durchgeführt. Sie untersuchten die Auswirkungen von Oberflächenabdichtungen und Vertikalwänden verschiedener Tiefen und die Abhängigkeit der Sickerströmung vom Vorflutsystem an vertikal-ebenen elektrisch analogen und numerischen Grundwassermodellen. Mit einem horizontal-ebenen numerischen Modell wurde die Verteilung der Sickerwassermenge aus dem gesamten Stauraum erfaßt. Auf diese Untersuchungen wird im Rahmen dieses Beitrages nicht weiter eingegangen.

### 2.2 Unterströmung und Standsicherheit des Wehres im Endzustand

Das Wehr ist auf einen durchlässigen Baugrund gegründet, wodurch eine Unterströmung des Bauwerks stattfindet. Die Unterströmungsmenge  $Q$  und der Auftrieb  $A$  auf das Bauwerk hängen von geometrischen, geologischen und hydrologischen Parametern ab, wobei unter geometrischen Parametern die Form, Lage, Tiefe, Verankerung, Entwässerung etc. des Bauwerkes verstanden werden soll. Da die Bearbeitung dieses Punktes noch im Entwurfstadium des Bauwerkes begann, ergab sich der Fall, daß auch geometrische Parameter (z.B. Stärke der Sohlplatte, Lage und Tiefe der Dichtungswände) variiert werden mußten. Dafür bot sich ein numerisches Modell an, das vertikal-eben durch die Rest-Rheinachse gelegt wurde (Bilder 2 bis 4). Das Modell und die Ergebnisse bilden den Hauptteil des vorliegenden Berichtes.

### 2.3 Zuströmung zu den Baugruben, Standsicherheit im Bauzustand

Da die Baugruben entweder im Restrhein direkt oder in unmittelbarer Nähe davon liegen, ist der Wasserhaltung besondere Beachtung zu schenken. Dabei wurden verschiedene Abdichtungsmaßnahmen untersucht, um hydraulische Grundbrüche und ein Auf-

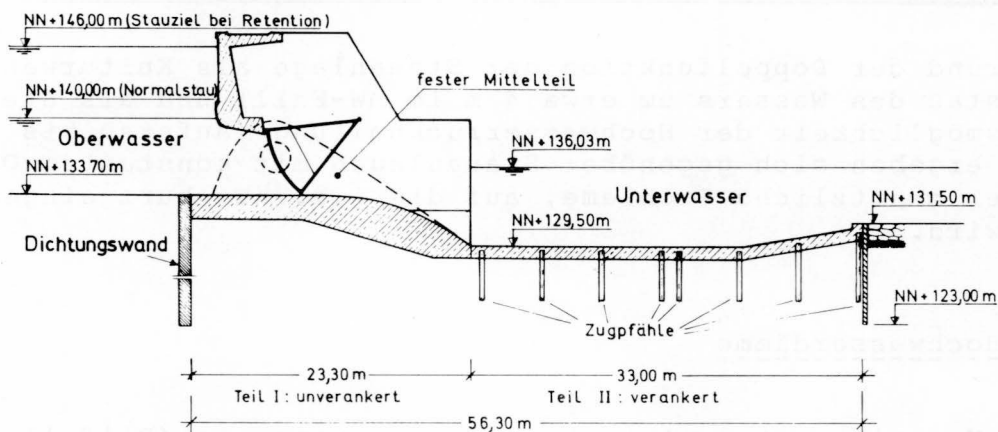


Bild 3 Schnitt durch das Wehr

schwimmen der Platte im Bauzustand zu vermeiden. Da die Abmessungen der ursprünglich geplanten drei Baugruben im Grundriß nicht wesentlich von einem Quadrat abweichen, wurden zwei Vertikal-Schnitte durch die Baugrubenachsen gelegt und die Sickerströmung an vertikal-ebenen numerischen Grundwassermodellen berechnet. Der in Wirklichkeit auftretenden räumlichen Sickerströmung wurde durch Korrekturfaktoren Rechnung getragen. Die Berechnungen und Ergebnisse werden im Teil II beschrieben.

### 3 Grundwassermodell und seine Parameter

Das Verhältnis von Wehrbreite zur Wehrlänge beträgt im Grundriß  $243 \text{ m} / 56,3 \text{ m} = 4,32$ , außerdem wird das Wehr nur von der Oberstromseite angeströmt. Es wird sich daher überwiegend eine zweidimensionale Strömung einstellen, die mit einem zweidimensionalen Grundwassermodell berechnet werden kann. Gewählt wurde ein numerisches Modell auf der Basis finiter Dreieckselemente, um eine bessere Anpassung bei Parametervariationen zu erreichen, als dies bei einem Modell mit starrem Raster möglich ist. Der Schnitt durch das Wehr (Bild 3) gilt für die (allein interessierende) Unterkante der Wehr- bzw. Tosbeckenplatte auch in anderen Schnitten. In der Elementorganisation (Bild 4) ist diese Unterkante nach dem ursprünglichen Entwurf getreptt. Dies ist ohne entscheidenden Einfluß. Das Bild 4 gibt die Dreieckselemente (ohne Details) wieder (Verzerrung durch ungleiche Maßstäbe). Die durch Bohrungen bestimmten mittleren Schichtgrenzen (5 Schichten) geben die horizontalen Hauptbegrenzungen des gleichmäßig aus jeweils halben Rechtecken bestehenden Dreiecksrasters. Die vertikalen Begrenzungen sind im Innenbereich mit geringeren Abständen als im Außenbereich gewählt. In etwa 50 m unter der Rheinsohle wird eine Randstromlinie angenommen (Unterströmung hat keinen Einfluß auf größere Tiefen), die Gesamtlänge des Modells betrug 350 m. Insgesamt er-

## Armbruster: Die Sickerwasserströmung

gaben sich 382 Knoten und 634 Elemente. Die Dichtungswand im Oberwasser ist eine 0,5 m starke Schlitzwand (Bentonit-Zement-Mischung, Einmassenverfahren), der eine Durchlässigkeit ( $k_{DW}$ ) zugeordnet wurde, d.h. sie wird im Normalfall durchströmt. Das Bild 4 gibt den Sonderfall wieder, daß sie

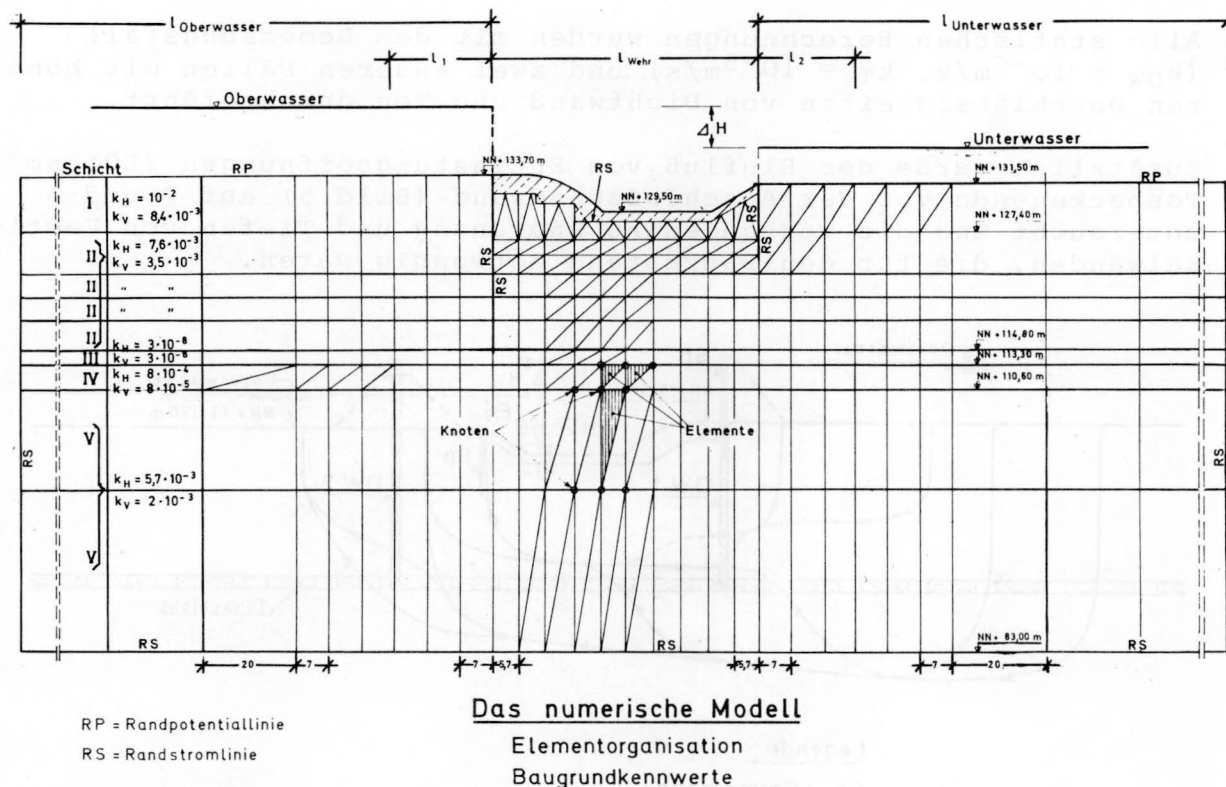


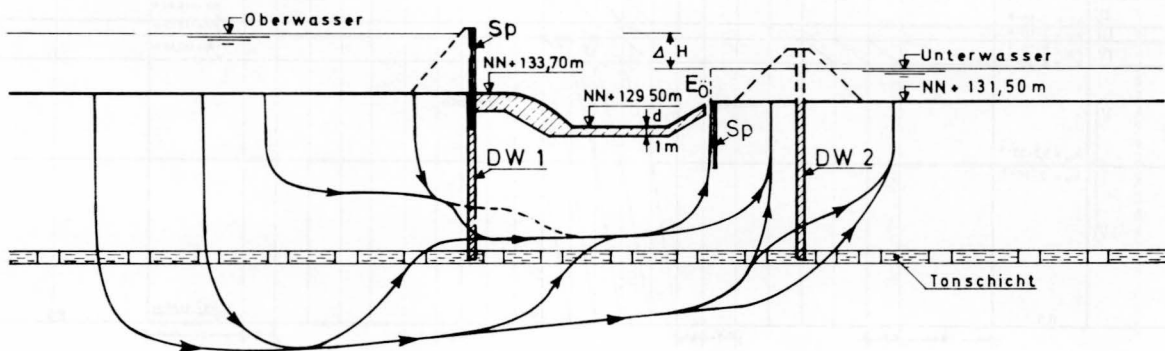
Bild 4 Grundwassermodell und Bodenaufbau

vollkommen dicht ist (Randstromlinie). Den einzelnen Schichten wurden aus den Bohraufschlüssen Durchlässigkeiten in horizontaler und vertikaler Richtung zugewiesen ( $k_H$ ,  $k_V$ ). Die Zahlen des Bildes 4 lassen das Wesentliche des Baugrundes erkennen: Unter einer etwa 4 m starken Schicht stark durchlässiger sandarmer Kiese lagern geringer durchlässige sandige Kiese, die von einer etwa 1,5 m mächtigen Tonschicht in 17 m Tiefe unter der Rheinsohle von sandreichen Kiesen getrennt werden. Dieser Tonschicht kommt die entscheidende Bedeutung bei für alle Berechnungen. Auf ihre Durchlässigkeit ( $k_T$ ) bzw. ihr Vorhandensein wurde daher bei allen Varianten eingegangen. Für den Fall einer den Ton erreichenden nahezu dichten Wand und einer nahezu dichten Tonschicht ergibt sich nämlich der Trivialfall fehlender Unterströmung ( $Q \sim 0$ ) bei kleinstem Auftrieb. Da dieser Fall bei einer Fläche des Wehrs von etwa 15.000 m<sup>2</sup> sehr unwahrscheinlich ist, ergab sich die Notwendigkeit, einen realistischen "Bemessungsfall" einzuführen. Für dessen Abschätzung wurde die Tonschicht mit gleichmäßig verteilten "Fehlstellen" (Sand statt Ton) versehen und die Unterströmungsmenge berechnet (siehe Pkt. 7). Festgelegt wurde die fiktive Durchlässig-

keit der Tonschicht mit  $k_T^I = 10^{-5} \text{ m/s}$  (entspricht nach Bild 15 etwa 9 % Fehlstellen) und die Durchlässigkeit der fertigen Schlitzwand im oberwasserseitigen Wehrplattenabschluß mit  $k_{DW} = 10^{-6} \text{ m/s}$ . (Die Materialwerte der Mischung im Labor sind ungefähr eine Zehnerpotenz kleiner).

Alle statischen Berechnungen wurden mit dem Bemessungsfall ( $k_{DW} = 10^{-6} \text{ m/s}$ ,  $k_T = 10^{-5} \text{ m/s}$ ) und zwei anderen Fällen mit höheren Durchlässigkeiten von Dichtwand und Ton durchgeführt.

Zusätzlich wurde der Einfluß von Entlastungsöffnungen (EÖ) am Tosbeckenende vor der Abschlußspundwand (Bild 5) auf  $Q$  und  $A$  untersucht und die verschiedene Anordnung und Tiefen von Vertikalwänden, die für den Bauzustand notwendig waren.



Legende:

- Sp : Spundwand
- DW : Dichtungswand
- E<sub>ö</sub> : Entlastungsöffnung

Bild 5 Mögliche Wasserwegigkeiten bei verschiedenen Varianten

Das Bild 5 zeigt schematisch die möglichen Wasserwegigkeiten, je nach Dichtigkeit der Wände bzw. der Tonschicht. Durch die vorgenommene Variation der Parameter ergaben sich sehr viele Daten, deren Auswertung für das Problem: "Abschneiden stark durchlässiger Schichten mittels Schlitzwände" zwar nicht allgemein gültig aufbereitet wurde, dennoch aber für die Lösung ähnlicher Probleme Hinweise liefert. Das Einbinden der oberwasserseitigen Schlitzwand in die Tonschicht erwies sich als wirtschaftlichste Lösung im Bauzustand, die unterwasserseitige Schlitzwand des Bauzustands wird nach Bauende oberhalb der Rheinsohle abgetragen. Am Tosbeckenende befindet sich eine konstruktive Spundwand zur Kolksicherung, deren Länge für den vorliegenden Bericht konstant gehalten wurde (Pkt. 10).



4 Potentialverteilung im Strömungsfeld

Die Berechnung erfolgte mit dem beschriebenen Modell auf der Basis finiter Elemente. Grundlage der Berechnung ist die dynamische Bewegungsgleichung (Gesetz von DARCY gilt in jedem Element) und die Kontinuitätsbedingung in jedem Knoten (Massenerhaltungsgesetz). Da es sich um eine Potentialströmung ohne freie Oberfläche handelt, ist das Strömungsfeld nur von den geometrischen Parametern abhängig. Der Abbau der Potentialdifferenz zwischen Oberwasser und Unterwasser ( $\Delta H$ ) ist völlig unabhängig von hydrologischen Parametern. Es wurde daher eine konstante Potentialdifferenz von  $\Delta H = 10$  m eingeführt, die Potentiale an jedem Knoten errechnet und für bestimmte Varianten ein Potentiallinienbild gezeichnet (Bilder 6 und 7), das den Abbau der Potentialdifferenz im Strömungsfeld zeigt (Potentialanteil aus Unterströmung). An den Potentialbildern

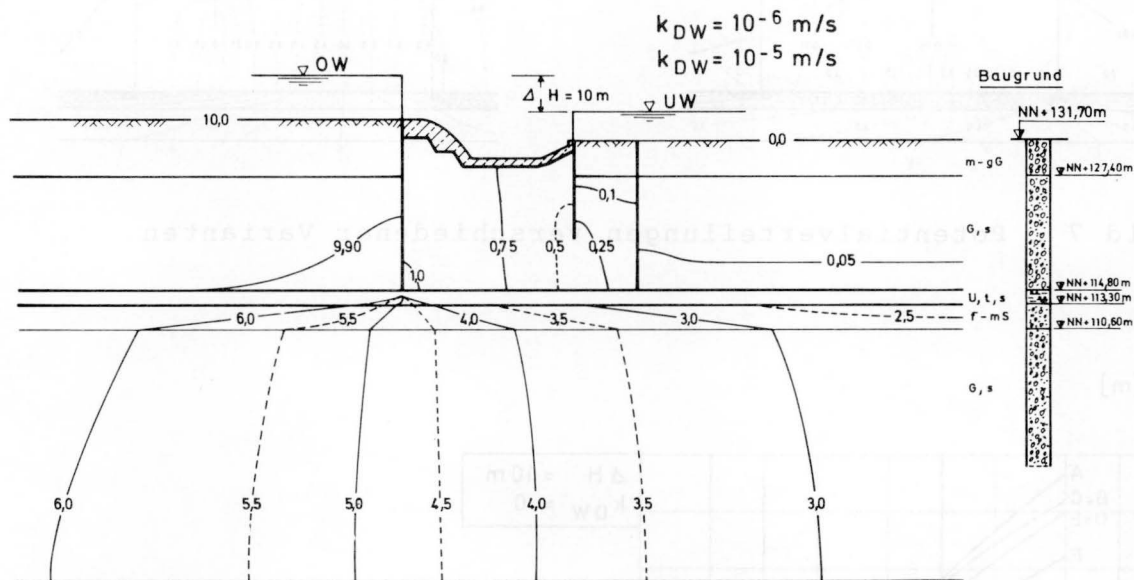


Bild 6 Potentialverteilung des Bemessungsfalls

erkennt man, in welchen Schichten viel Potential abgebaut wird (Potentiallinien eng beieinander), an welchen wenig. Die für einen bestimmten hydraulischen Fall gültige Potentialverteilung erhält man (i.a. nicht notwendig), indem für jeden Punkt des Feldes zum Unterwasserpotential das  $k$ -fache der Potentialdifferenz von  $\Delta H/10$  addiert wird, wobei der Faktor  $k$  den Potentialbildern zu entnehmen ist. Die wichtigsten Punkte des Potentialfelds befinden sich unter der Sohlplatte. In Bild 9 sind die Punkte A bis H eingezeichnet, deren Potentialanteil  $h'$  aus dem Diagramm zu entnehmen ist für jede Durchlässigkeit  $k_T$ , die der Tonschicht zugeordnet wird (Dichtungswand im Oberwasser und die Spundwand im UW als dicht angenommen). Der Wert  $h'$  ist grundsätzlich für den am weitesten oberwasserseitig gelegenen Punkt A

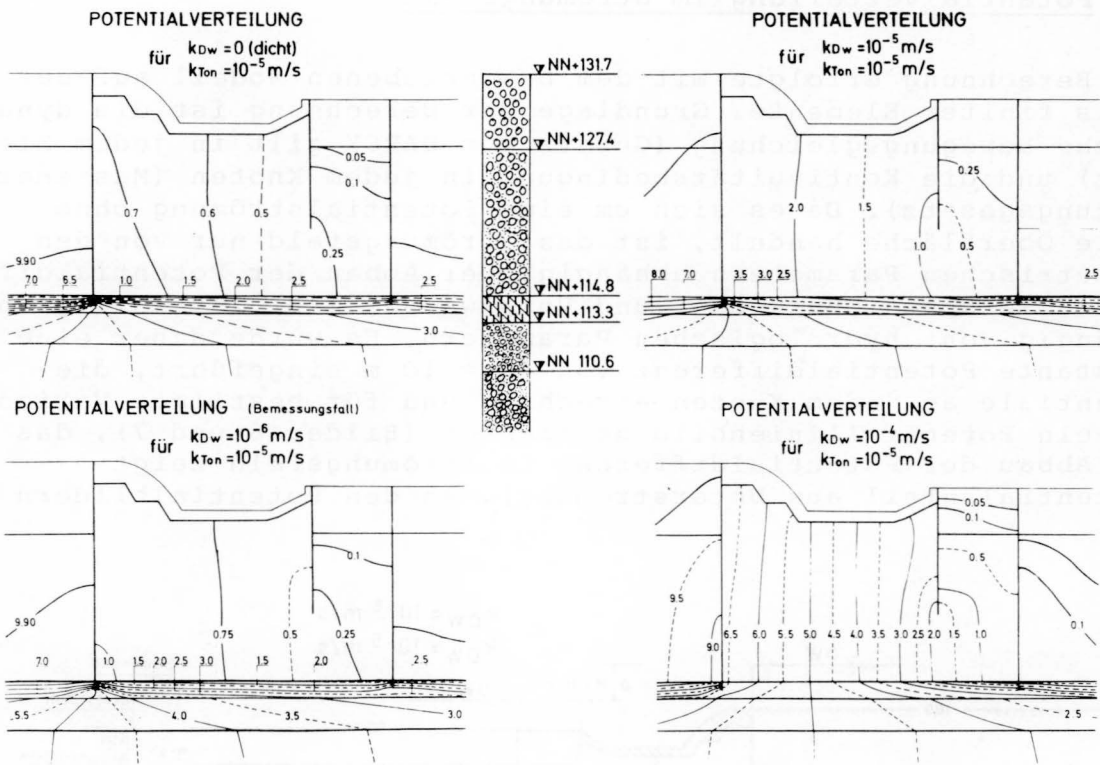


Bild 7 Potentialverteilungen verschiedener Varianten

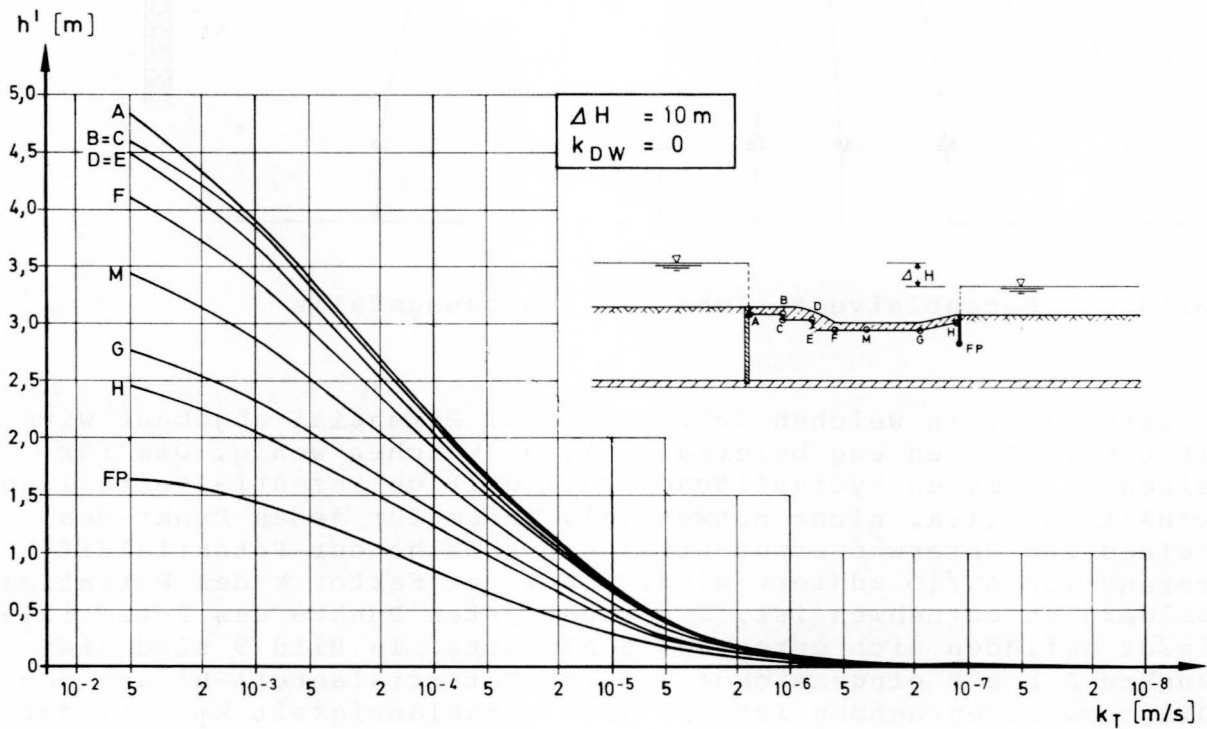


Bild 9 Potentialhöhen  $h'$  unter der Platte in Abhängigkeit von  $k_{DW}$  und der Lage des Punktes

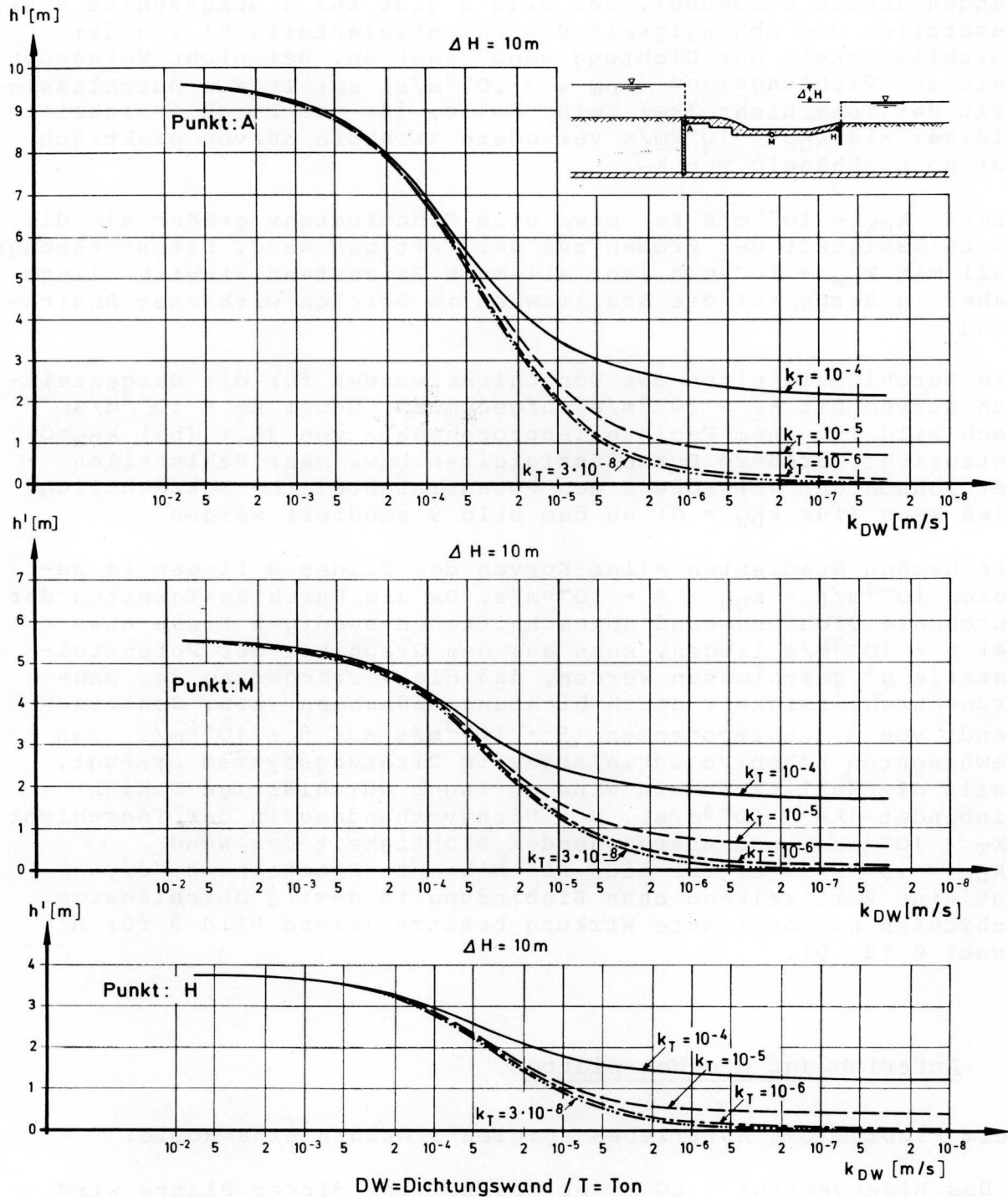


Bild 8 Potentialhöhen  $h'$  unter der Platte in Abhängigkeit von  $k_{DW}$  und  $k_T$   
 8.1 Punkt A    8.2 Punkt M    8.3 Punkt H

am größten, für den am weitesten unterwasserseitig gelegenen Punkt H am kleinsten. Alle Werte nehmen mit zunehmender Dichtwirkung der Tonschicht ab bis auf Null. Dann ist unter der Platte keine Auswirkung des erhöhten Oberwasserspiegels vor-



handen (keine Strömung). Das Bild 8 gibt für 3 ausgewählte Punkte zusätzlich die Abhängigkeit des Potentialanteils  $h'$  von der Durchlässigkeit der Dichtungswand ( $k_{DW}$ ) an. Bei nicht Vorhandensein der Dichtungswand ( $k_{DW} \sim 5 \cdot 10^{-2} \text{m/s}$ ) spielt die Durchlässigkeit der Tonschicht ( $k_T$ ) keine Rolle, für die Durchlässigkeiten kleiner als  $k_{DW} = 10^{-6} \text{m/s}$  verändern sich die Kurven praktisch nur noch abhängig von  $k_T$ .

Dieses  $k_{DW} = 10^{-6} \text{m/s}$  ist etwa eine Zehnerpotenz größer als die Durchlässigkeit der Proben aus der fertigen Wand. Der Bemessungsfall mit  $k_{DW} = 10^{-6} \text{m/s}$  (vor allem im Bauzustand wichtig) liegt daher in Bezug auf die Schlitzwand im Bereich wirksamer Abdichtung.

Die Durchlässigkeiten der Tonschicht wurden für die dargestellten Kurven mit  $k_T < 10^{-4} \text{m/s}$  aufgenommen, wobei  $k_T = 10^{-4} \text{m/s}$  nach Bild 15 einem Fehlstellenprozentsatz von 36 % (bei  $k_{DW}=0$ ) entspricht. Größere Durchlässigkeiten bzw. mehr Fehlstellen der Tonschicht vergrößern den Potentialanteil  $h'$  beträchtlich. Dies kann (für  $k_{DW} = 0$ ) an dem Bild 9 studiert werden.

Die großen Gradienten aller Kurven des Bildes 8 liegen im Bereich  $10^{-4} \text{m/s} > k_{DW} > 5 \cdot 10^{-6} \text{m/s}$ . Da die Durchlässigkeiten der durch die Dichtungswand abgeschnittenen sandigen Kiese etwa bei  $5 \cdot 10^{-3} \text{m/s}$  liegen, kann aus den Graphiken der Potentialanteile  $h'$  geschlossen werden, daß die Verringerung der Baugrunddurchlässigkeit durch Dichtungsmaßnahmen (z.B. Schlitzwand) von 3 Zehnerpotenzen ( $5 \cdot 10^{-3} \text{m/s}$  auf  $5 \cdot 10^{-6} \text{m/s}$ ) den gewünschten hohen Potentialabbau im Dichtungssystem erzeugt, falls die Schlitzwand in eine geringer durchlässige Schicht einbindet ( $k_T < 10^{-4} \text{m/s}$ ). Bei Nichtvorhandensein der Tonschicht ( $k_T > 10^{-4} \text{m/s}$ ) und ausreichender Dichtigkeit der Wand ( $k_{DW} < 10^{-6} \text{m/s}$ ) ergibt sich die bekannte Erscheinung /3/, daß eine Vertikalwand ohne Einbindung in gering durchlässige Schichten nur begrenzte Wirkung besitzt (siehe Bild 9 für  $h'$ , Punkt 6 für Q).

## 5 Auftrieb auf die Wehrplatte

Beim Problem des Auftriebes spielen 3 Größen eine Rolle:

- Das Eigengewicht - EG - der Platte (bei dicker Platte wird Strömungsfeld eingeengt)
- Die Wasserauflast - W - (von der Betonoberkante und dem UW-Stand abhängig)
- Die Größe der Sohlwasserdruckkraft - S - (von geometrischen, hydrologischen und geologischen Parametern abhängig).

Bei festliegender Geometrie sind die beiden ersten Größen nur vom UW abhängig, sie werden nicht weiter verfolgt. Der Sohlwasserdruck ist aus der Potentialverteilung in jedem Knoten errechenbar. Es gilt:

Armbruster: Die Sickerwasserströmung

$$p/\gamma = h - z = (h_{uw} + h' \cdot \Delta H/10) - z = (h_{uw} - z) + h' \cdot \Delta H/10$$

- mit :  $h_{uw}$  = Wasserstand des UW  
 $z$  = geodätische Höhe des Knotens  
 $h'$  = Potentialanteil für  $\Delta H = 10$  m  
 $p/\gamma$  = Sohlwasserdruck  
 $\Delta H$  = Differenz Oberwasser/Unterwasser.

Bei fester Geometrie und UW ergibt sich  $p/\gamma$  für jeden Knoten aus einer Konstanten ( $h_{uw} - z$ ) und einem Potentialanteil aus  $\Delta H$ . Für den Retentionsfall sind in Bild 10.1 die Sohlendruckkoordinaten

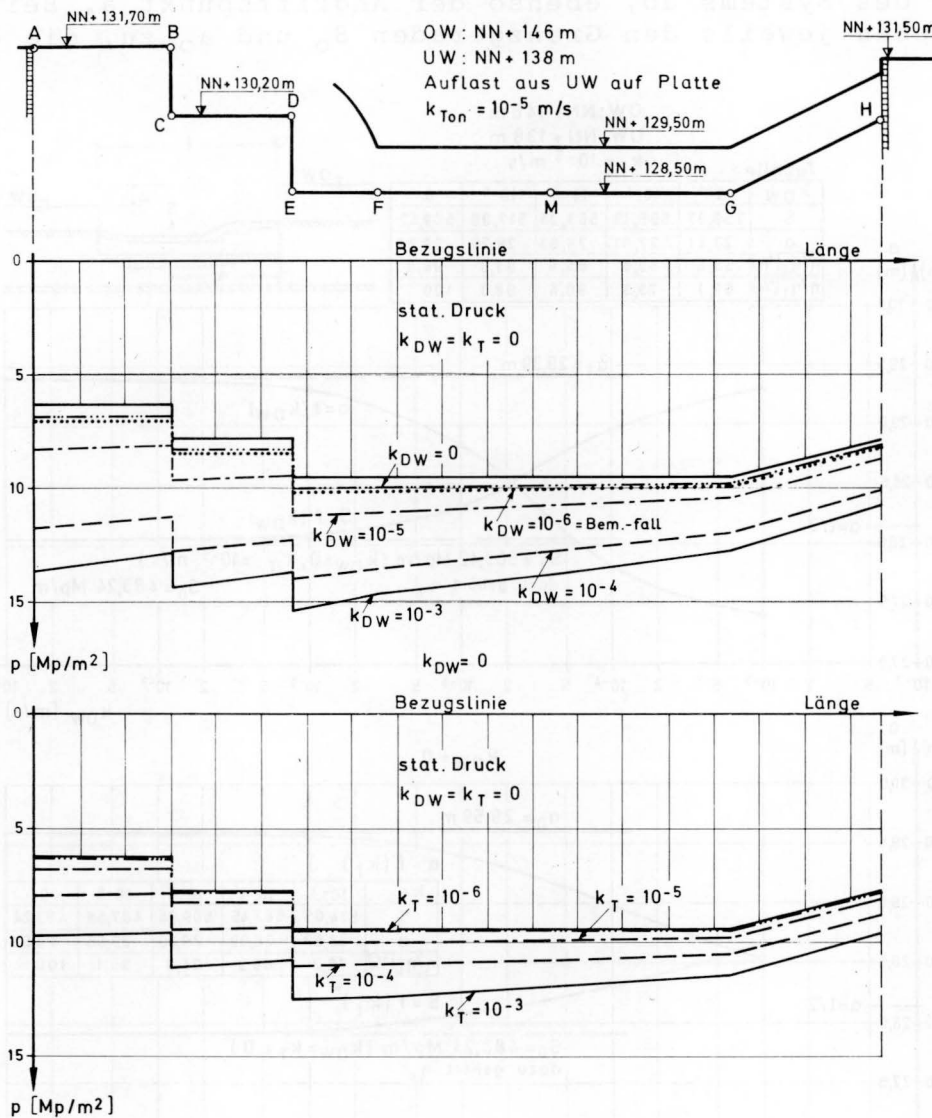


Bild 10 Sohlendruckkoordinaten des Retentionsfalls in Abhängigkeit 10.1 von  $k_T$  ( $k_{DW} = 0$ ) 10.2 von  $k_{DW}$  ( $k_T = 0$ )

unter der Wehrplatte in Abhängigkeit von  $k_T$  aufgezeichnet ( $k_{DW} = 0$ ), in Bild 10.2 in Abhängigkeit von  $k_{DW}$  ( $k_T = 10^{-5} \text{ m/s}$ ). Die Kurven zeigen die gewohnte Trapezform nur im Bereich waagerechter Sohle. Durch die Abtreppung nimmt der UW-abhängige Sohlendruck ab, bei  $k_{DW} = k_T = 0$  ist nur der statische Druck vorhanden. Der Einfluß von  $k_{DW}$  auf den Druck  $p$  an einem Knoten ist dabei größer als der Einfluß von  $k_T$ .

In dem Bild 11 sind für den Retentionsfall ( $\Delta H = 8 \text{ m}$ ) aus den  $p$ -Werten die auf die Unterkante der Platte wirkenden resultierenden Druckkräfte  $S$  aus Unterströmung (von  $\Delta H$  abhängig) und Eintauchen des Wehrkörpers ins Wasser (vom UW-Stand abhängig) mit ihrem Angriffspunkt eingezeichnet.  $S$  hängt von der Dichtwirkung des Systems ab, ebenso der Angriffspunkt  $a$ . Beide Kurven streben jeweils den Grenzgeraden  $S_0$  und  $a_0$  zu, die durch

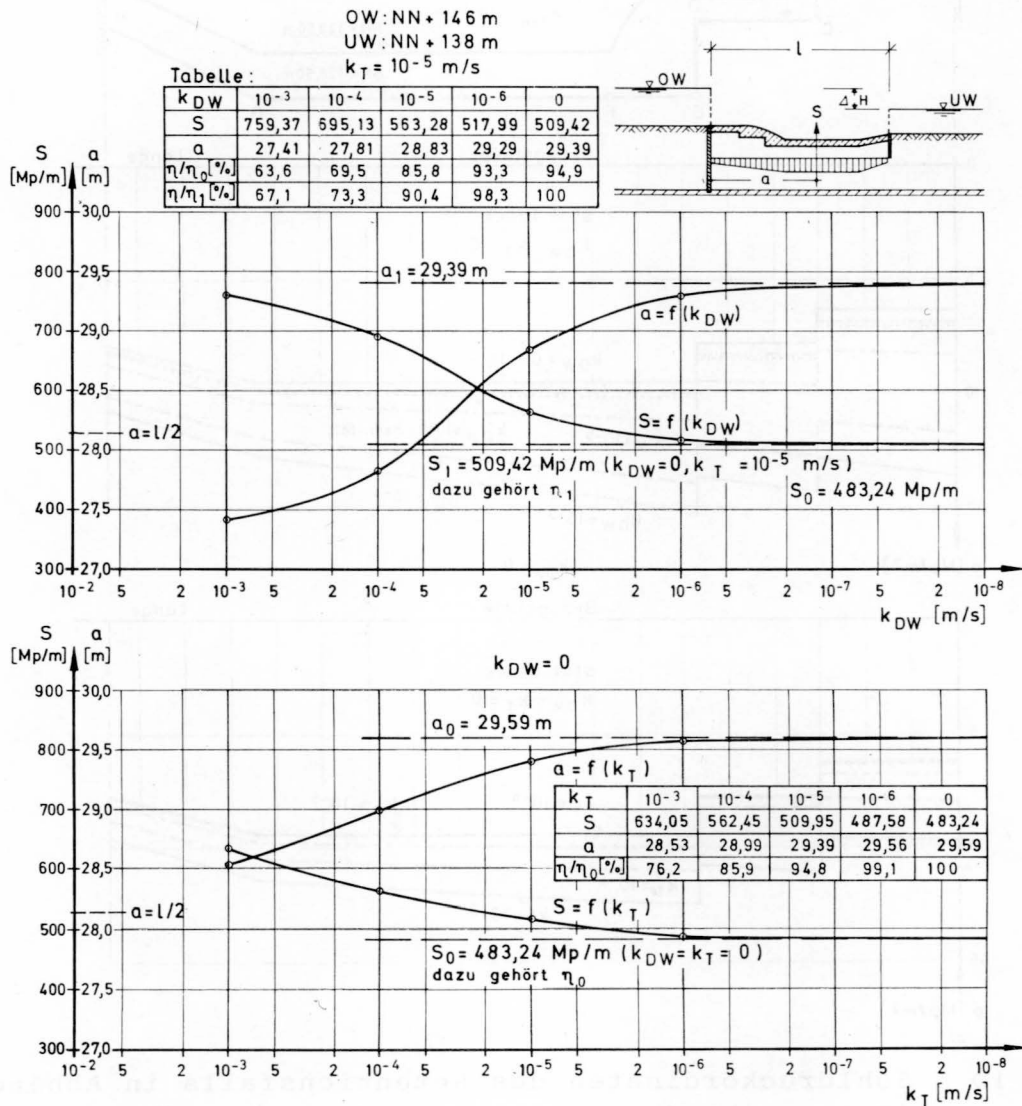


Bild 11 Resultierende Sohlwasserdruckkraft auf die Platte und deren Angriffspunkt in Abhängigkeit  
11.1 von  $k_T$  ( $k_{DW} = 0$ )      11.2 von  $k_{DW}$  ( $k_T = 0$ )

das Fehlen einer Unterströmung ( $k_{DW} = k_T = 0$ ) vorgegeben sind. Generell gilt: Bei Zunahme der Dichtwirkung des Systems nimmt die Sohlwasserdruckkraft ab, der Angriffspunkt der Resultierenden wandert dabei in Richtung Unterwasser. Entsprechend hängt die Sicherheit

$$\eta = \frac{EG + W}{S}$$

gegen Aufschwimmen der Platte von der Dichtwirkung des Systems ab.

Die Tabellen des Bildes 11 zeigen die Abnahmen der Sicherheiten in %, wenn für den Grenzfall für  $S_0$  ein  $\eta_0$  von 100 % eingesetzt wird.

## 6 Unterströmungsmenge

Die Unterströmungsmenge  $Q$  pro lfd. m wird durch das EDV-Programm selbsttätig errechnet aus den Knotenpunktergiebigkeiten entlang der Randpotentiallinien RP (Bild 4), sie läßt sich aber auch aus der Potentialverteilung mit den üblichen Verfahren rechnen (Stromröhren mit Querschnitt  $F$ ,  $Q = v \cdot F$ ,  $v = k \cdot i$ ,  $i = \Delta h / \Delta l$ ,  $\Delta h$  und  $\Delta l$  aus Bild).

Die Unterströmungsmenge  $Q$  ist (analog zum Potentialanteil  $h'$ ) direkt proportional der Wasserspiegeldifferenz  $\Delta H$ , auch im Fall von Entlastungsöffnungen, an denen keine Reibungsverluste angenommen werden.

Das Bild 12 zeigt bei  $k_{DW} = 0$  die Abhängigkeit der Unterströmungsmengen mit und ohne Entlastungsöffnungen von der Durchlässigkeit des Tons, das Bild 13 zusätzlich die Abhängigkeit von

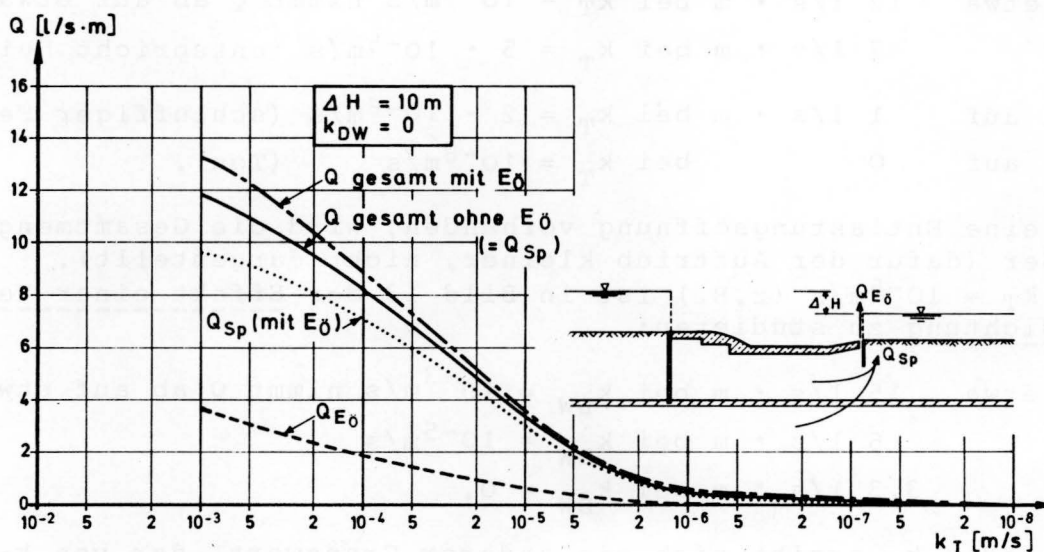


Bild 12 Unterströmungsmenge mit und ohne Entlastungsöffnungen in Abhängigkeit von  $k_T$

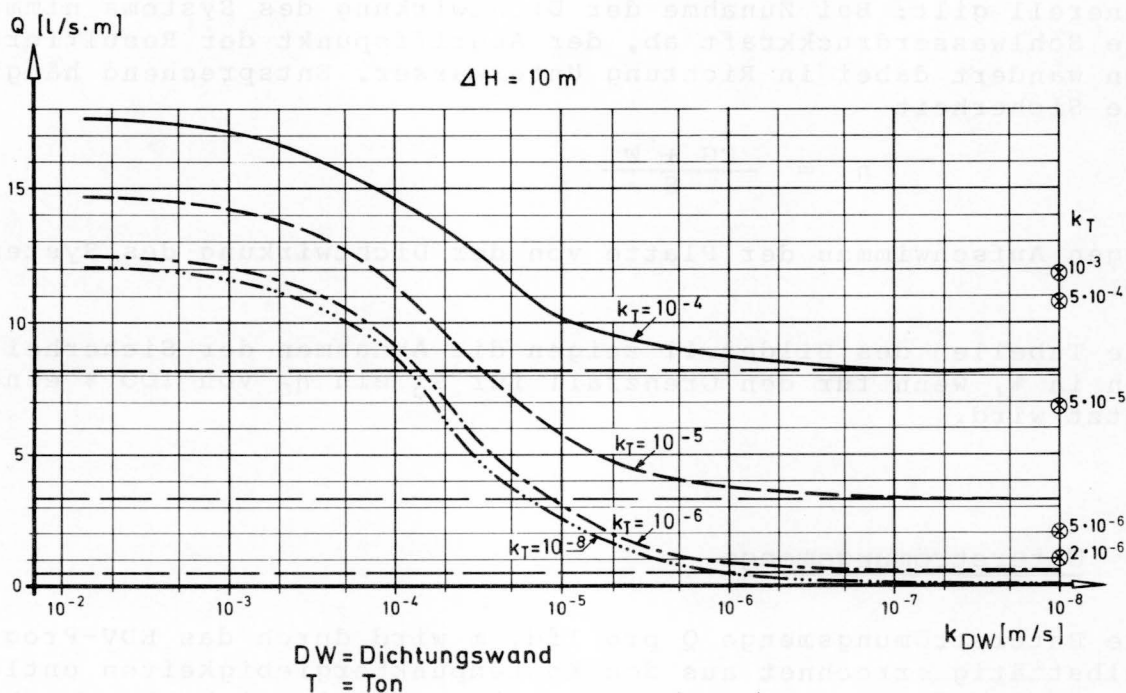


Bild 13 Unterströmungsmenge in Abhängigkeit von  $k_{DW}$  und  $k_T$

der Durchlässigkeit der Dichtungswand. Die Unterströmungsmenge nimmt ab bei kleiner werdenden  $k$ . Aus den Kurven ist für  $\Delta H = 10 \text{ m}$  für jede Kombination von  $k_{DW}$  und  $k_T$  ein  $Q$  abzulesen; interessant sind die Extremfälle:

Für  $k_{DW} = 0$  ist in Bild 12 der Effekt eines Wasserstauers zu studieren:

Von etwa  $12 \text{ l/s} \cdot \text{m}$  bei  $k_T = 10^{-3} \text{ m/s}$  nimmt  $Q$  ab auf etwa  
 $7 \text{ l/s} \cdot \text{m}$  bei  $k_T = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$  (entspricht Feinsand)  
 bzw. auf  $1 \text{ l/s} \cdot \text{m}$  bei  $k_T = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$  (schluffiger Feinsand)  
 bis auf  $0$  bei  $k_T = 10^{-8} \text{ m/s}$  (Ton).

Ist eine Entlastungsöffnung vorhanden, wird die Gesamtmenge größer (dafür der Auftrieb kleiner, nicht dargestellt). Für  $k_T = 10^{-5} \text{ m/s}$  (z.B.) ist in Bild 13 der Effekt einer Vertikal-dichtung zu studieren:

Von etwa  $15 \text{ l/s} \cdot \text{m}$  bei  $k_{DW} = 10^{-3} \text{ m/s}$  nimmt  $Q$  ab auf etwa  
 $6 \text{ l/s} \cdot \text{m}$  bei  $k_{DW} = 10^{-5} \text{ m/s}$   
 und  $3,3 \text{ l/s} \cdot \text{m}$  bei  $k_{DW} = 0$ .

Für jedes  $k_T$  ergibt sich ein anderer Grenzwert, der von  $k_{DW}$  abhängt.



## 7 Fehlstellen der Tonschicht

In der Tonschicht wurden gleichmäßig verteilte Fehlstellen eingebaut, in denen der Ton durch den darunter liegenden Boden ersetzt wurde. Aus den gerechneten Unterströmungsmengen (Bild 14), die mit Zunahme der Fehlstellen anwachsen, wurde durch Vergleich mit den  $Q$  ohne Fehlstellen (aber variablen  $k_T$ ) eine Kurve (Bild 15) erstellt, die dem Prozentsatz der Fehlstellen in der Tonschicht eine gleichmäßig reduzierte fiktive Durchlässigkeit der Tonschicht  $k'_T$  gegenüberstellt. Der gezeichnete Zusammenhang gilt daher strenggenommen nur für  $Q$ :

Ein Fehlstellenanteil von 9 % reduziert  $k_T$  von  $k_T = 10^{-8} \text{ m/s}$  auf  $k'_T = 10^{-5} \text{ m/s}$  (für Bemessungsfall verwendet), 36 % Fehlstellen entsprechen  $k'_T = 10^{-4} \text{ m/s}$ , 75 % Fehlstellen  $k'_T = 10^{-3} \text{ m/s}$ .

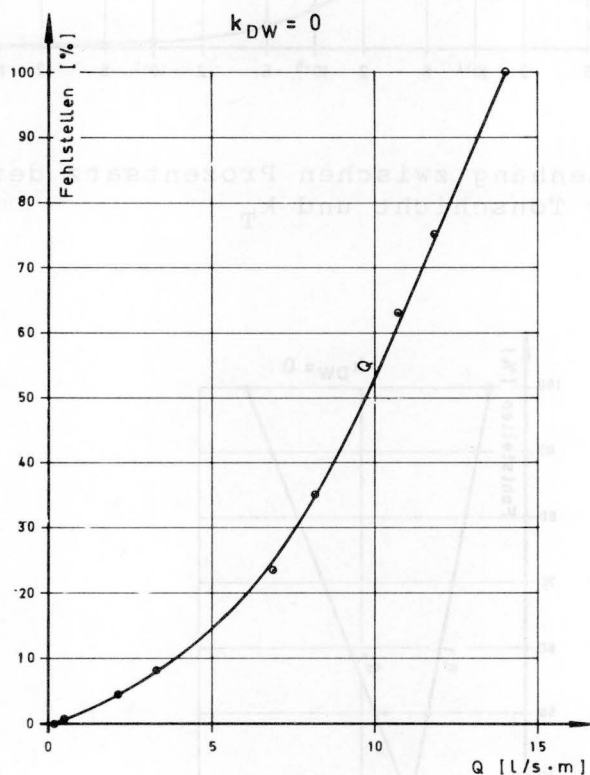


Bild 14 Unterströmungsmenge in Abhängigkeit vom Prozentsatz der Fehlstellen in der Tonschicht

Entsprechend nehmen die Sohldruckkräfte zu bei zunehmendem Fehlstellenanteil und die Sicherheiten gegen Aufschwimmen ab (Bild 16). In dem Bild 16 sind die Kräfte bzw. Sicherheiten nur für den getrennt betrachteten, nicht verankerten Teil I der Wehrplatte (Bild 3) gezeichnet (OW auf NN + 146 m, UW auf NN + 138 m).

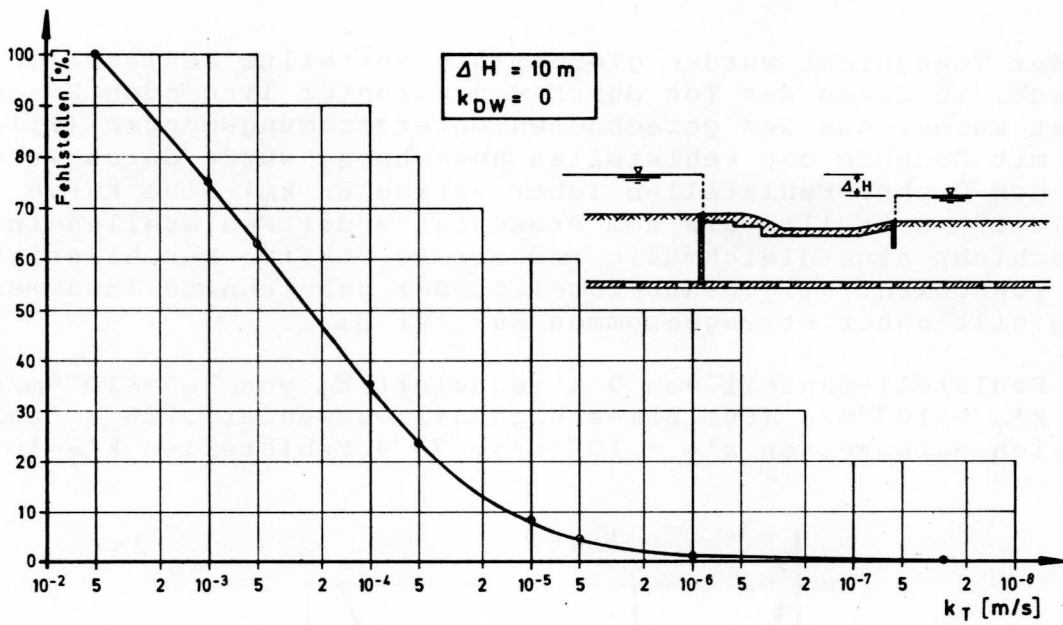


Bild 15 Zusammenhang zwischen Prozentsatz der Fehlstellen in der Tonschicht und  $k_T$

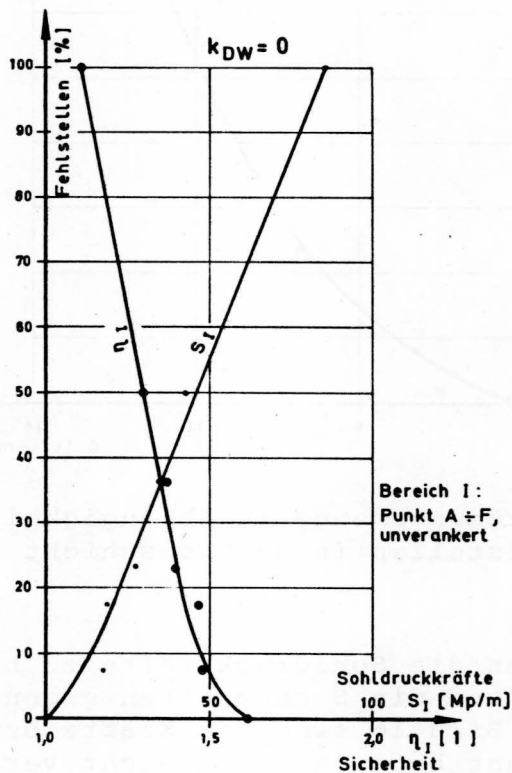


Bild 16 Sohldruckkräfte und Sicherheit gegen Aufschwimmen in Abhängigkeit vom Prozentsatz der Fehlstellen in der Tonschicht

Für den verankerten Teil II sind in die Sicherheiten gegen Aufschwimmen die Pfahlkräfte einzuarbeiten. Die Beanspruchung der Pfähle hängt in jedem Fall von  $k_{DW}$  und  $k_T$  (bzw.  $k'_T$  wegen Fehlstellen) ab.

## 8 Hydraulischer Grundbruch, Ausspülungen

Zur Vermeidung von hydraulischem Grundbruch und Ausspülungen am Tosbeckenende wurde eine konstruktive Spundwand geschlagen. Es wird angenommen, daß sie durch den Strömungsvorgang gedichtet wird. Das Potential am Fußpunkt der Spundwand hängt zwar ebenfalls wie das anderer Punkte von den Dichtigkeiten der Schlitzwand und der Tonschicht ab, der Potentialanteil  $h'$  bleibt aber unter 20 % (Bild 11). Die nach üblichen Verfahren gerechneten Sicherheiten gegen hydraulischen Grundbruch /4/ sind daher für alle Fälle größer als erforderlich. Die vorhandene 8,5 m lange Spundwand hält das Strömungsgefälle klein und verhindert daher ein Eindringen der Feinanteile der sandigen Kiese (Kontaktsuffosion) in die darüber liegenden stark durchlässigen sandarmen Kiese (Bild 4). Im Bemessungsfall (Bilder 6 und 4) beträgt das mittlere Gefälle in den sandigen Kiesen

$$i = \frac{0,366}{(127,4-123,0)} \cdot \frac{\Delta H}{10} = 0,008 \cdot \Delta H,$$

im Fall ohne wirksame Schlitzwand ungefähr  $i = 0,045 \cdot \Delta H$ .

Für den Retentionsfall ( $\Delta H = 8$  m) würden bei Fehlen der Schlitzwandwirkung dadurch gefährliche Gefälle entstehen, die zu Ausspülungen führen könnten. /5/

## 9 Zusammenfassung

Die Stauanlage Kulturwehr Kehl liegt im Restrheinbereich der Staustufe Straßburg, der letzten Stauhaltung des zweiten Abschnitts des Oberrheinausbaus ("Schlingenlösung"). Sie ermöglicht einen Aufstau des Wassers zur Grundwasserstützung und die Retention von Hochwässern. Die Wehranlage wurde auf die stark durchlässigen sandigen Kiese unter der Rheinsohle gegründet. Eine Tonschicht in etwa 20 m unter Gelände bildet zusammen mit Schlitzwänden ein Abdichtungssystem, dessen Wirksamkeit großen Einfluß auf die Sickerströmung und damit auch auf die Standsicherheiten hat.

Der vorstehende Bericht bildet den Teil I einer Gesamtuntersuchung über Sickerströmung im Bereich der Stauanlage, die Teile II und III folgen.

Im vorliegenden Teil I wird für den Endzustand der Einfluß der Durchlässigkeiten der künstlichen Vertikaldichtung (Schlitzwand im OW) und der natürlichen Horizontaldichtung (Tonschicht) untersucht.



Aus den Graphiken läßt sich für jede Kombination beider Durchlässigkeiten die Unterströmungsmenge und der Auftrieb berechnen. Außerdem wird der Einfluß von Fehlstellen der Tonschicht untersucht. Die Untersuchungen bestätigten die Erfahrung, daß eine befriedigende Abdichtwirkung eintritt, wenn die Durchlässigkeiten der Abdichtung mit gering durchlässigen Materialien im Verhältnis  $\leq 1:1000$  zum anstehenden Baugrund stehen.

## 10 Literatur

- /1/ Fröhlich, H. Die Geschichte des Oberrheinausbaus.  
Die Wasserwirtschaft 65 (1975) Heft 9, S. 219 - 222
- /2/ Martens, W.;  
Klose, H. Die Staustufe Iffezheim.  
Die Wasserwirtschaft 65 (1975) Heft 9, S. 222 - 225
- /3/ Polubarinova-Kochina, P. Theory of Groundwater Movement.  
Princeton University Press 1962
- /4/ Davidenkoff, R. Unterläufigkeit von Stauwerken.  
Düsseldorf: Werner Verlag 1970
- /5/ Busch, K.-F;  
Luckner, L. Geohydraulik.  
Leipzig: VEB-Verlag für Grundstoffindustrie 1973
- /6/ Lühr, H.-P.;  
Zipfel, K. Grundwassermodelle und ihr praktischer Einsatz.  
DVGW - Schriftenreihe Wasser (1975), Nr. 9