

Tagungsbericht

3. Kolloquium Hydrogeologie

zum Thema

U F E R F I L T R A T I O N

VEB Hydrogeologie

Betriebssektion der Kammer der Technik

Tagungsbericht

3. Kolloquium Hydrogeologie

zum Thema

U F E R F I L T R A T I O N

Autorenkollektiv

**(Vorträge gehalten anlässlich des 3. Kolloquiums
Hydrogeologie am 5. September 1974 in Erfurt)**

**mit einem Vorwort von Dipl.-Geol. J. Henke,
Arbeitsgruppenleiter Prozeßanalyse im
VEB Hydrogeologie und Mitglied der Bezirks-
sektion Wasser des Bezirksverbandes der KDT
Erfurt**

**VEB Hydrogeologie, Betriebssektion der Kammer der Technik,
Nordhausen 1975**

V o r w o r t

Die Versorgung der Bevölkerung, Industrie und Landwirtschaft mit Wasser entsprechend dem ständig anwachsenden Bedarf ist eine Voraussetzung für die Erfüllung der Beschlüsse des VIII. Parteitagess der Sozialistischen Einheitspartei Deutschlands. Die Verteilung und der extrem hohe Nutzungsgrad der Wasserressourcen in der DDR erfordern deren exakte Erfassung und Bilanzierung sowie optimale Nutzung. In der Grundwassererkundung und -erschließung gewinnt die künstliche Grundwasseranreicherung mittels Infiltrationsanlagen und Uferfiltration zunehmende Bedeutung. Die zuständigen Institutionen der Wasserwirtschaft und Geologie haben in letzten Jahren umfangreiche Forschungskapazität zur Schaffung der methodischen Grundlagen für die Erfassung des Filtrationsgeschehens mit seinen zahlreichen Einflußfaktoren eingesetzt. Die enge Zusammenarbeit der Wissenschaftler und die Koordinierung der Teilaufgaben ist für die Gewährleistung einer hohen Effektivität unabdingbar. Gleichmaßen ist die kontinuierliche Erprobung der Teilergebnisse in der Praxis und die daraus resultierende Präzisierung der Aufgabenstellung erforderlich. Das 3. Kolloquium Hydrogeologie war diesem Anliegen gewidmet, indem von den Bearbeitern der Teilaufgaben auf dem Gebiet der Uferfiltration vor einem größeren Kreis von Fachleuten aus Praxis und Forschung der mit Erkundung, Projektierung, Erschließung oder Nutzung von Grundwasser beauftragten Institutionen über den Stand der Forschung berichtet wurde. Zur weiteren Verbreitung und praktischen Anwendung dieser Kenntnisse werden die Vorträge in der vorliegenden Broschüre wiedergegeben. Damit wird die Erwartung verbunden, einen Beitrag zur Erreichung der anspruchsvollen Ziele in der perspektivischen Wasserversorgung der DDR durch den Nachweis zusätzlicher Grundwasservorräte zu leisten.

J. Henke

Dipl.-Ing. D. Heeger
VEB Hydrogeologie,
Arbeitsstelle Dresden

Umfang und Stellung der Uferfiltraterkundung im Prozeß der hydrogeologischen Erkundung

1. Bedeutung der Uferfiltration für die Wasserversorgung - Notwendigkeit der Nutzung von Uferfiltratvorräten

Die Bedeutung der Uferfiltration für die Wasserversorgung resultiert unmittelbar aus der hydroökonomischen Notwendigkeit der Nutzung von Uferfiltratvorräten für die Versorgung von Bevölkerung, Industrie und Landwirtschaft. Die natürlichen Grundwasservorräte sind in vielen Versorgungsgebieten zur Deckung des Wasserbedarfs bereits erschöpft. Insbesondere in industriellen Ballungsgebieten wird daher Oberflächenwasser direkt oder indirekt genutzt.

Die direkte Nutzung, also die unmittelbare Entnahme, erfolgt im wesentlichen vermittels Talsperren, die bekanntlich hauptsächlich in den relativ gering abwasserbelasteten Flußoberläufen errichtet werden. Über Fernwasserleitungen werden die Bedarfsgebiete versorgt. Dagegen steht der direkten Entnahme aus der fließenden Welle im Bereich der Mittel- und Untertläufe der Flüsse die außerordentlich hohe Verschmutzung des Wassers entgegen. Nur durch eine intensive Aufbereitung, die technisch und ökonomisch erhebliche Schwierigkeiten bereitet, kann dieses Wasser nutzbar gemacht werden. Hinzu kommt, daß die Temperaturvergleichmäßigung - ein wesentliches Gütekriterium - nicht erreicht wird.

Daher erlangt die indirekte Nutzung des Oberflächenwassers über dessen Versickerung in den Grundwasserleiter zunehmende Bedeutung. Auf Grund der hierbei stattfindenden Bodenpassage wird sowohl dessen physikalische Gütebesserung (Temperaturangleichung), als auch dessen chemische und

bakteriologische Besserung erreicht.

Gegenwärtig werden 2 Verfahrenswege der indirekten Oberflächenwassernutzung beschriftet:

- Uferfiltration, bei der auf Grund des Betriebes ufernaher Wasserfassungen das Eindringen des Oberflächenwassers durch das Gewässerbett in den Wasserleiter erzwungen wird.
- Grundwasseranreicherung über Sickerbecken, Schluckbrunnen etc., folglich eine künstliche Zuführung von Wasser in den Grundwasserleiter.

Die Uferfiltration nutzt die natürlichen Gegebenheiten innerhalb des Gewässerbettes und des Grundwasserleiters bei geringstem Aufwand äußerst vorteilhaft zur Wassergewinnung aus, während die Grundwasseranreicherung umfangreiche technische Anlagen und einen bedeutend größeren Betriebsaufwand erfordert. Allerdings muß in diesem Zusammenhang auch bemerkt werden, daß sich die ständig zunehmende Verschmutzung der Gewässer nachteilig auf die Qualität des Infiltrates auswirkt, eine weitere Aufbereitung unumgänglich ist. Außerdem bewirkt der hohe Verschmutzungsgrad eine ständige Verminderung der Versickerungsleistung infolge fortschreitender Kolmation der Kontaktfläche zwischen Oberflächenwasser und Grundwasserleiter, die bei den Verfahren der Grundwasseranreicherung durch technische Regenerierung der Versickerungsfläche behoben werden kann, die jedoch bei der Uferfiltration praktisch nicht abwendbar ist.

2. Stellung der Uferfiltration im hydrogeologischen Erkundungsprozeß

Im System unserer derzeitigen Wasserversorgung nimmt die Uferfiltration einen bedeutenden Rang ein. Davon zeugen allenfalls die umfangreichen Uferfiltratanlagen. Es sei hierbei nur auf die Uferfiltratfassungen im Raum Berlin verwiesen: Friedrichshagen, Johannistal, Wuhlheide, die mit

einer Förderleistung von über 100 000 m³/d einen erheblichen Beitrag zur Wasserversorgung leisten. Etwa 25 % aller gegenwärtig in der VVB Wasserversorgung und Abwasserbehandlung zusammengefaßten Wasserfassungen sind Uferfiltratanlagen. Entsprechend den statistischen Unterlagen ist auch in nächster Zukunft mit einer fortschreitenden Erhöhung des industriellen Wasseraufkommens zu rechnen, wodurch insbesondere die Uferfiltration weiter an Bedeutung gewinnen wird. Dieser Trend wird auch durch die Entwicklung der Uferfiltraterkundung im VEB Hydrogeologie bestätigt (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1

Uferfiltraterkundung im VEB Hydrogeologie 1970 - 1975

Jahr	Erkundungsvorhaben (durchgeführt/vorgeesehen)	Uferfiltratvorräte	Prozentualer Anteil des Uferfiltratvorrates am nachgewiesenen Gesamtvorrat
	Anzahl	km ³ /a	%
1970	7	17,5	1
1971	3	4,45	3
1972	9	15,9	13,6
1973	4	25,3	26
1974	5	28,1 x)	22,4
1975	9	84,6 x)	45

x) Plan

Die vorstehenden Zahlen vermitteln folgende generelle Entwicklungstendenzen:

- Der Anteil des Uferfiltratvorrates am nachgewiesenen Gesamtvorrat ist stark zunehmend.

Die nachgewiesene Uferfiltratmenge pro Erkundungsvorhaben ist auffallend ansteigend, die Erkundungsvorhaben werden umfangreicher.

Für die hydrogeologische Erkundungspraxis resultiert hieraus die Forderung, dieser progressiven Tendenz insbesondere wissenschaftlich-methodisch wie selbstverständlich auch technisch gerecht zu werden.

3. Methodik zur Erkundung von Uferfiltratvorräten

Mit der Erarbeitung einer problemorientierten "Erkundungsmethodik Uferfiltratvorräte" im Jahre 1973 wurde obiger wissenschaftlich-methodischer Zielstellung im VEB Hydrogeologie in einem ersten Schritt entsprochen. Die nachfolgenden Darlegungen sollen mit den Grundgedanken dieser Arbeit vertraut machen und damit auf die Komplexität des Uferfiltratvorratsnachweises hinweisen.

Anliegen einer Erkundungsmethodik ist es, ein allgemeines methodisches Konzept aufzuzeigen, die Bestimmungsverfahren anzugeben und insbesondere die dafür benötigten Parameter, die Art der erkundungstechnischen Parameterbestimmung zu beschreiben. Voraussetzung hierfür ist eine Analyse des Uferfiltrationsprozesses, aus der die Zusammenhänge und Abhängigkeiten sowie die Mechanismen der Uferfiltration hervorgehen. In der "Erkundungsmethodik Uferfiltratvorräte" wurde dieser Forderung entsprochen. In einem einleitenden Kapitel wurden die wichtigsten Merkmale und deren Einflüsse auf den Prozeß der Uferfiltration herausgearbeitet. Hieraus resultiert die Darstellung des hydrogeologischen Systems der Uferfiltration, welches für den Erkundungspraktiker ein wesentliches Hilfsmittel zur Herausbildung seiner Modellvorstellung und mithin Grundlage für die Anwendung der Erkundungsmethodik ist.

Hydrogeologisches System der Uferfiltration

Voraussetzung für die Uferfiltration ist das Vorhandensein eines Gewässers als Speisungsobjekt, eines Grundwasserleiters und dessen hydraulische Kommunikation mit dem Gewässer. Durch die Grundwasserabsenkung in einer in Ufernähe angeordneten Fassungsanlage wird zum Wasserspiegel des Oberflächengewässers ein Potentialunterschied bewirkt, der das Oberflächenwasser zwingt, in den Wasserleiter einzudringen und als Uferfiltrat den Fassungen zuzuströmen. Da der Grundwasserleiter auch landseitig der Brunnen eine mehr oder weniger große Ausdehnung besitzt, gelangt neben dem Uferfiltrat auch das im unterirdischen Einzugsgebiet neugebildete Grundwasser in die Fassungen. Somit ist das hier geförderte Rohwasser mengen- und gütemäßig ein Mischwasser aus Uferfiltrat und sich erneuerndem Grundwasser. Folglich umfassen die hydrogeologischen Zusammenhänge bei der Uferfiltration sowohl die Vorgänge zwischen den Fassungen und dem Gewässer, als auch die Vorgänge landseitig der Fassungen, einschließlich ihrer Wechselwirkungen.

Die Mischwasserkomponente Uferfiltrat ist an drei grundsätzlich methodische Einheiten gebunden, die durch zahlreiche Merkmale gekennzeichnet sind und die umfangreiche Einflüsse auf den Vorgang der Uferfiltration ausüben:

- Gewässer
- Randfläche Gewässer/Grundwasserleiter
- Grundwasserleiter

Der Mischwasserkomponente Landgrundwasser ist die Einheit

- landseitiger Grundwasserleiter

zugeordnet.

Tabelle 2 zeigt in einer Zusammenstellung die wichtigsten Merkmale der Uferfiltration und deren wesentlichste Einflüsse auf den Uferfiltrationsvorgang.

Gewinnbarer Vorrat

(Mischwasser aus Uferfiltrat und Landgrundwasser)

Uferfiltrat

Landgrundwasser

Ein- heit	Merkmal	Einfluß	Ein- heit	Merkmal	Einfluß
Gewässer	1. <u>Hydrolog. Merkmale</u>		Landseitiger Grundwasserleiter	1. <u>Hydrogeolog. Merkmale</u>	
	- Abfluß	Uferfiltratmenge Kolmation		- Lagerungsverhältnisse (Einlagerungen, Strömungen, Bedeckung, Mächtigkeit)	Landgrundwassermenge,
	- Wasserstand	Uferfiltratmenge, Absenkungsverhältnisse im Strömungsfeld		- Lithologie	Absenkungsverhältnisse im Strömungsfeld
	2. <u>Wasserbeschaffungsmerkmale</u>	Mischwasser- güte Kolmation		- Parameter (K, T, So)	
	3. <u>Geohydraul. Merkmale</u>			- Begrenzung (vertikal, horizontal)	
	- unvollkommene äußere Berandung	Absenkungsverhältnisse im Strömungsfeld		- Dynamik (Gefälle, Druckverhältn., Wasserstand)	
	4. <u>Merkmale aus Wasserbau u. Verkehrswesen</u>			2. <u>Hydrolog. Merkmale</u>	
	- Stauanlagen	Uferfiltratmenge Kolmation		Grundwasserneubildung (meteorolog. Daten, Bodenart, Vegetat.)	Landgrundwassermenge
	- Baggerarbeiten	Kolmation			
	- Deichanlagen	Kolmation			
- Schiffsverkehr	Kolmation				

Einheit	Merkmal	Einfluss
	<p>5. Merkmale der Gewässer-morphologie</p> <ul style="list-style-type: none"> - Erosion - Anlandung <p>6. Sonstige Merkmale</p> <ul style="list-style-type: none"> - Wassertiere - Wellenschlag (Wind) 	<p>Kolmation</p> <p>Kolmation</p> <p>Kolmation</p> <p>Kolmation</p>
Randfläche Gewässer/ Grundwasserleiter	<p><u>Geohydraul.Merkmale</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Kommunikation - Kolmation 	<p>Kontinuität der Filterströmung</p> <p>Uferfiltratmenge, Kontinuität d. Filterströmung</p> <p>Eliminierung von Wasserinhaltsstoffen</p>

Einheit	Merkmal	Einfluss
	<p>3. <u>Wasserbeschaffenheitsmerkmale</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - natürliche Grundwasserbeschaffenheit - geogene hydrochemische Anomalien - anthropogene hydrochemische Anomalien 	<p>Mischwassergüte</p> <p>Mischwassergüte bei besonderem Wirken hydrochemischer Störeinflüsse</p>

6

Ein- heit	Merkmal	Einfluß
	<p><u>Hydrogeolog. Merkmale</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Lagerungsverhältnisse - Lithologie - Parameter (K, So, T) - Begrenzung 	<p>Absenkungsverhältnisse im Strömungsfeld, Kritischer Durchflußquerschnitt (Uferfiltratmenge)!</p> <p>Eliminierung von Wasserinhaltsstoffen, Temperaturangleichung, Lösungsvorgänge von im Grundwasserleiter enthaltenen hydrochem. Komponenten</p>

Erkundungsmethodik

Das erkundungsmethodische Konzept umfaßt generell die Nachweiskomplexe:

- Nachweis der Vorratsmenge
- Nachweis der Wassergüte des Vorrates
- Nachweis der Gewinnbarkeit des Vorrates.

In der nachstehenden Tabelle 3 sind die diesbezüglichen Aufgabenkomplexe zusammengestellt.

Erkundungsmethodik

Nachweis der Vorratsmenge	Nachweis der Beschaffenheit des Vorrates	Nachweis d. Gewinnbarkeit d. Vorrates
<p><u>Grundlagen f. Vorratsnachweis</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Abflußlimit 2. Hydrogeologisches Modell <ul style="list-style-type: none"> - Kommunikation - Kolmation - Hydrogeologie des Grundwasserleiters Gewässer/Fassungen - Hydrogeologie des landseitigen unterirdischen Einzugsgebietes <p><u>Vorratsnachweis</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Gewinnbarer Vorrat 2. Brunnenpiegelabsenkung in der Fassungstrasse 3. Grundwasserströmungsfeld im Absenkungszustand 	<p><u>Grundlagen für Beschaffenheitsnachweis</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Qualität des Uferfiltrates <ul style="list-style-type: none"> - Güteparameter des Oberflächenwassers - Veränderung der Güteparameter bei Bodenpassage 2. Qualität des Landgrundwassers <ul style="list-style-type: none"> - natürliche Grundwasserbeschaffenheit - geogene und anthropogene Störeinflüsse <p><u>Beschaffenheitsnachweis</u></p> <p>Berechnung der Mischwasserqualität</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Art der Gewinnungsanlage 2. Räumliche Anordnung <ul style="list-style-type: none"> - Abstand vom Gewässerufer - Ausdehnung parallel zum Gewässerufer - Abstand der Brunnen untereinander 3. Dimensionierung der Fassungen <ul style="list-style-type: none"> - Brunnenentnahmemenge - Brunnenausbau - Förderart

Dem Nachweis der Vorratsmenge geht die erkundungstechnische Bestimmung der Grundlagen für den Vorratsnachweis voraus.

- Ermittlung des für die Uferfiltration verfügbaren Oberflächenwasserabflusses (Abflußlimit) - der auch in Niedrigwasserzeiten garantiert sein muß - unter Beachtung des landschaftlich notwendigen Mindestabflusses und des für flußabwärts gelegene Nutzer erforderlichen Abflusses.
- Erarbeitung des repräsentativen hydrogeologischen Modells
 1. durch Nachweis der hydraulischen Kommunikation Gewässer/Grundwasserleiter;
 2. durch Bestimmung der Kolmationsparameter für den Endzustand einer Kolmationsentwicklung, die auf Grund des späteren Uferfiltrationsbetriebes einsetzen wird;
 3. durch den Aufschluß der hydrogeologischen Verhältnisse im Grundwasserleiter zwischen dem Gewässer und den Fassungen sowie entlang der Trasse einer künftigen Brunnengalerie;
 4. durch den hydrogeologischen Aufschluß des landseitigen unterirdischen Einzugsgebietes bis zur natürlichen Brandung.

Nachdem diese Grundlagen für den Vorratsnachweis vorliegen, erfolgt die eigentliche Vorratsberechnung. Sie untergliedert sich in:

- Ermittlung des gewinnbaren Vorrates als Summe des Uferfiltrates und des Landgrundwassers.
- Berechnung der Brunnenpiegelabsenkungen als optimale Absenkungshöchstgrenze, die die Kontinuität der Uferfiltratströmung gewährleistet.
- Berechnung des gesamten Strömungsfeldes im Absenkungszustand, woraus u.a. Rückschlüsse auf die Beeinflussung anderer Nutzer möglich sind; Festlegung der Gewässerentzugsstrecke.

Dem Beschaffenheitsnachweis geht ebenfalls die Erkundung der Grundlagen voraus:

- Bestimmung der Uferfiltratqualität durch Ermittlung der Güteparameter des Oberflächenwassers sowie Ermittlung der Veränderung dieser Güteparameter bei der Bodenpassage Gewässer/Fassungen.
- Erkundung der Qualität des Landgrundwassers, d.h. Erkundung seiner natürlichen Beschaffenheit sowie event. geogener und/oder anthropogener Störeinflüsse.

Der Beschaffenheitsnachweis erfolgt als Berechnung der Mischwasserqualität bei Vermischung des Uferfiltrates mit dem Landgrundwasser; Voraussetzung Proportionalität von Menge und Güte beider Mischwasserkomponenten²(RIEHMANN'sche Mischungsregel).

Der Nachweis der Gewinnbarkeit umfaßt letztlich:

- Auswahl der Art der Gewinnungsanlage
- Räumliche Anordnung
- konstruktive Gestaltung und Dimensionierung der Gewinnungsanlage.

Bereits aus diesen kurzen Darlegungen wird ersichtlich, welche umfangreiche Palette das Problem Uferfiltration umfaßt. Nicht nur geologische und geohydraulische, sondern auch hydrochemische, -physikalische sowie gewässerkundliche Fragen werden aufgeworfen.

Die hierfür vorhandenen Bestimmungsverfahren und vor allem die Möglichkeiten der erkundungstechnischen Ermittlung der dafür erforderlichen Parameter sind in ihrer Aussagesicherheit noch von recht wechselhafter Zuverlässigkeit. So sind beispielsweise die geohydraulischen Berechnungsverfahren vielfältig und von hohem Niveau. Dagegen eröffnen sich auf dem Gebiet der Wassergitebestimmung, insbesondere hinsichtlich des Zusammenhanges zwischen den Beschaffenheitsparametern des Oberflächenwassers und des geförderten Ufer-

filtrates, noch viele Fragen, macht sich das Fehlen fundierter Gesetzmäßigkeiten zur Wassergüteänderung bei der Bodenpassage nachteilig bemerkbar. Analoges trifft für die Erkundung der Kolmationsparameter zu (Durchlässigkeit und Mächtigkeit der kolmatisierten Schicht, die nach Abschluß der infiltrationsproportionalen Kolmationsentwicklung vorliegt). Aus dem Wissen heraus, daß die Kolmation entscheidend den Vorratsnachweis beeinflußt, gebührt dieser Problematik vorrangige Aufmerksamkeit. Erfreulicherweise wurde diesbezüglich Ende 1973 durch den Teilabschluß zielgerichteter Forschungsarbeiten in der Sektion Wasserwesen der TU Dresden ein Fortschritt erreicht. Diese Mängel in der wissenschaftlichen Behandlung des Problems der Uferfiltration sind für die hydrogeologische Erkundung umso schwerwiegender, da die Forderungen der Auftraggeber des VEB Hydrogeologie stets auf einen unanfechtbaren Nachweis des Vorrates nach Menge und Güte ausgerichtet sind, der VEB Hydrogeologie demzufolge eine langfristig konstant gewinnbare Wassermenge und deren Qualität zu garantieren hat.

So bleibt letztlich an dieser Stelle die Forderung, die in den letzten Jahren begonnenen Forschungsarbeiten - insbesondere zur Vorausberechnung des Endzustandes der Kolmationsentwicklung im Gewässerbett - zielgerichtet fortzusetzen bzw. zu vertiefen und nicht zuletzt die Fragen des Zusammenhanges zwischen den Beschaffenheitsparametern des Oberflächenwassers und des geförderten Uferfiltrats möglichst durch Vorlage fundierter Gesetzmäßigkeiten zu lösen.

Dr.-Ing. L. Herrmann,
Institut für Wasserwirtschaft,
Berlin

Berechnungsmöglichkeiten von Uferfiltratfassungen und der
Einfluß der Randbedingungen auf den Förderbetrieb

Die Frage nach den Berechnungsmöglichkeiten von Uferfiltratfassungen gewinnt wegen der hohen Auslastung der Grundwasserressourcen sowohl beim Erkunder als auch beim Projektanten von Wassergewinnungsanlagen immer mehr an Interesse. Da bisherige Uferfiltratfassungen immer nur auf der Grundlage von Erfahrungen, Analogieschlüssen zu bestehenden Fassungen und höchstens empirisch gewonnenen Berechnungsansätzen bemessen wurden, die aber der Forderung nach einer optimalen Nutzung der Fassungsstandorte und dem Streben nach einem maximalen Wirkungsgrad der notwendigen Investitionen im allgemeinen nicht gerecht werden, sind von seiten des IfW Berlin und der TU Dresden entsprechende Forschungsarbeiten in Angriff genommen worden. Am IfW Berlin sind dazu Forschungen unter dem Thema "Methodische Untersuchungen zur Hydraulik der Uferfiltration" und in Zusammenarbeit mit der TU Dresden unter dem Thema "Einfluß der Kolmation auf die Uferfiltratgewinnung" durchgeführt worden.

Das für die Praxis direkt nutzbare Ergebnis dieser Untersuchungen ist in den "Grundsätzen für die Projektierung und den Betrieb von Uferfiltratfassungen" zusammengefaßt. Diese Grundsätze, die mit den potentiellen Nutzern VVB Wasserversorgung und Abwasserbehandlung, VEB Projektierung Wasserwirtschaft und VEB Hydrogeologie abgestimmt sind, bilden die Basis des WAPRO's 1.52 "Uferfiltratfassungen" und sind in diesem als Studie enthalten. Der WAPRO 1.52 liegt gegenwärtig als Druckvorlage vor.

Die "Grundsätze" sind entsprechend der Interessen von Erkunder, Projektant und Betreiber von Uferfiltratfassungen

gegliedert in:

1. Präambel mit Aussagen über die
 - qualitativen Veränderungen des Infiltrats
 - Kolmation als begrenzender Faktor der Förderleistung
 - geohydraulischen Zusammenhänge zwischen der Uferfiltratfassung und dem infiltrierenden Gewässer

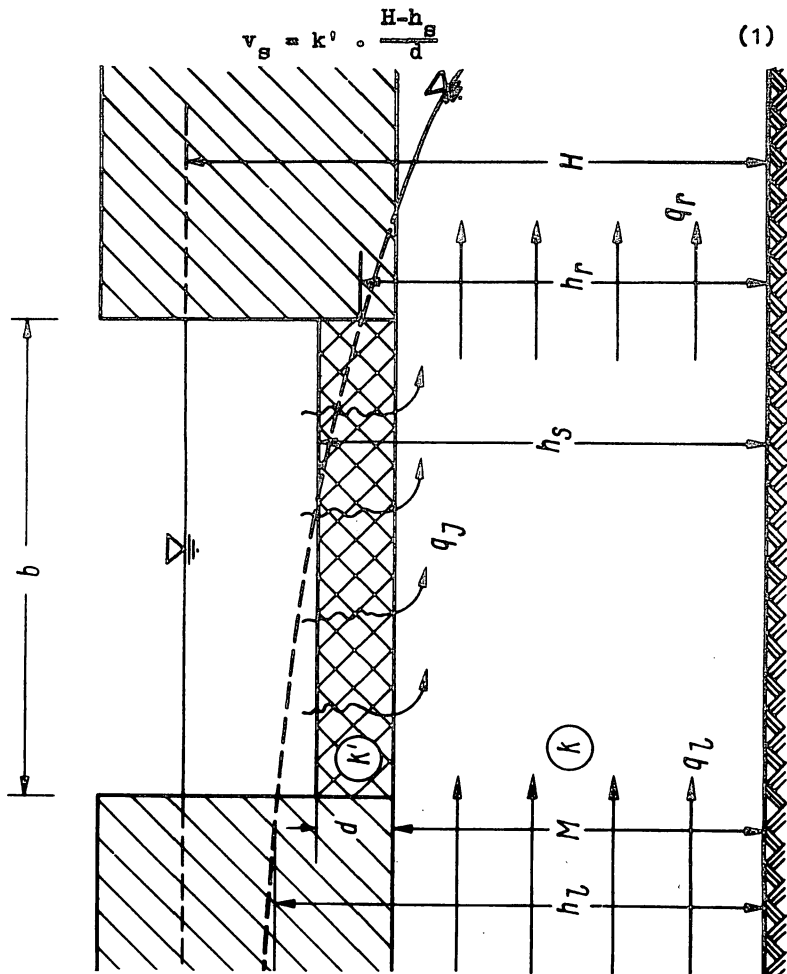
2. Erkundung von Standorten für Uferfiltratanlagen mit Angaben über die
 - überschlägige Berechnung des erforderlichen Fassungsstandortes
 - Möglichkeiten der Ermittlung des Zustandes und der Entwicklung der Kolmation

3. Empfehlungen für die Projektierung neuer Uferfiltratfassungen mit Angaben über die
 - erforderlichen Parameter
 - Berechnung einer Uferfiltratfassung
 - Rekonstruktion bzw. Erweiterung bestehender Fassungen
 - Anordnung eines Grundwasserbeobachtungsnetzes

4. Betrieb von Uferfiltratfassungen mit Ausführungen zu
 - Bewirtschaftungskriterien
 - Betrieb des fassungsnahen Grundwasserbeobachtungsnetzes
 - Methoden zur Bestimmung der Uferfiltrat- und Grundwasseranteile

Einige der in den "Grundsätzen" enthaltenen Aussagen und Berechnungsansätze sollen hier näher erläutert werden.

Zur analytischen Untersuchung der Infiltration selbst, wird die kolmatisierte Versickerungsfläche als undichter Grundwasserleiter (leaky aquifer) betrachtet. Die Durchlässigkeit der kolmatisierten Schicht muß dazu kleiner als 1/50 der Durchlässigkeit des Grundwasserleiters sein. Für die infiltrierte Wassermenge v_s gilt entsprechend den Bezeichnungen in Bild 1:



Wegen der Kontinuitätsbedingung muß die infiltrierte Wassermenge mit der Normalkomponente der Filtergeschwindigkeit im entsprechenden Randpunkt übereinstimmen. Entsprechend dem DARCY-Gesetz ist die Filtergeschwindigkeit der Ableitung des Potentials in Richtung der Normalen proportional, d.h.

$$v_s = -k \left(\frac{\partial h}{\partial n} \right)_s \quad (2)$$

Die Bedingung für das Potential entlang der Kontaktfläche zwischen Oberflächengewässer und Grundwasserleiter lautet nun

$$\left(\frac{\partial h}{\partial n} \right)_s = -v_s/k = -\frac{k'}{k \cdot d} (H - h_s) \quad (3)$$

bzw. unter Berücksichtigung des GIRINSKIJ-Potentials ϕ

$$\left(\frac{\partial h}{\partial n} \right)_s = -v_s/k = -(\phi_H - \phi_s) / B^2 \quad (4)$$

mit dem Speisungsfaktor $B = \sqrt{k \cdot M \cdot d / k'}$.

Die maßgebende Differentialgleichung für die Grundwasserbewegung im Bereich des kolmatierten Gewässers lautet somit:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} - \frac{\phi_H - \phi_s}{B^2} = 0 \quad (5)$$

Durch den Speisungsfaktor ist die Durchlässigkeit der kolmatierten Schicht im Verhältnis zu der des Grundwasserleiters festgelegt und damit eine Kenngröße für den Kolmationszustand gegeben.

Wie sich aus den genannten Beziehungen erkennen läßt, ist die Kolmation eine der wichtigsten Randbedingungen des unterirdischen Strömungsfeldes einer Uferfiltratfassung. Sie kann als

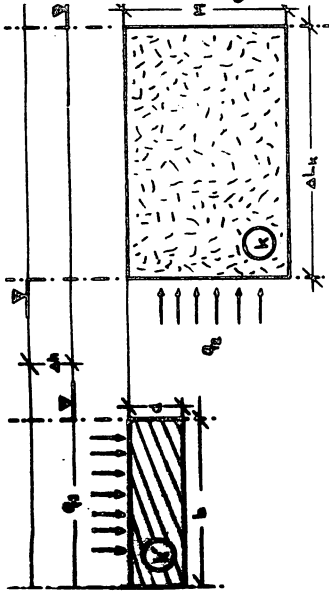
"Vorgang und Ergebnis der Ablagerung und/oder Ausfällung von durch Wasser transportierten feinen Teilchen unterschiedlichen Materials und/oder ausfällbaren Stoffen auf der äußeren und inneren Oberfläche von Erdstoffen oder anderen porösen Medien"

definiert werden.

Die Kolmation verbessert einerseits die Qualität des Uferfiltrats, wirkt aber andererseits infolge Erhöhung des Eintrittswiderstandes als begrenzender Faktor auf die gewinnbare Uferfiltratmenge.

Bemerkbar macht sich die Kolmation eines Gewässers durch die mehr oder weniger große Potentialdifferenz zwischen dem Wasserstand im Gewässer und der Standrohrspiegelhöhe direkt am Gewässerrand.

Bei der Berechnung einer Uferfiltratfassung wird der Eintrittswiderstand infolge Kolmation als fiktive Mehrlänge ΔL_2 berücksichtigt. Die fiktive Mehrlänge ΔL_2 gibt an, um welchen Betrag das infiltrierende Gewässer von der Fassungsanlage abgerückt zu denken ist, um es wie eine nichtkolmatisierte Infiltrationsfläche betrachten zu können. Der hydraulische Widerstand dieses fiktiven Bereiches entspricht dem des Grundwasserleiters zwischen dem vorhandenen kolmatierten Gewässer und der Fassungsanlage.



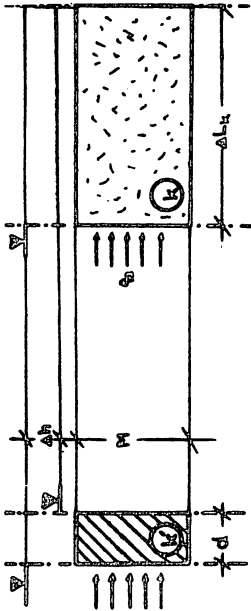
$$q = \frac{Ah}{R_{by}}$$

$$q_0 = k \cdot \frac{Ah}{b} \cdot b$$

$$q_0 = k \cdot \frac{Ah}{\Delta L_k} \cdot M$$

$$q_0 \leq q_0$$

$$\Delta L_k = \frac{q_0}{k} \cdot b \cdot M \cdot \frac{1}{b} = \frac{q_0^2}{b}$$



$$q = \frac{Ah}{R_{by}}$$

$$q_0 = k \cdot \frac{Ah}{b} \cdot M$$

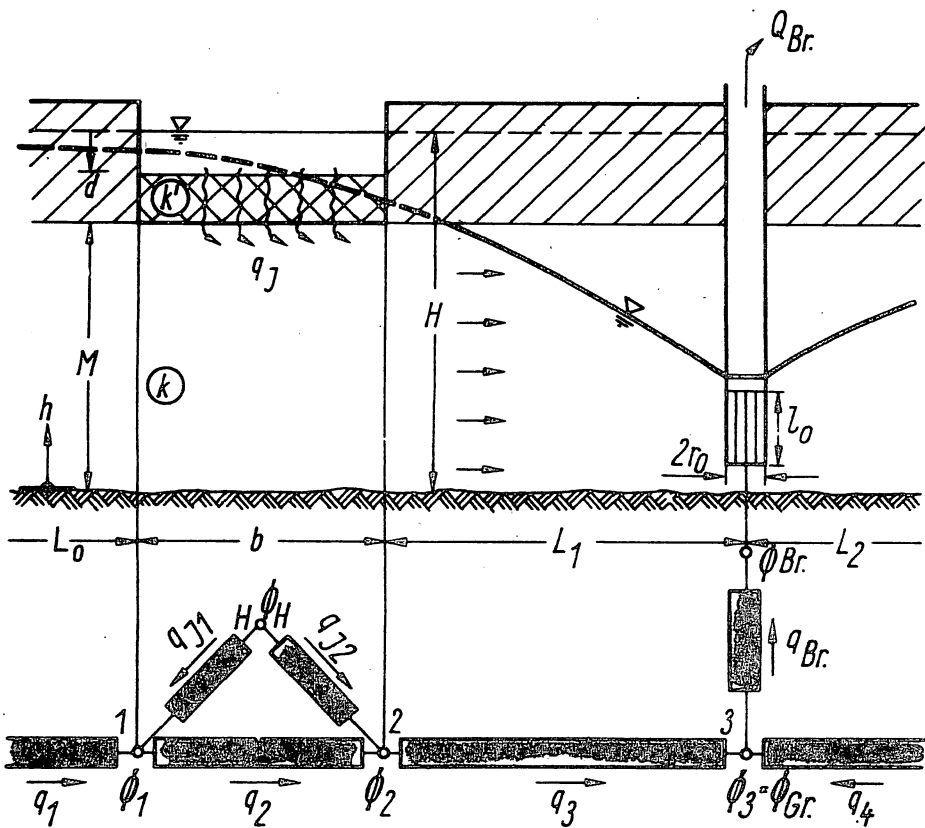
$$q_0 = k \cdot \frac{Ah}{\Delta L_k} \cdot M$$

$$q_0 \leq q_0$$

$$\Delta L_k = \frac{q_0^2}{k} \cdot k$$

Die Bilder 2 und 3 charakterisieren die Umrechnung des Eintrittswiderstandes infolge Kolmation in eine fiktive Mehrlänge.

Bei der praktischen Berechnung des Strömungsfeldes einer Uferfiltratfassung betrachtet man zweckmäßigerweise das Profil entlang einer Stromröhre und untergliedert dieses in einzelne charakteristische Strömungsabschnitte - Fragmente. Die hydrogeologischen Parameter jedes Fragmentes müssen bekannt sein. Es lassen sich immer die Fragmente des Infiltrationsbereiches, des ungestörten und mehr oder weniger horizontalen Durchflusses durch den Grundwasserleiter und des Entnahmebereiches unterscheiden und mit diesen Berechnungsschemata sowohl für Fassungen an einem Ufer als auch für Fassungen an beiden Ufern des infiltrierenden Gewässers aufstellen.



gespanntes } Grundwasser : $\phi = \begin{cases} M \cdot h - M^2/2 \\ \text{ungespanntes } \end{cases} \left. \begin{matrix} \\ \\ \end{matrix} \right\} \begin{cases} \\ \\ h^2/2 \end{cases}$

Speisungsfaktor : $B = \sqrt{k \cdot M \cdot d / k'}$

Fassung an einem Ufer des infiltrierenden Gewässers:

$$q_1 = \frac{k}{L_0} \cdot (h_0 - h_1) \\ = \frac{k}{b} \cdot \frac{1}{\sinh \frac{b}{B}} \left[h_H - h_2 - \cosh \frac{b}{B} \cdot (h_H - h_1) \right]$$

$$q_J = q_{J1} + q_{J2}$$

$$\left. \begin{matrix} h_1 \\ h_2 \end{matrix} \right\} \rightarrow \frac{h_H}{2} :$$

$$q_{J1} = \frac{k}{b} \cdot \frac{\cosh \frac{b}{B} - 1}{\sinh \frac{b}{B}} \cdot (h_H - h_1) \\ q_{J2} = \frac{k}{b} \cdot \frac{\cosh \frac{b}{B} - 1}{\sinh \frac{b}{B}} \cdot (h_H - h_2) \quad \frac{\cosh \frac{b}{B} - 1}{\sinh \frac{b}{B}} = \tanh \frac{b}{2B}$$

$$q_2 = \frac{k}{b} \cdot \frac{1}{\sinh \frac{b}{B}} \cdot (h_H - h_2)$$

$$q_1 = 0 :$$

$$q_2 = q_{J1} \rightarrow (h_H - h_1) = \frac{(h_H - h_2)}{\cosh \frac{b}{B}}$$

$$\left. \begin{matrix} q_1 = 0 \\ b \rightarrow \infty \end{matrix} \right\} :$$

$$h_1 \rightarrow h_H$$

$$q_J = q_{J2} = q_3 = \frac{k}{b} \cdot (h_H - h_2)$$

$$\Delta L_2 = R_{hy} \cdot R \cdot k$$

$$q_3 = \frac{k}{b} \cdot \frac{1}{\sinh \frac{b}{B}} \left[\cosh \frac{b}{B} \cdot (h_H - h_2) - (h_H - h_1) \right] \\ = \frac{k}{L_1} \cdot (h_2 - h_3)$$

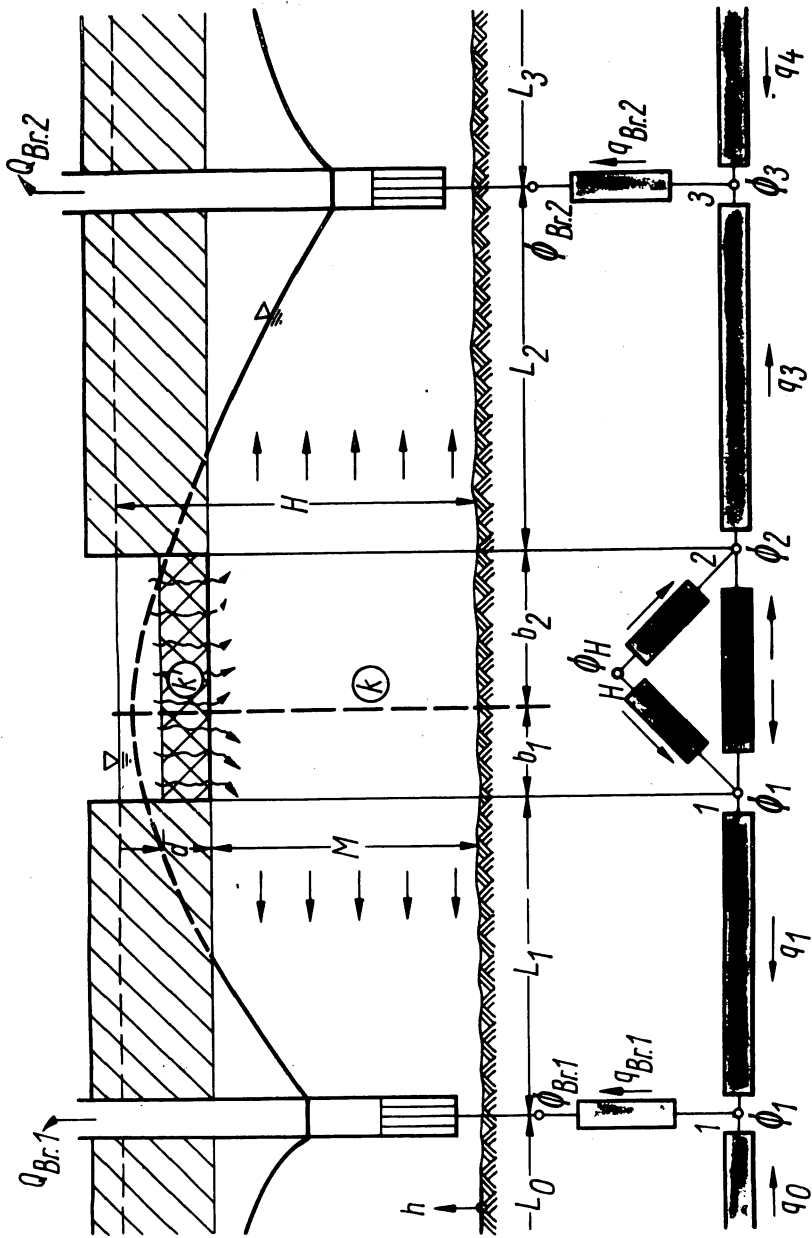
$$q_4 = \frac{k}{L_2} \cdot (h_H - h_3) - v_H \cdot \frac{L_2}{2}$$

$$q_{gr.} = k \cdot \frac{h_3 - h_{gr.}}{\Delta L_{gr.}}$$

$$\Delta L_{gr.} = \frac{a}{2} \left[1 + \frac{a}{2R_0} + \frac{H}{L_0} \cdot 1 + \frac{v_H}{2R_0} + 0, 1 + \frac{R_0}{2a} \right]$$

$$q_{gr.} = q_{gr.} \cdot a$$

a - Brunnenabstand



gespanntes Grundwasser : $\Phi = \begin{cases} M \cdot h - M^2/2 \\ h^2/2 \end{cases}$ Speisungsfaktor: $B = \sqrt{k \cdot M \cdot d / k'}$
 ungespanntes

Fassungen an beiden Ufern des infiltrierenden Gewässers:

$$b = b_1 + b_2$$

$$\frac{H - h_1}{H - h_2} = \frac{\cosh \frac{b_1}{B}}{\cosh \frac{b_2}{B}}$$

$$q_0 = \frac{k}{L_0} \cdot (H - h_1) \cdot v_N \cdot \frac{L_0}{2}$$

$$\begin{aligned} q_1 &= \frac{k}{B} \cdot \tanh \frac{b}{B} \cdot (H - h_1) - \frac{q_3}{\cosh \frac{b}{B}} \\ &= \frac{k}{B} \cdot \frac{(H - h_1)}{\sinh \frac{b}{B}} \cdot \left(\cosh \frac{b}{B} - \frac{H - h_2}{H - h_1} \right) \end{aligned}$$

$$q_2 = \frac{k}{B} \cdot \frac{\cosh \frac{b}{B} - 1}{\sinh \frac{b}{B}} \cdot (2H - h_1 - h_2)$$

$$\frac{\cosh \frac{b}{B} - 1}{\sinh \frac{b}{B}} = \tanh \frac{b}{2B}$$

$$\begin{aligned} q_3 &= \frac{k}{B} \cdot \tanh \frac{b}{B} \cdot (H - h_2) - \frac{q_1}{\cosh \frac{b}{B}} \\ &= \frac{k}{B} \cdot \frac{(H - h_2)}{\sinh \frac{b}{B}} \cdot \left(\cosh \frac{b}{B} - \frac{H - h_1}{H - h_2} \right) \end{aligned}$$

$$q_4 = \frac{k}{L_3} \cdot (H - h_3) \cdot v_N \cdot \frac{L_3}{2}$$

Bild 5

Bild 4 zeigt das Strömungsprofil eines infiltrierenden Gewässers mit einer Fassung an einem Ufer und das dazugehörige Berechnungssystem.

Das Strömungsprofil selbst läßt sich zu der unter diesem dargestellten Kette aus hydraulischen Widerständen idealisieren, die eine zweckmäßige Veranschaulichung der in der Berechnung zu berücksichtigenden Größen zuläßt. Außerdem ist mit ihrer Hilfe das Aufstellen der auch an der Trennlinie zwischen den einzelnen Fragmenten geltenden Kontinuitätsgleichung relativ leicht und übersichtlich möglich.

Entsprechend der am Fragment des infiltrierenden Gewässers herrschenden Randbedingungen lassen sich die zur Fassung fließenden Wassermengen nach der jeweiligen Beziehung ermitteln.

Zur Abschätzung der Infiltrationsleistung q_I ist zu bemerken, daß bei $b < B/2$ der Faktor $\tanh b/2B$ ungefähr gleich $b/2B$ und für $b > 4B$ etwa 1,0 ist.

Außerdem läßt sich anhand der Verteilung des Infiltrats über die Knoten 1 und 2 aussagen, daß die Unterströmung q_I des Infiltrationsbereiches vernachlässigbar ist, sobald die Bedingung $1/\tanh b/2B \ll \sinh b/B$, d.h. $b > 3B$ erfüllt ist.

Die Berechnung der Mehrlänge für die unvollkommene Brunnenreihe $\Delta L_{\text{unvollk.}}$ basiert auf Ansätzen von TODD; andere Berechnungsansätze, wie beispielsweise die von MUSKAT oder LI führen in ihrem Gültigkeitsbereich zu gleichen Ergebnissen.

Bild 5 zeigt das Strömungsprofil eines infiltrierenden Gewässers mit Fassungen an beiden Ufern sowie das dazugehörige Berechnungssystem. Es müssen zur Berechnung entweder die Potentialdifferenzen an beiden Ufern des infiltrierenden Gewässers oder die gefaßte Uferfiltratmenge auf der einen und die vorhandene Potentialdifferenz auf der anderen Uferseite bekannt sein.

Die für jede Fassung wirksame anteilige Infiltrationsbreite des Gewässers läßt sich nur unter der Voraussetzung einer bekannten Infiltrationsverteilung über die gesamte Gewässersbreite ermitteln, wenn die Potentialdifferenzen an beiden Ufern bekannt sind.

Aus den Gleichungen für die anteilige Infiltrationsleistung ist zu erkennen, daß der Einfluß der gegenüberliegenden Fassung praktisch bedeutungslos ist, wenn $b > 3B$ ist.

Wenn entlang des Fassungsstandortes unterschiedliche geohydraulische Verhältnisse vorliegen, muß die Berechnung nach der Fragmentmethode für mehrere charakteristische Strömungsprofile durchgeführt werden.

Die Berechnung komplizierter Strömungsfelder, mit denen an größeren Fassungsanlagen im allgemeinen zu rechnen ist, erfordert die Berücksichtigung des repräsentativen hydrogeologischen Modells und der vorhandenen Randbedingungen für das gesamte Fassungsgebiet als Komplex. Dies ist z.Zt. am rationellsten mit Hilfe analoger Modelle durchführbar. Mit solchen Modellen lassen sich Aussagen über die verschiedensten Parameter, wie Uferfiltratanteil an der Gesamtförderung, Uferbelastung bzw. Infiltrationsintensität und Länge der Entzugsstrecke in Abhängigkeit von den Eintrittswiderständen infolge Kolmation und den sich unter bestimmten Bedingungen infolge Förderbetrieb einstellenden Absenkungszuständen treffen. Außerdem ist über eine modelltechnische Analyse bekannter Strömungszustände die Präzisierung der hydrogeologischen Parameter und der wirksamen hydraulischen Randbedingungen möglich.

Die horizontalen Ausdehnungen eines Fassungsgebietes sind im allgemeinen viel größer als die vertikalen, wodurch für die großräumige Berechnung die Annahme einer horizontalen Grundwasserbewegung bzw. Planfiltration berechtigt ist. Da außerdem beim Wasserwerksbetrieb die Wasserstände um einen Mittelwert schwanken sollten und sich Potentialänderungen nur langsam einstellen, kann mit einem "quasi-stationären" Strömungsfeld gerechnet werden.

Die bei der Berechnung größerer Strömungsfelder erforderliche Berücksichtigung der Grundwasserneubildung kann durch interne Einspeisungen, über die Randbedingungen oder durch Fehlerbetrachtungen erfolgen.

Die Berechnung unterirdischer Strömungsfelder mit Hilfe analoger Modelle ist

- für den Lockergesteinsbereich zweckmäßig, da im allgemeinen ein relativ homogener Aufbau des Grundwasserleiters vorhanden ist bzw. der Einfluß der Randbedingungen den der örtlich vorhandenen Inhomogenitäten im ufernahen Bereich überdeckt;
- für den Übergangsbereich zwischen Locker- und Festgestein nur dann zweckmäßig, wenn den Modelluntersuchungen umfangreiche Wasserhaushaltsbetrachtungen in bezug auf das Einzugsgebiet und die Randbedingungen vorangehen;
- für den Festgesteinsbereich nicht zweckmäßig, da gegenwärtig ein genauer Aufschluß des Festgesteins bzw. klüftigen Festgesteins nicht möglich ist, das Zusammenwirken von Poren- und Kluftwasserströmung im allgemeinen unbekannt ist und modelltheoretische Grundlagen für deren Simulierung erst erarbeitet werden müssen (Gültigkeit des DARCY-Gesetzes ist fraglich).

Für die analoge Modellierung der Planfiltration werden in erster Linie elektrische Analogiemodelle verwendet, und zwar

- bei relativ homogenem Aufbau des Grundwasserleiters Kon-

tinuummodelle aus elektrisch leitfähigem Papier (Papiermodelle);

- bei starker Anisotropie und Inhomogenität des Grundwasserleiters Diskretmodelle aus elektrischen Wirkwiderständen (Netzwerke). Hier ist die Simulierung von singulären Punkten, wie beispielsweise von Brunnen und Einspeisungen, schwierig und eine Fehlerquelle, wenn sie nicht mit den Knoten des Netzwerkes zusammenfallen.

Jeder Berechnung von Strömungsproblemen mit Hilfe analoger Modelle ist eine Testung des Modells selbst voranzustellen. Dabei werden die "in situ" unter bestimmten hydrologischen Bedingungen gemessenen Potentiale und Wassermengen mit den Werten verglichen, die bei der Simulierung der analogen Bedingungen im Modell erhalten werden. Die erforderlichen Maßstabsbeziehungen zwischen der Grundwasserbewegung und dem elektrischen Stromfluß werden aus den mathematischen Modellen beider abgeleitet.

Im folgenden sollen einige Bilder den Einfluß der Kolmation als maßgebende Randbedingung einer Uferfiltratfassung auf deren Leistungsfähigkeit verdeutlichen. Es ist das als vertikal-eben idealisierte Strömungsfeld zwischen einer Fassung und einem unterschiedlich kolmatierten unvollkommenen Gewässer dargestellt. Der im ungestörten Zustand vorhandene Grundwasserzufluß von beiden Seiten des Gewässers wird auf einer Seite durch den Betrieb einer Fassung unterbunden.

Das in Bild 6 dargestellte Strömungsfeld zeigt die Verhältnisse für ein nichtkolmatiertes Gewässer. Aus der Stromröhrenverteilung ist ersichtlich, daß 62 % Uferfiltrat und 38 % des Gewässer unterströmendes Grundwasser von der Fassung gefördert werden. Der Verlauf der 80 %-Potentiallinie läßt erkennen, daß etwa 25 % des in Richtung Fassung strömenden Grundwassers direkt in das Gewässer fließen.

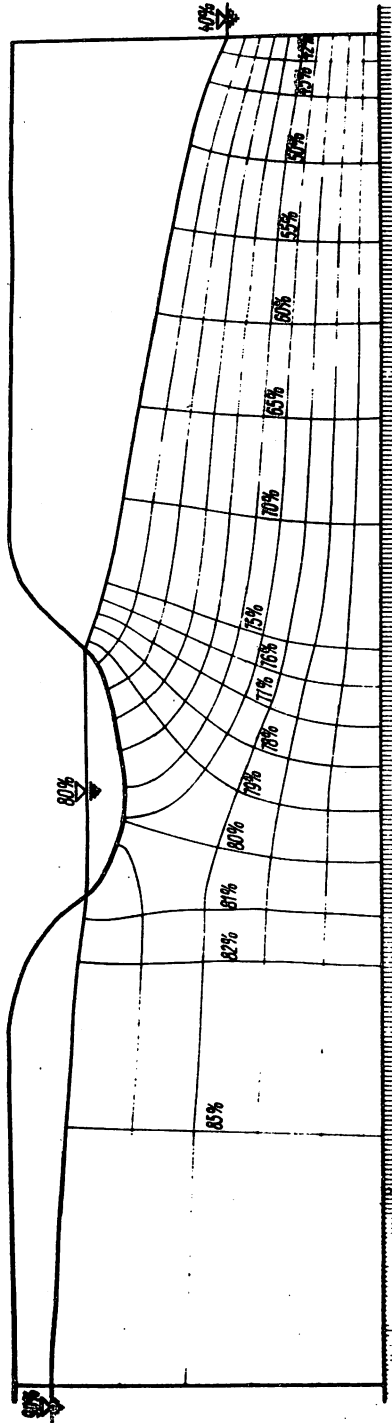


Bild 8

Das Bild 7 zeigt das Strömungsfeld zwischen einer Uferfiltratfassung und einem schwach kolmatierten Gewässer. Das Verhältnis des Widerstandes der kolmatierten Schicht zum Widerstand des Grundwasserleiters ist gleich 1,0 zu setzen. Das geförderte Rohwasser setzt sich zu 30 % aus Uferfiltrat und zu 70 % aus dem Gewässer unterströmendes Grundwasser zusammen, macht aber nur noch 90 % von der Fördermenge aus, die bei einem nichtkolmatierten Gewässer und gleichen Potentialverhältnissen erhalten wird. Aus dem Verlauf der Stromröhren und der 80%-Potentiallinie ist zu erkennen, daß kaum noch landseitiges Grundwasser ins Gewässer fließt, das landseitige Ufer aber durch den Förderbetrieb auch noch nicht beeinflusst wird.

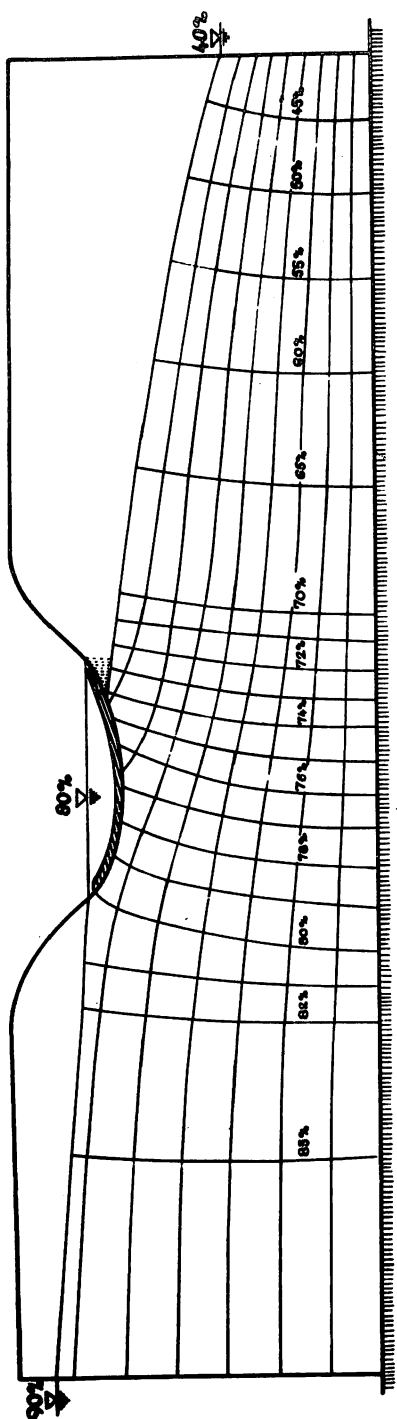


Bild 7

Das Bild 8 zeigt das Strömungsfeld zwischen einer Uferfiltratfassung und einem stark kolmatierten Gewässer, für das ein Verhältnis der Widerstände von Kolmationsschicht und Grundwasserleiter von 10,0 anzusetzen ist. Hier sind nur noch etwa 7% der Fördermenge Uferfiltrat und die Fassung liefert noch 83 % der ursprünglichen Wassermenge im nicht-kolmatierten Zustand unter gleichen Potentialverhältnissen. Das Gewässer selbst ist schon ca. $\frac{1}{3}$ von der freien Oberfläche unterfahren, d.h. unter einem Drittel des Gewässerbettes tritt schon freie Versickerung auf.

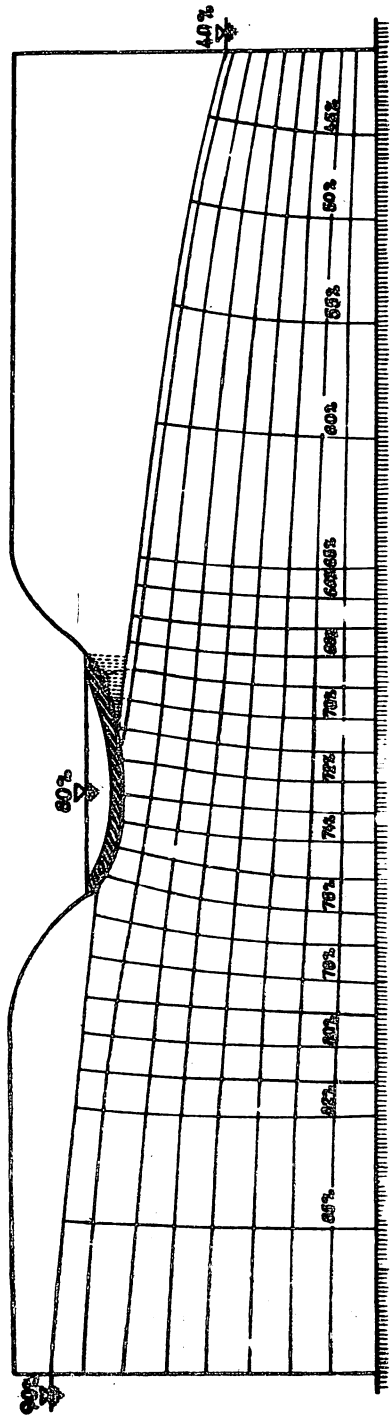


Bild 2

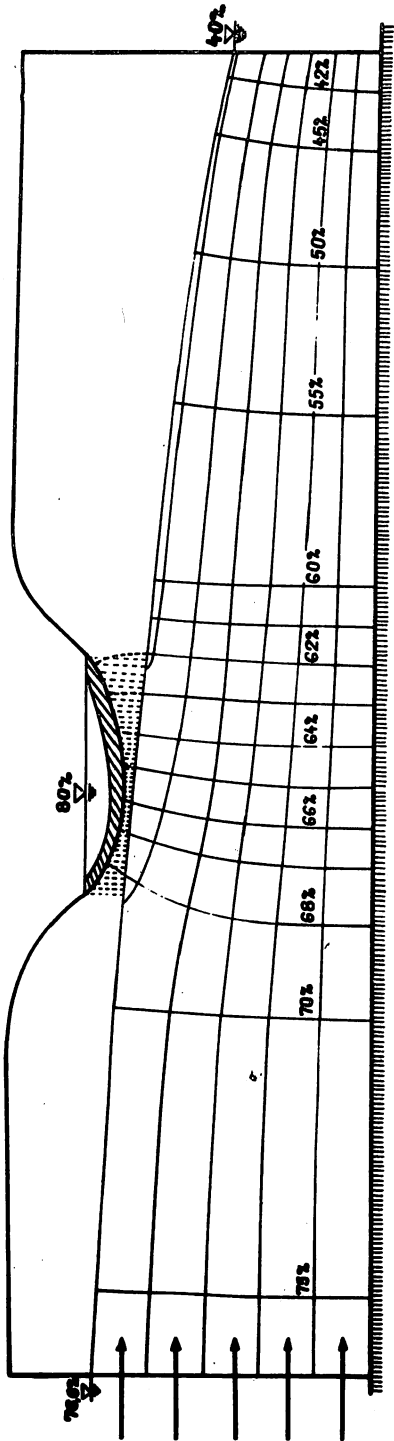


Bild 9

Das Bild 9 zeigt das Strömungsfeld zwischen einer Uferfiltratfassung und einem stark kolmatierten Gewässer mit dem gleichen Widerstandsverhältnis wie in Bild 8, jedoch einem landseitigen Zufluß wie im nichtkolmatierten Zustand zu Beginn des Förderbetriebes (Bild 6). Die Wasserstände in der Fassung und im Gewässer stimmen mit den bisherigen überein, der landseitige Wasserstand und die Standrohrspiegelhöhen unter dem Gewässer sind jedoch stark abgefallen. Auf Grund der für diesen Kolmationszustand im Bereich des Gewässers infolge freier Versickerung erreichbaren maximalen Potentialdifferenzen erhöht sich der Uferfiltratanteil am geförderten Rohwasser gegenüber dem vorhergehenden Zustand auf ca. 19 %. Die Fördermenge entspricht jedoch nur noch 62 % der Fördermenge im nichtkolmatierten Zustand. Das Gewässer ist von der abgesenkten freien Oberfläche vollkommen unterfahren.

Diese einprägsame Darstellung der Wirkung der Kolmation soll sowohl den Hydrogeologen, als auch den Projektanten und den Betreiber von Uferfiltratfassungen veranlassen, den spezifischen Problemen der Uferfiltration mehr Aufmerksamkeit als bisher zu schenken.

Verwendete Symbole

b	/m/	Gewässerbreite
B	/m/	Speisungsfaktor
d	/m/	Dicke der kolmatierten Schicht
H	/m/	Höhe des Wasserspiegels des infiltrierenden Gewässers
h_s	/m/	Standrohrspiegelhöhe am infiltrierenden Gewässer
k	/m.s ⁻¹ /	Durchlässigkeitsbeiwert des Grundwasserleiters
k'	/m.s ⁻¹ /	Durchlässigkeitsbeiwert der kolmatierten Schicht

M /m/	Wichtigkeit des Grundwasserleiters
v_s /m.s ⁻¹ /	infiltrierende Wassermenge pro m ² Infiltrationsfläche
ϕ /m ² /	GIRINSKIJ-Potential

Bilder

Bild 1	Element des infiltrierenden Gewässers
Bild 2) Bild 3)	Umrechnung des Eintrittswiderstandes infolge Kolmation auf die fiktive Mahrlänge ΔL_2
Bild 4	Strömungsprofil /Fragmente/ Berechnungsansätze für Fassungen an einem Ufer
Bild 5	Strömungsprofil /Fragmente/ Berechnungsansätze für Fassungen an beiden Ufern
Bild 6	Strömungsfeld zwischen Fassung und nicht-kolmatiertem Gewässer
Bild 7	Strömungsfeld zwischen Fassung und schwach kolmatiertem Gewässer
Bild 8	Strömungsfeld zwischen Fassung und stark kolmatiertem Gewässer
Bild 9	Strömungsverhältnisse zwischen Fassung und stark kolmatiertem Gewässer mit landseitigem Zufluß wie bei nichtkolmatiertem Gewässer

Dipl.-Ing. Ulrich Hartmann,
VEB Projektierung
Wasserwirtschaft Halle,
Außenstelle Magdeburg

Projektierung und Betrieb von Uferfiltratfassungen

Da das ökonomisch faßbare und dem Verbraucher bereitstellbare Dargebot an echtem Grundwasser nicht mehr ausreicht, den Bedarf zu decken, wird die Projektierung und Errichtung von Uferfiltratfassungen zukünftig immer mehr Bedeutung erlangen. Eine direkte Aufbereitung wird wegen der meist schlechten Qualität des Oberflächenwassers besonders bei höher gestellten Qualitätsanforderungen, wie z. B. für Trinkwasser, sehr aufwendig und wenig erfolgversprechend sein.

Durch die Untergrundpassage bei der Uferfiltration wird das Oberflächenwasser in seinen chemischen und biologischen Parametern verbessert und die Temperatur gleichmäßig, die sich damit der des Grundwassers angleicht.

Die Komplexität der Uferfiltration erschwert die Erfassung und Behandlung des Gesamtvorganges. Die einzelnen Einflußfaktoren, die biologischer, chemischer, physikalischer, geohydraulischer und wasserwirtschaftlicher Art sind, haben bei jeder Anlage eine unterschiedliche Bedeutung. Das macht allgemeingültige Verallgemeinerungen unmöglich und verhindert die Angabe geschlossener Bemessungsformeln. Da die ermittelten Parameter teilweise zeitabhängig sind, können sie auch nicht ohne vorherige Überarbeitung in einem späteren Zeitraum für die gleiche Anlage wieder benutzt werden.

Die aufgezeigten Schwierigkeiten machen sich besonders bei der Projektierung von Uferfiltratfassungen bemerkbar. Da der Projektant für die Leistung der von ihm konzipierten Anlage zu garantieren hat, war er bei der Projektierung von Ufer-

filtratfassungen bisher überfordert. Es fehlten Berechnungsmethoden.

In der Praxis wurden Näherungsformeln benutzt, oder es wurde nur die Fassungsanlage selbst bemessen, unabhängig davon, ob es sich um Grundwasser oder um Uferfiltrat handelt.

Die von Thiem angegebene Formel $V_F : V_I = 20\ 000 \dots 30\ 000$ als Maß für die Infiltrationsgeschwindigkeit berücksichtigt weder geohydraulische Parameter noch die Betriebsweise der Fassung oder die Menge des Infiltrats. Sie verhindert lediglich einen schnellen Leistungsrückgang der Fassung infolge Kolmation.

Diese Formel auf die Verhältnisse in stehenden Gewässern bezogen, würde ergeben, daß keine ständige Infiltration möglich wäre. Die Tatsachen zeigen das Gegenteil.

Die gegenseitige Beeinflussung von Fassung und Oberflächenwasser wurde also kaum erfaßt. Einen Ausweg bot die Anwendung von Grenzwerten für die Menge des Infiltrats. So wurden für die mittlere Elbe $10\ 000\ m^3/km$ Flußlänge und Tag angegeben. Welcher Anteil aus dem Vorfluter und welcher aus dem landseitigen Grundwasser kam, wurde nur selten festgestellt. Die Kolmationsparameter wurden, wenn überhaupt, dann dadurch berücksichtigt, daß ein Eintrittswiderstand am Oberflächengewässer von 1,5 m als wasserwirtschaftlich kritischer Wasserstand angenommen wurde. Ob, wann und in welchem Teil der Fassung dieser Wert erreicht wurde, war nicht bekannt. Für den Projektanten ist die Kenntnis von Größe und zeitlichem Verlauf des Leistungsrückganges einer Uferfiltratfassung von Interesse für die Auslegung der Gesamtanlage. Auch Größe und Zeitpunkt von Nachfolge- oder Ersatzinvestitionen lassen sich abschätzen.

Bei den langen Vorbereitungs- und Bauzeiten gab es damit immer wieder Schwierigkeiten. Durch die fehlende Klarheit über die Zusammenhänge erreichten einige Wasserfassungen

die projektierte Leistung nicht oder nur kurzzeitig, andere waren überbemessen.

Eine falsche Betriebsweise war ebenfalls eine häufige Ursache für Fehlschläge.

Es muß aber ganz eindeutig gesagt werden, daß dieser Zustand objektiv nicht zu Lasten des Projektanten gehen kann. Nachdem die Forschungsergebnisse über die Hydraulik der Uferfiltration und die Kolmation vorliegen, ergibt sich für die Projektierung von Uferfiltratfassungen ein anderer Weg:

Ausgehend von einer gründlichen Analyse des Strömungsfeldes, in dem die Anlage errichtet werden soll, wird ein geohydraulisches Modell erstellt, das folgende Informationen enthält:

1. Lageplan und Schnitte durch den Grundwasserleiter, mit Aufbau, flächenhafter Ausdehnung, Randbedingungen, Speisungs- und Zehrungsverhältnissen, sowie hydrogeologischen Parametern (T , k , M , S , v_N).
2. Grundwasserisohypsenpläne des ungestörten Zustandes bei unterschiedlichen Wasserständen im Vorfluter und landseitig.
3. T , S für den Fassungsstandort durch Pumpversuche ermittelt.
4. Einschätzung der Kolmationsentwicklung und der maximalen Belastbarkeit des Gewässerbettes durch Pumpversuche am Ufer.
5. Überschlägliche Ermittlung des Leistungsrückganges infolge Kolmation durch Labor- und Felduntersuchungen (Gerinne- und Sickerversuche).

Voraussetzung für die Ermittlung dieser Parameter ist ein gut ausgebautes Pegelnetz. Die gewonnenen, vom Hydrogeologen zu erbringenden Werte, werden zu einem Analogiemodellversuch benutzt. Damit ist eine Aussage möglich, wie sich prog-

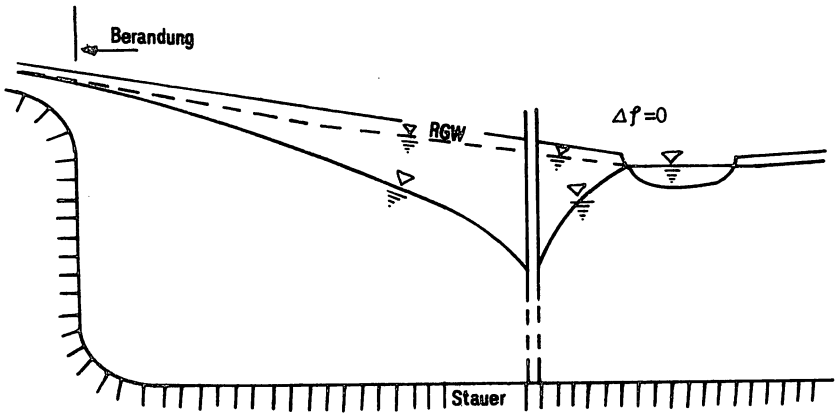
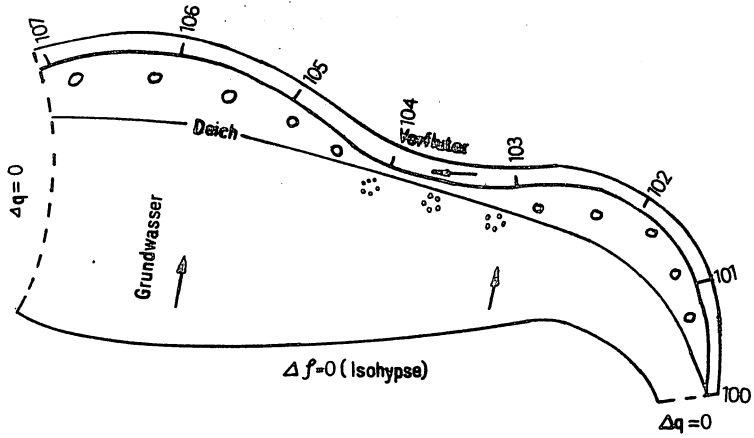
nostisch der Uferfiltratanteil bei Förderung einstellen wird, wie die Belastung des Gewässerbettes ist und welche Größe die Entzugsstrecke hat. Die hydraulische Bemessung der Fassungsanlage sollte bei einer geplanten Förderung von mehr als $10\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$ in jedem Falle mit Elektroanalogiemodellen erfolgen. Bei geringeren Fördermengen muß von Fall zu Fall entschieden werden, ob der Aufwand für die Modellierung gerechtfertigt ist. Der Grad der Beanspruchung des Grundwasserleiters (vorhanden und geplant) ist dabei ein wichtiges Kriterium.

Leistungsbegrenzender Faktor bei Uferfiltratfassungen ist die Kolmation. Auf diesem Gebiet sind noch Forschungsarbeiten erforderlich, um die bisherigen Erkenntnisse zu präzisieren und zu konkretisieren.

Zur Vermeidung von Fehlinvestitionen und zur weiteren Verbesserung des hydrogeologischen Modells ist es vorerst erforderlich, Uferfiltratfassungen in Ausbaustufen zu errichten. Die erste Ausbaustufe sollte dabei den folgenden vom Standpunkt der Kolmationsentwicklung mindestens zwei Jahre als Großversuch vorauslaufen.

In dieser Zeit müssen durch Pegelmessungen sowohl im Fassungsbereich als auch am Ufer und im Strömungsfeld neue Daten gewonnen werden. Die Auswertung gestattet dann über Analogieversuche (dazu wird das Modell der ersten Ausbaustufe präzisiert) die Minimierung des Erkundungsaufwandes für den weiteren Ausbau der Fassung sowie eine konkrete Aussage über Flußbettbelastung und Kolmationsentwicklung.

Langgestreckte Brunnengalerien sind für Uferfiltratfassungen vorteilhaft, denn sie garantieren bei gleichmäßiger Belastung des Flußbettes eine geringe Filtergeschwindigkeit. Die Leistung ist dabei hoch und es erfolgt nur eine langsame Kolmation.



101

- Flußbelastung bei vollem Ausbau der Fassung ($Q=70000\text{m}^3/\text{d}$ Uferfiltrat)
- - - - " " bei Teilausbau der Fassung ($Q=50000\text{m}^3/\text{d}$ Uferfiltrat)
- · - · " " bei Konzentration auf 4 Fassungsstandorte ($Q=70000\text{m}^3/\text{d}$ Uferfiltrat)

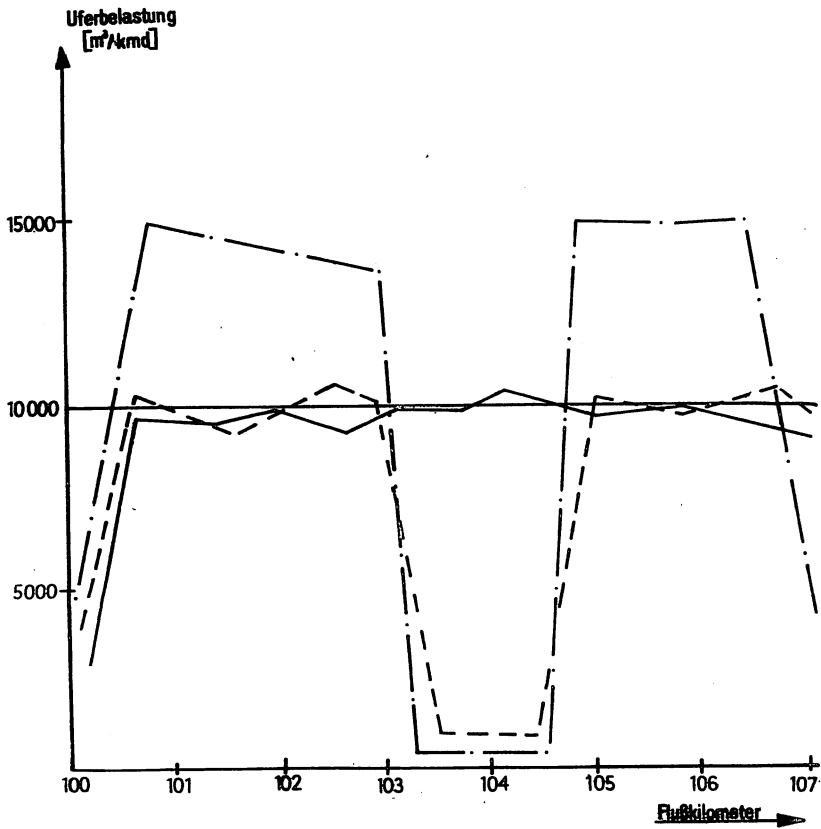


Bild 2

Im Bild 1 ist eine Uferfiltratfassung dargestellt, die auf die beschriebene Weise vorbereitet wird.

Unter Berücksichtigung der Wasserbedarfsentwicklung wird auf einen stufenweisen Ausbau der Fassung orientiert. Mit Hilfe von Analogiemodellversuchen wurden verschiedene Varianten untersucht. Ausgangspunkt war dabei die Minimierung der Fassungsstandorte bei gleichmäßiger Flußbettbelastung, die $10\ 000\ m^3/d, km$ Flußlänge nicht überschreiten sollte. Der landseitige Grundwasserzufluß sollte mit gefaßt werden.

Die Ergebnisse der Untersuchung sind auf Bild 2 dargestellt. Es zeigt sich, daß für vollen Ausbau der Fassung die gewünschte gleichmäßige Flußbettbelastung in der erforderlichen Höhe erreicht wird. Für einen Teilausbau zeigen die beanspruchten Flußstrecken gute Ergebnisse. Die Errichtung der Fassung in Ausbaustufen (insgesamt 3) ist zweckmäßig. Um der Forderung nach möglichst geringer Inanspruchnahme landwirtschaftlicher Nutzflächen nachzukommen, wurde der Versuch unternommen, eine Konzentration auf 4 Fassungsstandorte zu erreichen. Bei der geforderten vollen Leistung übersteigt die Uferbelastung den vorgegebenen Grenzwert bei weitem.

Bisher sind bei dieser Fassung noch keine Untersuchungen zur Entwicklung der Kolmation durchgeführt worden. Als Eintrittswiderstand wurde eine Potentialdifferenz vom Vorfluter zum Grundwasserleiter von 1,5 m zugrunde gelegt. Im Zuge der weiteren Bearbeitung müssen exaktere Untersuchungen vorgenommen werden.

Aus dem aufgezeigten Projektierungsablauf ergeben sich Forderungen für die Investitionsvorbereitung und den Betrieb von Uferfiltratfassungen. Das beginnt bereits bei der Einschätzung des Wasserbedarfs.

Für die einzelnen Ausbaustufen muß bekannt sein, wie sich der Wasserbedarf entwickeln wird. Gleichzeitig muß aber auch der Endwert schon angegeben werden. Die Erkundung wird

bereits auf diese Größe bezogen (Vorläuferkundung). Einzelne Anlagenteile werden ebenfalls für den Endausbau ausgelegt. Da an die Ergebnisse der Erkundung hohe Anforderungen gestellt werden, ist der Vorbereitung und rechtzeitigen Durchführung der hydrogeologischen Vorarbeiten erhöhte Aufmerksamkeit zu schenken. Es ist volkswirtschaftlich nicht vertretbar, daß der Investauftraggeber eine Risikoerklärung abgibt und damit eine mangelhafte Vorbereitung entschuldigt. Solche Maßnahmen müssen in Zukunft zurückgestellt werden, wenn der Projektant seine Rolle als "technisches Gewissen" erfüllen soll, wie auf der Projektierungskonferenz des Ministeriums für Umweltschutz und Wasserwirtschaft 1973 festgestellt wurde.

Uferfiltratfassungen müssen sehr sorgfältig und sachkundig vorbereitet werden, da bei Fehlinvestitionen die volkswirtschaftlichen Schäden erheblich sind. Die Analyse der bestehenden Verfahrensweise ergibt, daß ein Umdenken in der Investitionsvorbereitung erforderlich ist. Man muß sich stets vor Augen halten, daß die Projektierung nur so gut sein kann, wie die Eingangswerte (hydrogeologische und Betriebsdaten) sind. Fehler und Nachlässigkeiten in dieser Phase können auch nicht durch Risikoerklärungen kompensiert werden.

Eine der wichtigsten Voraussetzungen, die während der Erkundung geschaffen werden müssen, ist die Anlage eines gut ausgebauten Netzes von Grundwasserbeobachtungsrohren. Diese Pegel dienen sowohl der Feststellung des Wasserstandes als auch der gütemäßigen Überprüfung des Infiltrats. Außerdem sind sie die Grundlage für die Anteilsbestimmung von Uferfiltrat und landseitigem Grundwasserzufluß.

Während des Betriebes der 1. Ausbaustufe können dann die Bewirtschaftungskriterien ermittelt werden, die für jede Fassung eine unterschiedliche Größe haben. Die zulässige Absenkung und die Infiltrationsleistung seien als die wich-

tigsten genannt. Die anderen Kriterien ergeben sich teilweise daraus. Eine falsche Betriebsweise fördert die schnelle Kolmation. Der dann folgende Ausfall eines Uferabschnittes für die Infiltration zwingt zu vorzeitigen Rekonstruktionsmaßnahmen mit entsprechenden Investitionen.

Für den Betrieb von Uferfiltratfassungen sind Dispatchergraphiken zu erarbeiten, aus denen in Abhängigkeit vom Wasserstand im Vorfluter und im landseitigen Grundwasser die zulässige Fördermenge sowie die maximal vertretbare Absenkung abgelesen werden können.

Während der Niedrigwasserperiode sollte die Leistung von Uferfiltratfassungen zur Schonung der Entzugsstrecke herabgesetzt werden. Die Differenz kann aus einem Verbundbetrieb mit Grundwasserfassungen ausgeglichen werden. Das Fahren aus der Speicherreserve sollte bei Uferfiltratanlagen unterbleiben, da es zu schneller Kolmation führt.

Aus dem gleichen Grund ist es nicht vorteilhaft, nur Teile der Fassung, aber diese mit höherer Leistung zu betreiben. Bei Verockerungserscheinungen an Brunnen müssen rechtzeitige Rekonstruktionen vorgenommen werden, sofern nicht durch Gammabestrahlung ein Erfolg erreicht wird.

Horizontalfilterbrunnen mit hoher Uferbelastung sind wegen Intensivierung der Kolmation ungünstig. Sie sollten Standorten mit Grundwasser oder uferferneren Schotterterrassen vorbehalten bleiben. Eine andere Möglichkeit ist der Bau von Kleinhorizontalfilterbrunnen, die eine geringere Leistung haben. Dadurch wird eine gleichmäßigere Flußbettbelastung erreicht.

Uferfiltratfassungen an verkehrreichen Wasserstraßen sind wegen des teilweisen Abbaus der äußeren Kolmation durch den Schiffsverkehr und die laufende Unterhaltung günstig. Vorteilhaft ist auch eine Wildversickerung aus dem Oberflächenwasser im Winterhalbjahr. Sie führt zu einem zeitweiligen Anstau des landseitigen Grundwasserzuflusses und zur Förderung dieses Wassers während der Spitzenzeiten. Sie setzt allerdings entsprechende Flächen und durchlässige Deckschichten voraus.

Beim Betrieb der Uferfiltratfassung muß auf alle Fälle verhindert werden, daß die Kolmation bis zum Abreißen der Strömung fortschreitet. Dann ist mit einem rapiden Leistungsabfall der Anlage zu rechnen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die eingetretene Flußbettverdichtung zum größten Teil irreversibel ist und die Leistungsminderung nicht durch das Abteufen neuer Brunnen beseitigt werden kann. Der betreffende Uferabschnitt ist für die Wassergewinnung für immer unbrauchbar.

Der einzige Ausweg besteht dann in einer künstlichen Grundwasseranreicherung über Sand- oder Pflanzenbecken.

Die Kolmation ist ein Vorgang, der nicht aufzuhalten ist, sofern infiltriert wird. Nur die Geschwindigkeit der Flußbettverdichtung kann wesentlich beeinflußt werden.

Die Irreversibilität der Kolmation zwingt zu einer sinnvollen, die Fassung schonenden Betriebsweise.

Bei der Anlage neuer Wasserfassungen sollten entsprechende Flächen für eine spätere künstliche Grundwasseranreicherung möglichst freigehalten werden.

Die Festlegung der Betriebsweise einer Uferfiltratfassung muß also auch die geplante Nutzungsdauer der Anlage mit berücksichtigen und darf nicht nur die normative Nutzungsdauer der Brunnen beinhalten.

Das schon mehrfach erwähnte Pegelnetz sollte während der Sommermonate mindestens 14-tägig, in der anderen Zeit ein- bis zwei-monatlich beobachtet werden. Die Ergebnisse sind

in Isohypsenplänen auszuwerten. Dazu bietet sich das Rechenprogramm FG ISOLINIE an. Ferner ist auch die regelmäßige Wasserprobenahme erforderlich. All diese Maßnahmen sind zur langfristigen Aufrechterhaltung der Kapazität der Pflanzungsanlage erforderlich.

Unbedingt notwendig ist auch die Ermittlung des Uferfiltratanteils an der Gesamtförderung. Sie dient der Feststellung der Uferbelastung und ermöglicht Rückschlüsse auf die Kolonisationsentwicklung. Dazu bieten sich hydrometrische (Abflussmessungen im Oberflächenwasser) hydraulische (Isohypsenpläne), chemische (repräsentative Wasserinhaltsstoffe) und physikalische (Temperatur) Möglichkeiten an. Ferner kommen noch die Tritium-Methode und die Elektroanalogie-Modellierung in Frage. Letztere bringt im Lockergestein i.a. gute Ergebnisse, während das im Festgestein wegen der unbekanntenen Klüftigkeit meist nicht gegeben ist.

Auch im Lockergestein kann die Elektroanalogie versagen, wie das folgende Beispiel zeigt. Bei fehlender Dynamik im Strömungsfeld ist die Modelltestung nicht möglich.

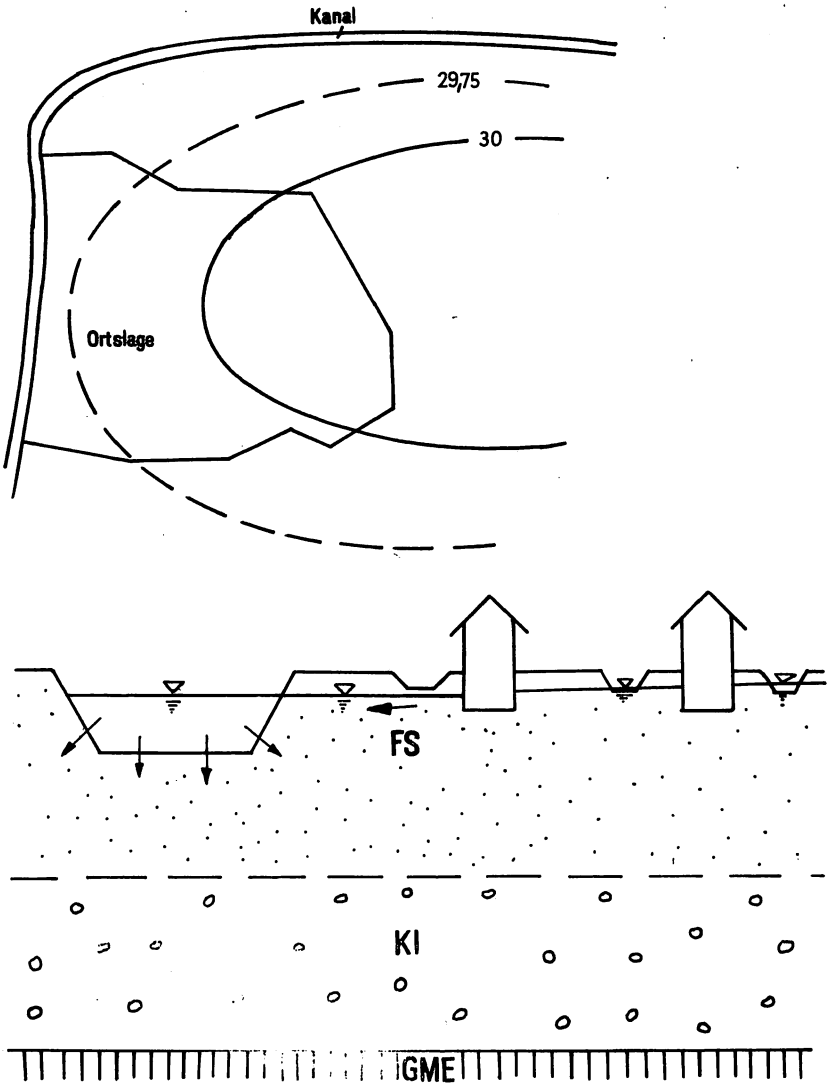


Bild 3

Im Bild 3 ist ein Grundwasserströmungsfeld dargestellt, das auf Grund der geologischen Struktur und der fehlenden Grundwasserdynamik nicht modelliert werden konnte.

Über die Kiesschicht erfolgte großflächig ein Druckausgleich. Dadurch kommt es nicht zur Ausbildung eines nennenswerten Gefälles im Grundwasserspiegel.

Würde in diesem Strömungsfeld eine Uferfiltratfassung errichtet werden, könnte sie nicht mit den üblichen Methoden berechnet werden. Die Gültigkeitsgrenzen des Darcy-Gesetzes werden überschritten.

Es ist also festzustellen, daß die Elektroanalogie keineswegs ein Allheilmittel ist und auch nicht bedenkenlos in jedem Fall angewendet werden darf. Die Anwendungsbedingungen müssen wie bei jedem Verfahren, auch hier beachtet werden. Andererseits wurde wiederholt auf die Notwendigkeit von Analogieversuchen hingewiesen, speziell für die Projektierung. Wenn eine Modellierung nicht möglich ist, bleiben nur Rückschlüsse auf bereits bestehende Anlagen. Sie sind dann das wichtigste Mittel zur Festlegung der Uferbelastung. Näherungsweise Ergebnisse sind auch durch die Fragmentmethode zu erhalten.

Wenn die erste Ausbaustufe in Betrieb ist, wird durch die Förderung meist die Dynamik erzeugt, die für die Modellierung erforderlich ist.

Eine Analyse der bestehenden Uferfiltratfassungen würde helfen, noch vorhandene Reserven aufzuzeigen und Grundwerte für eine wirtschaftliche Betriebsweise zu ermitteln, die Überbeanspruchungen vermeidet. Bisher ist auf diesem Gebiet wenig getan worden.

Die Betriebsaufzeichnungen und Pegelmessungen an den Uferfiltratfassungen sind meist unzureichend.

Die Speicherung und Auswertung der Meßergebnisse sollte zukünftig vorzugsweise in Datenbanken erfolgen. Diese müßten sowohl für den Betreiber, als auch für Projektant und Er-

kundungsbetrieb zugänglich sein.

Bei Vorbereitung, Projektierung, Bau und Betrieb von Uferfiltratfassungen endet die Verantwortung der Partner nicht mit der Abgabe der jeweiligen Dokumentation. Da die einzelnen Phasen nicht klar zu trennen sind und während des Betriebes der 1. Ausbaustufe die Grundlagen für die zweite geschaffen werden und außerdem vom Projektanten die ersten Angaben für eine sinnvolle Betriebsweise kommen, ist eine Gemeinschaftsarbeit von Hydrogeologen, Geohydraulikern, Projektanten und Betreibern erforderlich. Durch diese Rückkopplung entsteht ein sogenanntes "lernendes System", das es ermöglicht, einmal gewonnene Erkenntnisse ständig kritisch zu überprüfen und zu verbessern. Nur so kann ein volkswirtschaftliches Optimum erzielt werden. Ersatzinvestitionen können dann rechtzeitig geplant und mit einem begründeten Minimum an Kosten und Zeit realisiert werden.

Diese höhere Form der sozialistischen Gemeinschaftsarbeit geht über den bisher praktizierten Rahmen hinaus. Ein erster Schritt wurde bereits bei der Überleitung der Forschungsergebnisse "Uferfiltration" getan. Gemeinsam mit dem VEB Hydrogeologie und dem VEB Projektierung Wasserwirtschaft wurde vom Institut für Wasserwirtschaft eine Richtlinie ausgearbeitet, die Erkundung, Projektierung und Betrieb von Uferfiltratfassungen zum Inhalt hat.

Der VEB Projektierung Wasserwirtschaft erstellt einen Werkstandard "Wassergewinnungsanlagen - Uferfiltratfassungen" WAPRO 1.52. mit den Blättern

- 1 Allgemeines und Hinweise zur Erkundung
- 2 Hinweise zur Projektierung
- 3 Hinweise zum Betrieb.

Die genannte Richtlinie geht in den WAPRO 1.52. als Studie ein. Standard und Studie werden zur Zeit für den Druck vorbereitet und können zukünftig vom VEB Projektierung Wasser-

wirtschaft, Zentralstelle für Standardisierung Dresden, bezogen werden.

Vom VEB Hydrogeologie wurde eine "Erkundungsmethodik Uferfiltratfassungen" ausgearbeitet, die für alle Erkundungsvorhaben zur Anwendung empfohlen wird.

Der WAPRO 1.52. enthält im Blatt 1 Hinweise für den Projektanten, welche Unterlagen der Erkundungsbetrieb zu liefern hat. Dieser Standard ist mit den Blättern 1 bis 3 die Grundlage für die konstruktive Durchbildung der Uferfiltratfassung.

Wünschenswert und erforderlich ist die Erweiterung der Zusammenarbeit von IfW, VEB Hydrogeologie und VEB Prowa auf den Bereich der VVB WAB bzw. VEB WAB und die konsequente Anwendung und Durchsetzung der gewonnenen Erkenntnisse bei den laufenden Investitionsmaßnahmen, auch wenn das teilweise noch ein Umdenken erfordert. Erkundung, Projektierung und Betrieb von Uferfiltratfassungen müssen das Ergebnis einer echten Gemeinschaftsarbeit sein.

Dr.-Ing. W. Beyer,
Technische Universität
Dresden,
Sektion Wasserwesen

Die Kolmation der Gewässerbetten bei der Uferfiltratgewinnung

Die Leistungsfähigkeit und Effektivität von Uferfiltratgewinnungsanlagen wird in starkem Maße durch die Infiltrationsleistung des Gewässers bestimmt, wobei die geohydraulische Beschaffenheit des Gewässerbettes infolge auftretender Kolmation die maßgebende geohydraulische Randbedingung darstellt. Daher sind bereits im Rahmen der hydrogeologischen Erkundung der Kolmationszustand des Gewässers und die zu erwartende Kolmationsentwicklung als wichtigste Einflußfaktoren bei der Uferfiltratgewinnung auszuweisen.

Prozeß der Kolmationsbildung

Bei jeder Flüssigkeitsströmung mit dispersen Inhaltsstoffen in einem **porösen** Medium tritt eine Veränderung des ursprünglichen Filterskelettes ein: der Porenraum und effektive Durchflußquerschnitt werden verringert und die Durchlässigkeit des Filterkörpers herabgesetzt.

Kolmation ist die Verdichtung eines Gesteins/Erdstoffs durch die Ablagerung von Sinkstoffen, Schwebstoffen und **Ausfällungsprodukten** des Wassers an der Oberfläche (äußere Kolmation) und/oder in den Klüften/Poren (innere Kolmation) eines Gesteins/Erdstoffs.

Die äußere Kolmation wird hervorgerufen durch Sedimentation von Sink- und Schwebstoffen auf der Oberfläche des Filterkörpers durch den Einfluß der Schwerkraft und des hydrodynamischen Strömungsdruckes, wobei vorwiegend durch mechanische Filterwirkung, verstärkt durch biologische Vorgänge

eine äußere Dichtungsschicht gebildet wird.

Die innere Kolmation wird bedingt durch Invasion von Wasserinhaltsstoffen in die Klüfte und Poren eines Filterkörpers durch den Einfluß der Schwerkraft und des hydrodynamischen Strömungsdruckes, wobei vorwiegend durch Oberflächenkräfte - verstärkt durch mechanische Filterwirkung - eine innere Dichtungsschicht entsteht.

Kolmationsfaktoren sind Einflußgrößen, die den Kolmationsvorgang zeitlich und großemäßig bestimmen.

Dazu gehören:

- Beschaffenheit des Filterkörpers (Gewässerbett/Grundwasserleiter), insbesondere Kornoberfläche, Porengeometrie, Wasserdurchlässigkeit
- Geohydraulische Verhältnisse, insbesondere Größe, Richtung und zeitliche Veränderung der Filtergeschwindigkeit
- Beschaffenheit der Infiltrationsflüssigkeit, insbesondere Art und Menge der Wasserinhaltsstoffe, physikalische Beschaffenheit, Temperatur
- Biologische Verhältnisse, insbesondere Eutrophierungsgrad, Lichtverhältnisse
- Hydraulische Verhältnisse im Bereich der Gewässersohle, insbesondere Strömungsgeschwindigkeiten, Schleppspannung
- Störeinflüsse, insbesondere durch Tiere, Wasserfahrzeuge, Abwasserstöße, Hochwasserwellen
- Betriebsweise

Der Kolmationsvorgang gliedert sich in mehrere Phasen, die teilweise zeitlich nacheinander, vielfach jedoch gleichzeitig verlaufen. Das Eindringen disperser Teilchen in den Filterkörper bewirkt zunächst die Bildung einer oberflächennahen Kolmation, die als Kolmationsdecke je nach Teilchen- und Porengröße nur eine geringe Stärke aufweist, jedoch bereits eine wesentliche Verringerung der Wasserdurchlässigkeit bewirkt. Diese Kolmationsdecke wird durch die hydrodynamische Belastung im Bereich größerer Porenkanäle mit

unstabilen Brücken häufig wieder zerstört. Dadurch ist ein Einwandern von Feststoffteilchen in größere Tiefenbereiche möglich, bis ein den jeweiligen geohydraulischen Bedingungen entsprechender quasi-stabiler Kolmationsfilter der inneren Kolmation aufgebaut ist. Dabei können durch Stoffumwandlung auch anfangs gelöste Stoffe zur inneren Kolmation beitragen. Eine mechanische Filterwirkung tritt ein, wenn Einzelteilchen die Bodenporen unmittelbar verstopfen, d.h. der Durchmesser des Einzelkornes d_k einschließlich der umgebenden Hydrathülle größer ist als die mittlere Porengröße d_p . In Abhängigkeit der wirksamen Korngröße d_w gilt die Beziehung $d_p = 0,41 \cdot d_w$, so daß eine mechanische Filterwirkung bei $d_k > 0,41 \cdot d_w$ wirksam wird, wenn die Hydrathüllen vernachlässigbar klein sind.

Bei der Ablagerung von Aggregaten disperser Stoffe ist eine stabile Brückenbildung bis zu einem Verhältniswert $d_k > 0,55 \cdot d_w$ möglich. Diese Gesetzmäßigkeiten gelten nur, wenn eine reine mechanische Dichtungswirkung vorliegt und keine biologischen bzw. chemischphysikalischen Einflüsse vorhanden sind.

Die chemophysikalische Kolmation wird vorwiegend durch Adsorption von Feinstteilchen auf der Kornoberfläche hervorgerufen. Die nach außen gerichtete Valenz eines Filterkornes baut ein Feld von elektrostatischen Grenzflächenpotentialen auf. Diese Grenzflächenpotentiale ziehen entgegengesetzt geladene Partikel an und halten sie an der Kornoberfläche. Dabei können polarisierte bzw. polarisierbare Stoffe, die sich auf der Kornoberfläche abgesetzt haben, die Kornoberfläche umladen und die Möglichkeit zu einer weiteren Adsorption schaffen.

Die Menge der dispersen Teilchen, die am Filtermaterial zurückbleibt, ist etwa proportional der spezifischen Oberfläche des Korngerüsts, welches direkt an der Filtration beteiligt ist. Diese Haftwirkung beruht nicht allein auf

Adsorption, sondern ist auch auf das Vorhandensein einer Solvat- bzw. Hydrathülle zurückzuführen. Die entstehende Zwischensubstanz wird von Teilchen mit einem Durchmesser $d \leq 2 \cdot 10^{-3}$ mm als schwammartige Masse gebildet.

Diese Sekundärpartikel gleiten gegeneinander und weichen äußeren Kräften elastisch aus. Bei größerer hydrodynamischer Belastung wird dieses schwammartige Gebilde auseinandergerissen, bewegt sich teilweise im Filterkörper weiter und kann sich an anderer Stelle wieder festsetzen. Bei allen Ablagerungen besteht ein Gleichgewicht zwischen der Kohäsion der Solvathülle und dem Strömungsdruck. Die Konzentration der Partikel ist in den obersten Schichten am größten, weil hier die ersten angelagerten groben Teilchen gute Bedingungen für eine weitere Einlagerung bilden.

Bei Austrocknung eines derartig kolmatierten Filterkörpers verkleben die Sekundärpartikel fest am Korn. Bei einer Wiederdurchfeuchtung wird die Durchlässigkeit zunächst größer sein, bis sich wieder Zwischensubstanz durch Anlagerung neuer Sekundärpartikel gebildet hat.

Die biologischen Kolmationsvorgänge sind stark vom Eutrophierungsgrad des Gewässers abhängig. Bei nährstoffreichen, stark eutrophierten Oberflächengewässern kommt es zu einer außerordentlich starken Ansiedlung von Organismen und damit zu einer Kolmation, insbesondere in den oberen Bereichen der Kolmationszone. Die im Gewässerbett eines eutrophierten Flusses angesiedelten Organismen bilden eine artenreiche Biocoenose. Die meisten Organismen sind typische Vertreter für die mesosaprobe und polysaprobe Güteklasse. Dabei sind die obersten Schichten eines Gewässers die Bereiche des größten Organismenreichtums und der stärksten Bakterienentwicklung. Niedrige Temperaturen hemmen die Stoffwechselfvorgänge der Organismen, so daß sich im Winter gegenüber dem Sommerhalbjahr eine Verringerung der Dichtungswirkung zeigt. Die biologisch bedingte Kolmation kann sich in einem kleinporigen Material infolge größerer mechanischer Filterwirkung und Rückhaltung von organischer Nährsubstanzen schnell-

ler ausbilden als bei grobkörniger Beschaffenheit des Gewässerbettes.

Bildung der äußeren Kolmation

Die äußere Kolmationsschicht bildet sich auf der meist schnell entstehenden Kolmationsdecke, wenn die Strömungsverhältnisse außerhalb des Filterkörpers eine Feststoffsedimentation ermöglichen. Da die instabile Kolmationsdecke noch oft durchbrochen wird, verstärkt die äußere Kolmation durch Invasions die innere Kolmation. Die Bildung der äußeren Kolmationsschicht ist abhängig von der Filtergeschwindigkeit bzw. der Schleppspannung des Oberflächengewässers, der Infiltrationsgeschwindigkeit bzw. dem Strömungsdruck, der mittleren Partikelgröße und der Feststoffkonzentration. Als Richtwerte für den Beginn der Geschiebebewegung können für die Grenzwertgeschwindigkeiten v_0 (mittlere Querschnittsgeschwindigkeit) angesetzt werden:

Material	d [mm]	v_0 [m/s]
Schlamm	< 0,06	0,10 ... 0,15
Lehm, lose	0,002 ... 0,06	0,15 ... 0,20
Sand, feiner	0,06 ... 0,2	0,20 ... 0,40
Sand, mittel	0,2 ... 0,6	0,35 ... 0,50
Sand, grob	0,6 ... 2,0	0,45 ... 0,65
Kies, fein	2 ... 6	0,6 ... 0,8
Kies, mittel	6 ... 20	0,8 ... 1,0
Kies, grob	20 ... 60	1,4 ... 1,6

Der grobkörnige Teil der Sedimente bewegt sich als Geschiebe auf der Gewässersohle, während der feinkörnige Teil durch die im Gewässer über den ganzen Querschnitt vorhandene Turbulenz aufgewirbelt und als Suspension weitertrans-

portiert wird. Beide Transportarten können nicht exakt voneinander getrennt werden, da sie gleichzeitig auftreten.

Die Abhängigkeit der Schwebstoffführung von der Wasserführung kann wie folgt gekennzeichnet werden:

- Das relative Maximum der Schwebstoffkonzentration tritt bei anwachsender Flutwelle auf
- Das absolute Minimum der Schwebstoffführung tritt bei beharrenden Wasserständen auf. Bei absinkender Flutwelle nimmt die Schwebstoffkonzentration rasch ab.
- Der Abtrag von Schwebstoffablagerungen während eines Hochwassers erfolgt bis zum Durchgang des Hochwasserscheitels zu zwei Drittel und bei fallendem Wasser zu einem Drittel der gesamten auftretenden Schlammerosion.

Für die Geschiebeführung ist die wichtigste Größe der Geschiebetrieb. Auf ein Geschiebeteilchen an der Sohle wirkt die Schub- oder Schleppkraft parallel zur Strömungsrichtung und die aus der Strömungsturbulenz in Sohlennähe wirkende Auftriebskraft senkrecht. Die Auftriebskraft geht als Resultierende aus den auf die Ober- und Unterseite wirkenden Druckkräften hervor. Die Bestimmung der Schleppkraft wird über den Formwiderstand des Kornes und den Reibungswiderstand geführt. Die Grenzsleppkraft, die eine Geschiebebewegung auslöst, ist um etwa 30 % größer als diejenige Kraft, die erforderlich ist, den Geschiebetrieb aufrechtzuerhalten. Der Verlagerungswiderstand eines Kornes ist abhängig von der mittleren Teilchengröße des Geschiebes, der Ungleichförmigkeit des Geschiebegemenges, dem Eigengewicht, der Form der Geschiebestücke und der Lage des Teilchens im Verband des abgelagerten Geschiebes auf der Sohle des Gewässers.

Bei einem hohen Suspensionsgehalt nehmen Strömungsgeschwindigkeiten und Turbulenz in Sohlennähe ab; bei zunehmendem Schwebstoffgehalt verringert sich die Wirkung der Schlepp-

spannung.

Quantifizierung der Kolmation

Eine durch Kolmation entstehende Dichtungsschicht wird hinsichtlich der geohydraulischen Beschaffenheit durch folgende Parameter gekennzeichnet:

m' [m]	= Mächtigkeit der Kolmationsschicht
k' [m/s]	= Wasserdurchlässigkeit der Kolmationsschicht

Die vertikale Profildurchlässigkeit kann nach folgender Summationsformel ermittelt werden:

$$k'_m = \frac{\sum m'_n}{\sum \frac{m'_n}{k'_n}}, \quad m'_n \text{ [m]} = \text{Mächtigkeit der Schicht n}$$
$$k'_n \text{ [m/s]} = \text{Wasserdurchlässigkeit der Schicht n}$$

Die Kolmation wird durch die komplexe Größe des Infiltrationswiderstandswertes w [m/m/s], bzw. [s], gleichbedeutend der hydraulischen Verlusthöhe, die bei der vertikalen Durchströmung eines Profils mit der Filtergeschwindigkeit v_i auftritt, gekennzeichnet.

$$w = \frac{\Delta h}{v_i} = \frac{m'}{k'} \text{ [m/m/s] bzw. [s]}$$
$$= \frac{\sum m'_n}{\sum k'_n} \text{ [m/m/s] bzw. [s]}$$

Der Widerstand des Profils wird somit durch das Verhältnis $w = \frac{m'}{k'}$ ausgedrückt. Das erfordert die Kenntnis der hydraulisch effektiven Kolmationsmächtigkeit m' und der vertikalen Profildurchlässigkeit k' des kolmatierten Bereiches, der jedoch im allgemeinen tiefenmäßig nicht klar abgegrenzt ist. Der Infiltrationswiderstand des Profils nimmt jedoch mit der Tiefe nicht gleichmäßig zu, sondern es zeigt sich deutlich ein verringerter Anstieg des hydraulischen Widerstandes

unterhalb eines verhältnismäßig stark kolmatierten Bereiches. Diese effektiv vorhandene Kolmationstiefe vergrößert sich mit der Kolmationsentwicklung in Abhängigkeit der verschiedenen Einflußfaktoren. Die hydraulisch effektive Kolmationstiefe reicht etwa bis zu einer Tiefe unter der Filteroberfläche, in der durch Kolmation eine Veränderung des unbeeinflussten k -Wertes um das 5- bis 10-fache eingetreten ist. Die effektive Mächtigkeit m' umfaßt diesen Tiefenbereich.

Für einen nicht kolmatierten Filter kann kein w -Wert angegeben werden, da in diesem Falle die Kolmationsmächtigkeit mit $m' = 0$ anzusetzen ist.

Entwicklung der inneren Kolmation

Für die Kolmationsentwicklung als Veränderung der vertikalen Profildurchlässigkeit k' [m/s] bei gleichbleibenden Infiltrationsbedingungen gelten folgende Beziehungen

in Abhängigkeit der Zeit t

$$k' = f(t) = k_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t^{\beta}} \quad k_0 \text{ [m/s]} = \text{Anfangsdurchlässigkeit}$$

$$\alpha \text{ [1/s]} = \text{Durchlässigkeits- exponent}$$

$$\beta \text{ [-]} = \text{Zeitexponent}$$

in Abhängigkeit der Filterbelastung

$$k' = f(Q) = k_0 \cdot e^{-\alpha \cdot Q^{\beta}} \quad k_0 \text{ [m/s]} = \text{Anfangsdurchlässigkeit}$$

$$\alpha \text{ [1/s]} = \text{Durchlässigkeits- exponent}$$

$$\beta \text{ [-]} = \text{Belastungs- exponent}$$

Die Kolmationsentwicklung, ausgedrückt durch die Veränderung des Infiltrationswiderstandes w , wird durch folgende Beziehungen für gleichbleibende Infiltrationsbedingungen beschrieben:

$$w = f(t) = C \cdot t^{\alpha}$$

C [s/h] = Kolmationskoeffizient
 t [h] = Belastungszeit
 α [-] = Kolmationsexponent

Eine funktionelle Abhängigkeit der Kolmationsentwicklung von den einzelnen Einflußfaktoren kann gegenwärtig noch nicht gegeben werden.

Die Ausbildung der Kolmation nimmt innerhalb des Profils mit der Tiefe ab. Die geringste Durchlässigkeit bzw. den größten Infiltrationswiderstand erreichen die obersten Infiltrationszonen. Die Eindringtiefe der Kolmationsmasse ist dabei in starkem Maße von der Porengröße des Filtermaterials abhängig, jedoch sind auch die Infiltrationsgeschwindigkeit und der Substratgehalt des Wassers von Bedeutung.

Die Eindringtiefe ist bei Material mit größeren Porenabmessungen größer als bei Material mit kleinen Poren. Der Substratgehalt des Infiltrationswassers ist implizit in der Funktionsgleichung der Kolmationsentwicklung enthalten.

Quasi-stabiler Endzustand der inneren Kolmationsentwicklung

Nach Erreichen eines bestimmten Grenzwertes verändert sich der Infiltrationswiderstand der kolmatierten Schicht nur sehr gering. Es bildet sich ein quasi-stabiler Kolmationsfilter, der einen quasi-stabilen Endzustand der Kolmationsentwicklung darstellt. Die dabei vorhandene Profilkolmation ist eine stetige, jedoch nicht gleichmäßige, Veränderung des k' -wertes innerhalb des kolmatierten Tiefenbereiches.

Kolmationstiefe bei Sand und Kies

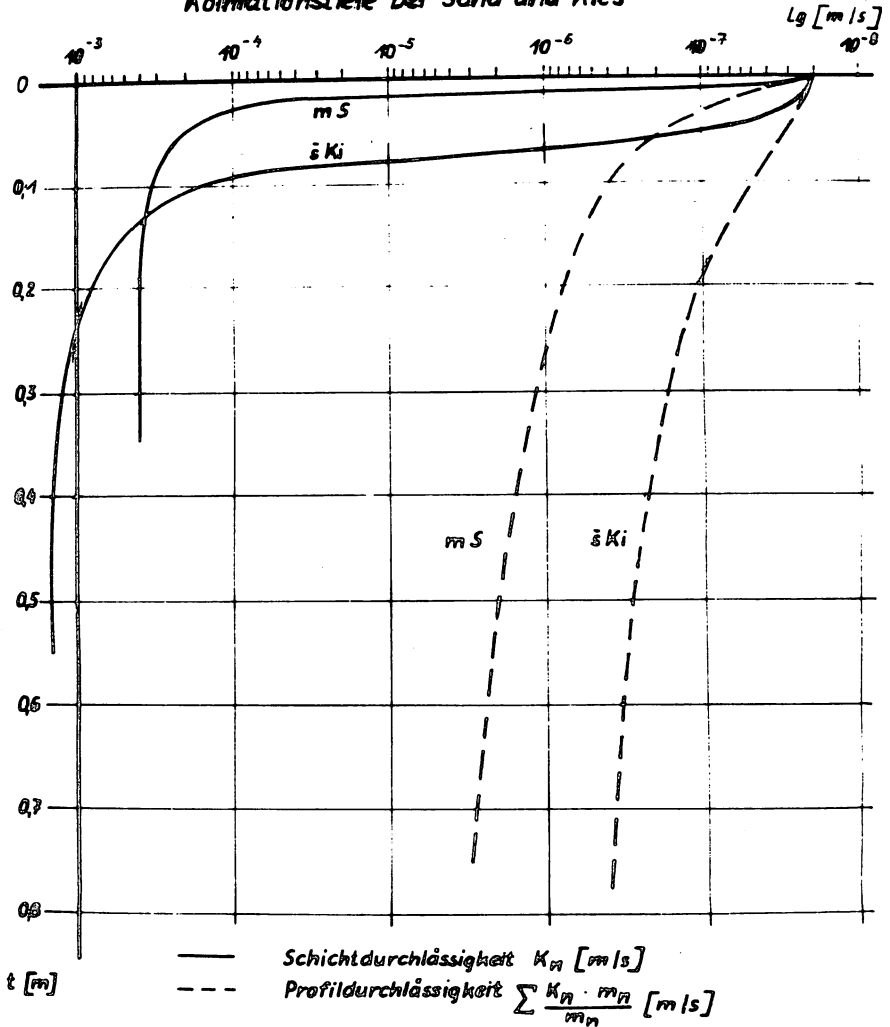


Bild 1

Der quasi-stabile Kolmationsfilter bzw. quasi-stabile **Endzustand** der Kolmationsentwicklung ist bei einem kontinuierlichen Infiltrationsprozeß und einem erosionsstabilen Korngerüst z.B. durch folgende geohydraulische Parameter gekennzeichnet:

Filtermaterial		Sand	Kies
wirks.Korndurchmesser	d_{10} mm	0,2	0,4
Ungleichförmigkeit	U -	2,5	5,0
Profildurchlässigkeit (nicht kolmatiert)	k m/s	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Kolmationsmächtigkeit (effektiv)	m' m	0,03	0,30
Profildurchlässigkeit (kolmatiert)	k' m/s	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Widerstandswert	w m/m/s	$(2..5) \cdot 10^{+5}$	$(2..8) \cdot 10^{+6}$

Die Werte für den quasi-stabilen Endzustand sandiger und kiesiger Gewässerbetten wurden in Auswertung von Feldbeobachtungen bestehender Uferfiltratgewinnungsanlagen durch Einmessung der Grundwasserströmungsfelder erhalten. Die Ausbildung eines stabilen Kolmationsfilters in der angegebenen Größenordnung kann jedoch durch äußere Einflüsse, die den Prozeß der Kolmationsentwicklung stören, teilweise verhindert werden.

Entwicklung der äußeren Kolmation

Die Ausbildung einer äußeren Kolmation durch Sedimentation von Sinkstoffen beeinflusst den Infiltrationswiderstand der Gewässersohle wesentlich nur dann, wenn sich feinste mine-

ralische oder organische Teilchen mit einem hydraulisch wirksamen Teilchendurchmesser etwa in einer Größenordnung $d_w < 0,06$ mm auf der Gewässersohle ablagern können. Größere Sink- und Schwebstoffe im Korngrößenbereich der Sande besitzen eine verhältnismäßig große Wasserdurchlässigkeit, so daß selbst eine Auflandung von $m' = 0,1$ m nur eine unbedeutende Veränderung des Infiltrationswiderstandes bewirken würde. Die Entwicklung einer äußeren Kolmation ist jedoch zu berücksichtigen, wenn die mittlere Profilgeschwindigkeit eines Fließgewässers bzw. die Grundströmung $v = 0,3$ m/s beträgt.

Die sich bildende Schlammhöhe m' und der dabei auftretende Infiltrationswiderstand w als Folge der Infiltration bei der Gewinnung von Uferfiltrat kann in Abhängigkeit von den wichtigsten Einflußgrößen und der Zeit durch folgende Beziehung ausgedrückt werden:

$$m' = c \frac{(1+f)S \cdot q_i \cdot 10^{-6}}{\rho} t \quad [m] \quad t \quad [d] = \text{Infiltrationszeit}$$

$$w = \frac{m'}{k_s} \quad m/m/s \quad S \quad [mg/l] = \text{Infiltrationsleistung}$$

$$= c \frac{(1+f)S \cdot q_i \cdot 10^{-6}}{\rho \cdot k_s} t \quad \rho \quad [kg/l] = \text{absetzbare Schwebstoffe}$$

$$f = \text{Schlammfeuchte}$$

$$\text{i.M. } f = 400\% = 4,0$$

$$c = \text{Schlammdichte i.M.}$$

$$= 1,05 \text{ kg/l}$$

$$c = \text{Konsolidierungsfaktor}$$

$$k_s \quad [m/s] = \text{Wasserdurchlässigkeit des Schlammes}$$

$$\text{i.M. } k_s = 2 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$$

Die Bildung von Sedimenten durch biologische Vorgänge und Schlammanlandungen durch auftretende Strömungsveränderungen infolge Wind, Wellenschlag, Wasserfahrzeugen oder der-

gleichen sind dabei nicht berücksichtigt.

Der durch eine äußere Kolmation bedingte Infiltrationswiderstand vergrößert additiv den w -Wert der inneren Kolmation. Systematisch durchgeführte Gerinneversuche über den Einfluß der Fließgeschwindigkeit auf die Entwicklung der inneren Kolmation ergaben, daß durch eine äußere Kolmation die Entwicklung der inneren Kolmation verringert wird.

Die Filterwirkung der äußeren Kolmation verhindert teilweise das Eindringen der suspendierten Wasserinhaltsstoffe in den Filterkörper, so daß sich die innere Kolmation unter sonst gleichen Bedingungen nicht in vollem Umfang ausbilden kann. Bei einer Vergrößerung des Infiltrationsgradienten und Zerstörung der entstandenen Kolmationsdecke kann allerdings eine äußere Kolmation die Entwicklung der inneren Kolmation verstärken.

Erkundung des Kolmationszustandes

Der vor Betrieb einer geplanten Uferfiltratgewinnungsanlage vorhandene Kolmationszustand ist als Anfangskolmation w_0 im Rahmen der Erkundung auszuweisen.

Diese Anfangskolmation kann bedingt sein durch

- Ausbildung einer Kolmationshaut durch biologische Prozesse im Bereich der Gewässersohle
- Sedimentation von Sinkstoffen
- Invasion von Sink- und Schwebestoffen in das Gewässerbett durch natürliche Infiltration von Oberflächenwasser in das Grundwasser während des Durchganges einer Hochwasserwelle
- Vorbelastung der Gewässersohle durch eine künstliche Grundwasserabsenkung im Uferbereich

Der Kolmationszustand, d.h. die Größe der Anfangskolmation w_0 , erfolgt am zuverlässigsten durch Pumpversuche im Uferbereich nach TGL 23 864 über die Ermittlung der hydraulischen Zusatzlänge infolge Kolmation L_k und des Infiltrationswiderstandes w nach der Beziehung

$$w = \frac{L_k^2}{k \cdot M} \quad [m/m/s]$$

bzw. durch Einmessung eines GW-Strömungsfeldes und modelltechnische oder analytische Bestimmung des w bzw. w_0 -Wertes nach bekannten geohydraulischen Berechnungsverfahren. Die Entnahme von Proben des Gewässerbettes als Stechzylinder- oder Stutzenproben fortlaufend bis 1,0 m Tiefe in ungestörter Lagerung für eine nachfolgende labormäßige Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit k' bzw. des w -Wertes über die Beziehung $w = \frac{m' \cdot n}{k' \cdot n}$ kann nicht so sorgfältig vorgenommen werden, daß keine größeren Fehler auftreten. Auch die Entnahme von Proben in ungestörter Lagerung mit nachfolgender Bestimmung der Porenfüllung S_k mit Kolmationsmasse und der Ermittlung des k' -Wertes mit Hilfe der funktionellen Beziehung $k' = f(S_k)$ ist stark fehlerbehaftet. Die Durchführung von Infiltrationsversuchen auf der Gewässersohle mit Hilfe des Druckinfiltrometers ist möglich, jedoch bereitet die Anwendung dieses Verfahrens unter Wasser versuchstechnisch erhebliche Schwierigkeiten.

Die Ermittlung des Kolmationszustandes

Da die Entwicklung der inneren Kolmation z.Zt. noch nicht durch formelmäßige Beziehung zwischen den zahlreichen Kolmationsfaktoren und dem w -Wert angegeben werden kann, ist die Kolmationsentwicklung labormäßig durch Zylinderversuche, durch halbtechnische Gerinneversuche und durch großtechnische Pumpversuche in Ufernähe bzw. durch Auswertung bestehender Betriebsanlagen zur Uferfiltratgewinnung zu ermitteln.

Das für Praxisuntersuchungen entwickelte Kolmationsgerinne wurde so ausgebildet, daß eine Fließgeschwindigkeit des Oberflächengewässers in Sohlennähe bis zu $v = 0,5$ m/s simuliert werden kann und auch die Möglichkeit besteht, verschiedene Infiltrationsgeschwindigkeiten gleichzeitig zu untersuchen. Die Gerinnesohle ist in der Rauigkeit dem Filtermaterial angepaßt, wodurch Reibungsunterschiede, die zur Bildung von erhöhten Turbulenzströmungen führen, vermieden werden. Das Versuchsgerinne wurde als geschlossenes Druckgerinne so gestaltet, daß ein Wasserüberstau bis etwa $h_1 = 2,0$ m eingestellt werden kann; der Unterdruck ist mit $h_2 = 0,5$ m zu begrenzen, da sonst im Filterkörper Gasauscheidungen auftreten können.

Damit sind Versuche bis zu einem Potentialgefälle von insgesamt etwa $h = 2,5$ m WS möglich. An der Gerinnesohle sind 6 Versuchszylinder angeordnet, die am unteren Ende Reguliereinrichtungen besitzen, um den Filterdurchfluß verändern zu können. Zur Messung der auftretenden Druckhöhenverluste sind in unterschiedlicher Höhe der Zylinder mehrere Piezometer angebracht. Der Einbau des Filtermaterials in die Zylinder erfolgt durch Schüttung unter Wasser, da auf diese Weise Luft einschüsse vermieden werden und eine Lagerungsdichte erreicht wird, die etwa den natürlichen Verhältnissen entspricht. Das Filtermaterial ist aus dem Gewässerbett bzw. aus dem Uferbereich zu entnehmen. Ein äquivalentes Filtermaterial kann verwendet werden, wenn die Kornverteilung der des Gewässermaterials entspricht. Die komplexen Vorgänge bei der Kolmation eines Gewässerbettes können nur dann annähernd simuliert werden, wenn als Infiltrat das Oberflächenwasser unmittelbar verwendet wird. Mit Hilfe dieses Kolmationsgerinnes kann die Abnahme der Wasserdurchlässigkeit infolge Kolmation für einzelne Tiefenabschnitte n und für das gesamte Durchflußprofil bestimmt werden.

Die Ermittlung der Widerstandswerte w erfolgt über die Beziehung $w_n = \frac{m'_n}{K'_n}$; diese Werte sind in Abhängigkeit der Zeit aufzutragen.

Der Kurvenverlauf läßt erkennen, daß z.B. bei einem kiesigen Filtermaterial und Elbewasser als Infiltrat die Entwicklung des w -Wertes bis in den Bereich $w = 10^5$ bis 10^6 m/m/s in der gewählten Darstellung gradlinig verläuft. Daran schließt sich eine Entwicklungsphase mit kleinerem Anstieg an. Die Versuchsdurchführung muß diese Phase der Kolmationsentwicklung unbedingt mit erfassen, um die weitere Zunahme des w -Wertes bis zum quasi-stabilen Endzustand einschätzen zu können.

Auf die Kolmationsentwicklung wirken unter natürlichen Bedingungen Faktoren, die mit Hilfe des Gerinmodells nicht berücksichtigt werden können:

Schiffsverkehr, Wellenschlag, Temperaturschwankungen, Wasserstandsänderungen u.a. Diese Einflüsse bewirken bei sonst gleichen Infiltrationsparametern in ihrer Gesamtheit eine Verzögerung der Kolmationsentwicklung.

Entwicklung der inneren Kolmation

$\lg W$ [m/m/s] --- Kolmationsgerinne } GW-Löcher: s_k , $k = 15 \cdot 10^{-3}$ m/s

--- Anlagen an Elbe und Mulde }

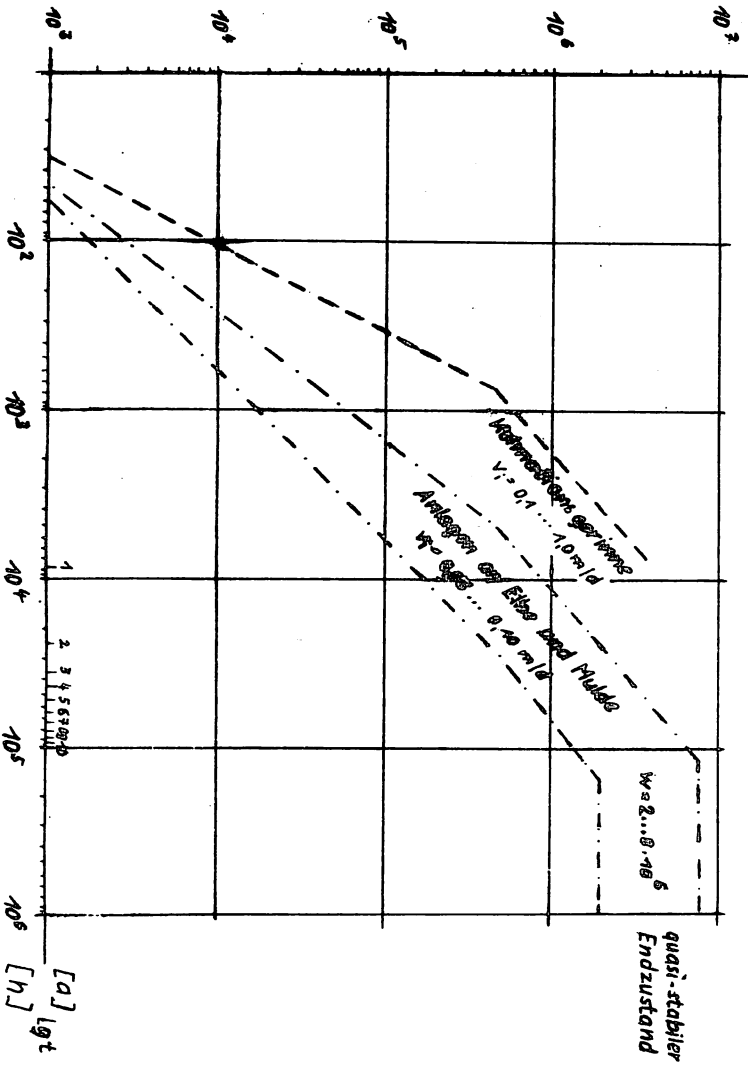


Bild 2

Eine Umrechnung der mit Hilfe von Gerinneversuchen gefundenen Kolmationsexponenten auf natürliche Verhältnisse ist jedoch möglich, wenn die gesetzmäßigen Zusammenhänge zwischen der Flächenbelastung Q und der Kolmationsentwicklung berücksichtigt werden.

Felduntersuchungen an bestehenden Anlagen

Zur Beurteilung der Kolmationsentwicklung und des quasi-stabilen Endzustandes wurden auch mehrere Uferfiltratgewinnungsanlagen langjährig untersucht. Es wurden stationäre Betriebsverhältnisse eingemessen und die w -Werte der Grundwasserströmungsfelder analytisch ermittelt. Die verschiedenen Anlagen zeigten unterschiedliche Kolmationsentwicklung und erreichten auch verschiedene quasi-stabile Endzustände der Kolmation, die jedoch i.M. alle in der Größenordnung $w = 2 \cdot 10^6$ bis $8 \cdot 10^6$ m/m/s lagen. Diese Werte wurden nach einer Betriebszeit von i.M. $t = 5$ bis 8 a erreicht. Die Infiltrationsleistung lag bei den untersuchten Anlagen in der Größenordnung von i.M. $v_i = 0,05$ m³/d.m²; der Schwebstoffgehalt des Infiltrats betrug i.M. $S = 30$ mg/l und die Fließgeschwindigkeit des Gewässers in Sohlennähe i.M. etwa $v = 0,4$ m/s, so daß eine äußere Kolmation im allgemeinen nicht wirksam werden konnte.

Dipl.-Geol. Emshoff
Dipl.-Ing. Krug,
Dipl.-Geol. Tesch
VEB Hydrogeologie Nordhausen

Probleme bei der Bestimmung der Kolmationsparameter für den Vorratsnachweis am Beispiel von Erkundungsobjekten

1. Vorbemerkung

Die Hauptaufgabe des VEB Hydrogeologie besteht darin, Grundwasservorräte nach Menge und Güte entsprechend der Klassifikation der Staatlichen Vorratskommission (StVK) nachzuweisen.

Bei Wasserfassungen mittels Brunnen, die einen hohen Uferfiltratanteil fördern sollen, ist die Kenntnis der Kolmationsparameter von besonderer Bedeutung. Unter Kolmationsparameter wird hier verstanden:

d	Dicke der kolmatierten Schicht [m]
k_v	Durchlässigkeitsbeiwert der kolmatierten Schicht [m/s]
$w = \frac{d}{k_v}$	Infiltrationswiderstand [m/m/s]

Beim Vorratsnachweis kommt es darauf an, neben der Bestimmung des vorhandenen Kolmationszustandes auch die Kolmationsentwicklung innerhalb von Jahrzehnten zu berücksichtigen.

Aus dieser Aufgabenstellung ergeben sich für den Objektbearbeiter vielfältige Probleme. An 2 Beispielen aus der Erkundungspraxis soll dies demonstriert werden. Sie zeigen aber auch unser Bemühen, in Zusammenarbeit mit entsprechenden Forschungseinrichtungen der DDR Lösungswege zu finden.

2. Erkundungsbeispiel A

2.1. Zielstellung

Ziel der hydrogeologischen Untersuchungen bei diesem Beispielobjekt war der Nachweis von Uferfiltratvorräten in der Größenordnung von 20 000 bis 30 000 m³/d. Das speisende Gewässer ist ein größerer See. Die geplante Fassung liegt in der Nähe eines bestehenden Wasserwerkes (WW), das z.T. auch Uferfiltrat fördert. Bild 1 zeigt eine Lageskizze des Fassungsgebietes.

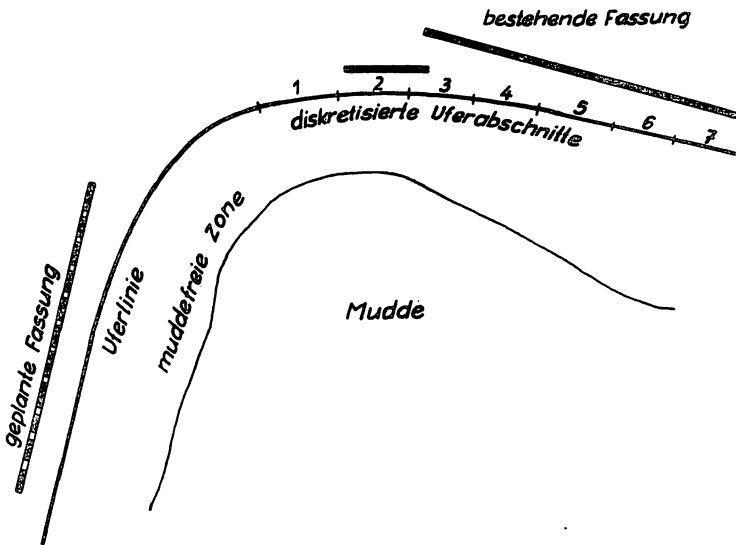
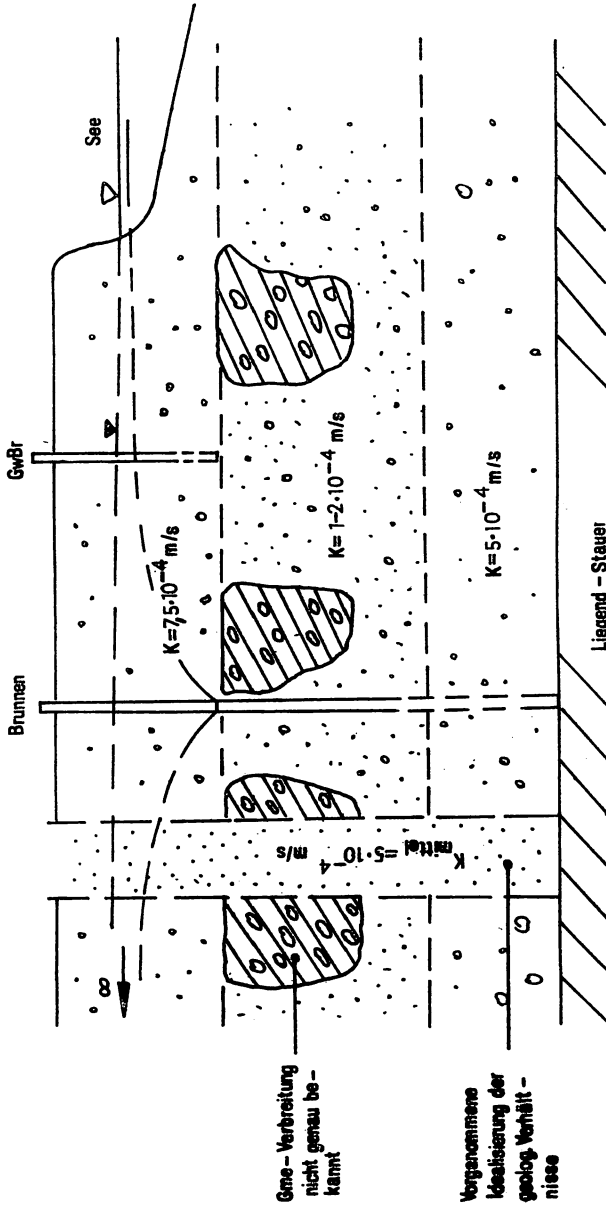


Bild 1 : Lageskizze, Beispielobjekt A

2.2. Hydrogeologische Situation

Der schematische hydrogeologische Schnitt (Bild 2) zeigt einen unbedeckten Grundwasserleiter (GWL) mit durchgehend vorhandenem Liegendstauer. Die Verhältnisse werden kompliziert durch die teilweise vorhandenen Erosionsreste des saalekaltzeitlichen Geschiebemergels, der in Verbindung mit einem Feinsandhorizont zumindest lokal hydraulisch wirksam ist.

Das Ufer des Sees hat einen relativ flach einfallenden Gewässerboden. Aus umfangreichen Sondierungen ergab sich eine weitgehende Abhängigkeit der Muddesedimentation von der Wassertiefe. Bild 3 zeigt zwei Schnitte durch das Seeufer. Offensichtlich fehlen in größeren Wassertiefen ausreichende Strömungskräfte (z.B. infolge von Wellenbewegungen), um Sedimentationen abzutragen. Somit wird das Gefälle des Seebodens maßgebend für die Breite der muddereinen Zone, die primär als Filtrationsfläche beim Uferfiltrationsprozeß fungiert.



Gene-Verföretung
nicht genau be-
kannt

Vergangenere
Klassifizierung der
geolog. Verhäll-
nisse

Bild 2: Hydrogeologischer Schnitt
Bsp-objekt A

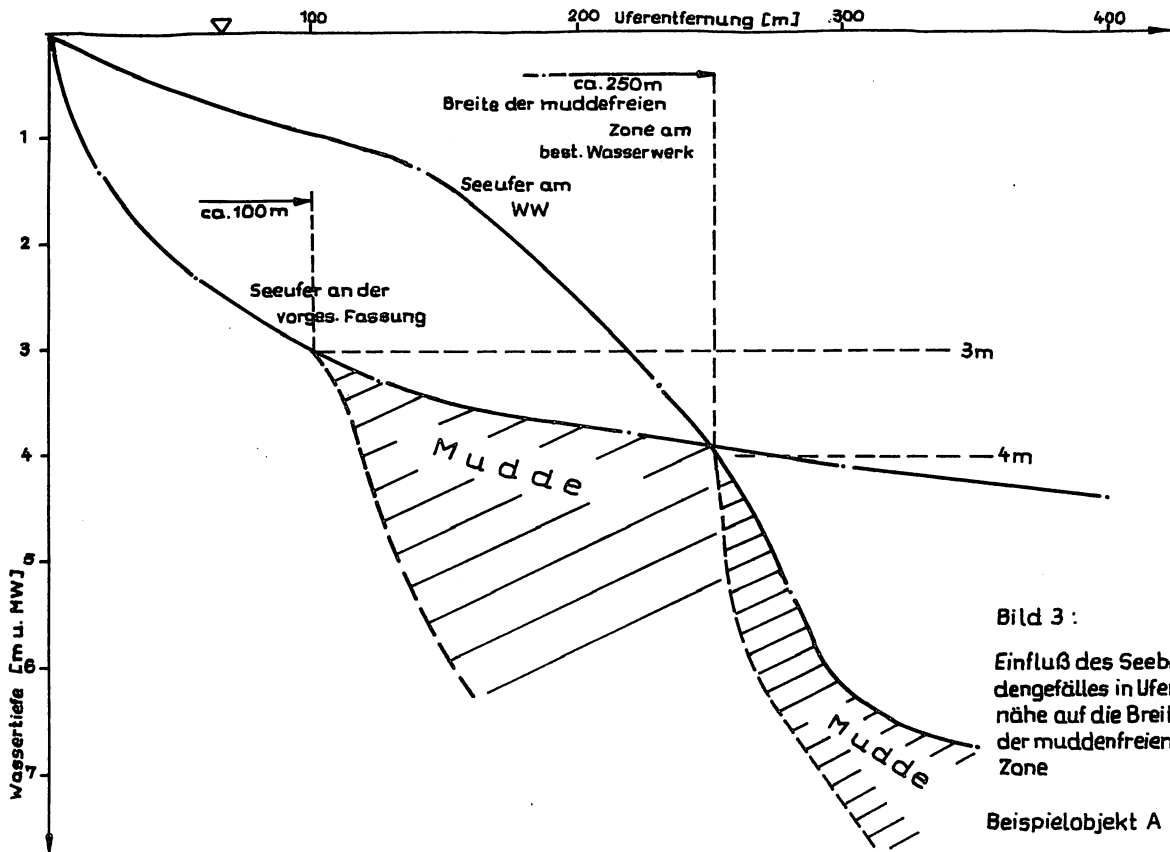


Bild 3 :
Einfluß des Seebo-
dengefälles in Ufer-
nähe auf die Breite
der muddenfreien
Zone

Beispielobjekt A

2.3. Bedeutung der Kolmationsparameter für den Vorrats- nachweis

Die genannten Parameter gehen in die Berechnung der Vorräte wie folgt ein:

$$\Delta L_2 = \sqrt{\frac{k M d}{k_V}}$$

beim analytischen Nachweis für
 $b \rightarrow \infty$ und $k > 50 k_V$
entsprechend WAFRO 1.42

und

$$R^0 = \frac{1}{k_V} \cdot \frac{d}{F}$$

beim Elektroanalogiemodell

In den Beziehungen bedeutet:

ΔL_2	fiktive hydraulische Zusatzlänge	[m]
k	Durchlässigkeitsbeiwert des GWL	[m/s]
M	Mächtigkeit des GWL	[m]
R^0	hydraulischer Widerstand	[s/m ²]
F	infiltrierende Fläche	[m ²]

Bei großen Werten ΔL_2 bzw. R^0 wird die Leistungsfähigkeit der Uferfiltratfassung wesentlich eingeschränkt.

Für d und k_V sind Werte zu verwenden, die sich im ungünstigsten Fall einstellen werden. Dabei ist vor allem die Frage von Bedeutung: Gibt es einen stabilen Endzustand der Kolmation und nach welcher Zeit stellt er sich ein?

2.4. Untersuchungen der TU Dresden, Arbeitsgruppe Hydrotechnische Bodenkunde

Diesen Untersuchungen lag folgende Methodik zugrunde:

- Erfassung des Kolmationszustandes durch Felduntersuchungen (Bohrungen, Sondierungen, Pumpversuche)

- Ermittlungen zur Kolmationsentwicklung durch Laborversuche.

Die Arbeiten führten zu folgenden Ergebnissen:

innere Kolmation	$w_i = 4 \cdot 10^5$	m/m/s	$t_i = 0,15$	a
äußere Kolmation	$w_a = 2 \cdot 10^5$	m/m/s	$t_a = 17,1$	a
<hr/>				
gesamte Kolmation	$w_n = 6 \cdot 10^5$	m/m/s	$t_n = 17,25$	a

Die Zeit bis zum Erreichen des Endzustandes der inneren Kolmation t_i wurde für eine Infiltrationsrate von $q_g = 0,05$ m/d ermittelt.

Bemerkenswert ist, daß die innere Kolmation in relativ geringer Zeit einen bestimmten stabilen Endzustand erreicht. Die äußere Kolmation schreitet dagegen ständig weiter fort, wenn nicht ein Abtrag der Kolmationsmasse erfolgt. Bei der Ermittlung des genannten Wertes $w_a = 2 \cdot 10^5$ m/m/s für die äußere Kolmation wurde davon ausgegangen, daß zwar eine abtragende Grundströmung vorhanden ist, eine konsolidierte Schlammschicht von 5 mm Höhe als äußere Kolmation aber erhalten bleibt.

2.5. Untersuchungen des VEB Hydrogeologie

Die Untersuchungen, die vom VEB Hydrogeologie parallel zu den Arbeiten der TU durchgeführt wurden, lassen sich in 3 Komplexe gliedern:

1. Hydrogeologische Untersuchungen im vorgesehenen Fassungsgebiet
 - Bohrungen auf der Trasse und im Einzugsgebiet
 - Pumpversuche
 - Untersuchungen des Gewässers (Sondierungen des Gewässerbodens, Uferbohrungen, Wasserbeschaffenheit).

2. Auswertung der Betriebsverhältnisse eines am gleichen Gewässer gelegenen Wasserwerkes, das bereits seit mehreren Jahrzehnten fördert.
3. Analogiebetrachtungen zur sinnvollen Übernahme der Ergebnisse, die beim bestehenden WW gewonnen wurden, auf den Standort des neuen Werkes.
 - Vergleich der Strömungsfelder
 - Bewertung der zur Verfügung stehenden Filtrationsflächen
 - Analyse der Gewässereigenschaften (Strömung, Wellenbewegung, Schiffsverkehr, Wassertiefen u.a.).

Auf den 2. Komplex soll im folgenden näher eingegangen werden:

Zur Auswertung der Betriebsergebnisse des Wasserwerkes wurden aus Altunterlagen Förderzahlen ermittelt, die jedoch nur lückenhaft und überwiegend als Gesamtleistung des Werkes vorlagen, somit keine Zuordnung zu bestimmten Fassungsabschnitten zuließen. Auf der Grundlage von Grundwasserbeobachtungen der WWD wurden Isohypsenpläne für folgende Zeitpunkte angefertigt:

Oktober 1908
November 1918
Juli 1925
Oktober 1937
Oktober 1961
Mai 1971

Durch Aufmessung der Potentiale des simulierten Strömungsfeldes im Elektroanalogiemodell konnte für jeden Zustand bei guter Übereinstimmung der realen mit den modellierten Verhältnissen eine Aufteilung der Zuflüsse zur Fassung erreicht werden. Die Uferlinie des Sees wurde in die Abschnitte 1 - 10 unterteilt (Bild 1), so daß für jeden diskreten Abschnitt die Potentiale und der Uferfiltrat-

zufluß meßbar waren. Dabei konnten auch die Eintrittswiderstände - zunächst als elektrische Widerstände - ermittelt werden. Diese elektrischen Widerstände wurden in fiktive Zusatzlängen ΔL_2 umgerechnet.

Jahr	fiktive Zusatzlänge ΔL_2 m je Uferabschnitt										örtl. Mittelwert	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		Σ
1908	0	36	36	36	35	35	35	35	92	0	340	34
1918	0	0	37	37	19	19	125	125	125	0	514	51
1925	39	289	36	0	19	19	42	42	81	152	719	72
1937	146	294	120	36	63	63	51	51	82	158	1024	102
1961	0	84	36	7	42	120	120	118	74	40	641	64
1971	0	177	36	12	45	100	100	59	60	24	613	61
Σ	185	878	301	128	223	356	473	430	541	304	-	-
zeitlicher Mittelwert	31	129	50	21	37	59	79	72	90	62	-	-

Tabelle 1: Räumliche und zeitliche Verteilung der im Elektroanalogiemodell ermittelten ΔL_2 -Werte - Beispielobjekt A

Die ermittelten Werte ΔL_2 zeigt Tabelle 1.

Die ΔL_2 -Werte ändern sich sowohl von Abschnitt zu Abschnitt innerhalb eines Zustandes als auch von einem Zustand zum anderen innerhalb eines Abschnittes.

Bei der Wertung der Einzelergebnisse muß man folgende Gesichtspunkte beachten:

- die geologischen Verhältnisse wurden idealisiert

- im Uferbereich standen verhältnismäßig wenig Wasser-
spiegeleinmessungen zur Verfügung
 - es fehlte eine detaillierte Aufschlüsselung der Förder-
leistung auf die einzelnen Galerie-Abschnitte
 - Neubildung im Bereich des WW wurde vernachlässigt.
- Trotz dieser Unzulänglichkeiten sind wir der Auffassung,
daß die zeitlichen und örtlichen Mittelwerte (die im ge-
wissen Umfang Fehler im Detail eliminieren) interessante
Erkenntnisse vermitteln:

Der zeitliche Mittelwert schwankt zwischen

$\Delta L_2 = 21 \dots 129$ m. Die grafische Darstellung zeigt Bild
4 a. Die Schwankungen lassen sich wie folgt deuten:

- Im Abschnitt 2 treten die größten Uferbelastungen auf
(Galerie steht dicht am Ufer)
- Im Bereich der Abschnitte 3, 4 und 5 befindet sich eine
Geschiebemergleinlagerung
- Obwohl im Abschnitt 8 die Galerie dichter am Ufer liegt
als bei den benachbarten Abschnitten, ist ΔL_2 geringer.
Dies kann mit dem hier vorhandenen starken Badebetrieb
erklärt werden.

Aus den örtlichen Mittelwerten und der Förderganglinie
(Bild 4 b) lassen sich folgende Zusammenhänge ableiten:

- Die Kolmation hat bis 1937 bei hoher Förderung ständig
zugenommen.
- In den Jahren 1942 bis 1951 ist die Förderung teilweise
stark zurückgegangen. Da in den Jahren nach 1951 klei-
nere ΔL_2 auftreten als 1937, könnte man annehmen, daß
in der Zeit geringerer Förderung und damit auch ge-
ringerer Uferbelastung Kolmation abgebaut wurde.
- Für den Zeitraum 1961 bis 1972 deutet sich ein verhält-
nismäßig stabiler Zustand an, der aber nicht als ge-
sichert angesehen werden kann.

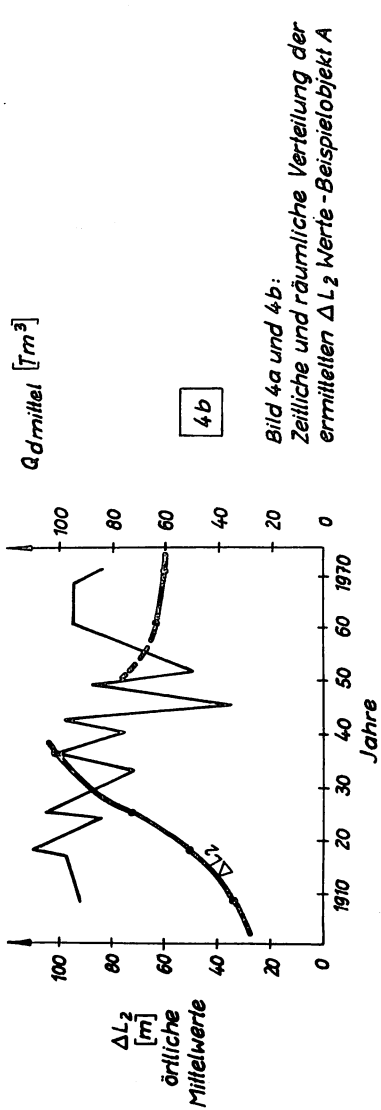
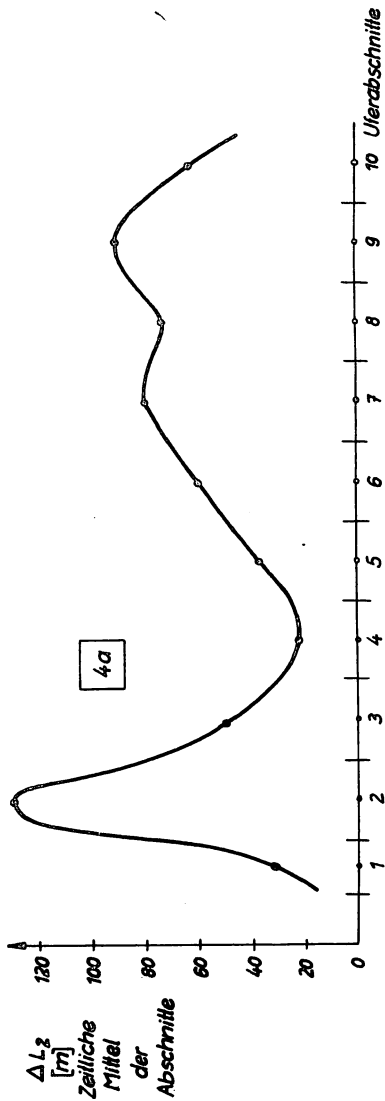


Bild 4a und 4b:
Zeitliche und räumliche Verteilung der
ermittelten ΔL_2 Werte - Beispielojekt A

2.6. Erkenntnisse für den Vorratsnachweis

Ein örtlicher Mittelwert $\Delta L_2 = 102$ m wurde bei den untersuchten Zuständen nicht überschritten. Mit diesem Wert erhält man folgenden Infiltrationswiderstand:

$$w = \frac{(\Delta L_2)^2}{k \cdot M} = \frac{102^2}{5 \cdot 10^{-4} \cdot 31,5} = 6,6 \cdot 10^{-5}$$

mit

$$k = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

$$M = 31,5 \text{ m.}$$

Es ergibt sich hier eine erstaunlich gute Übereinstimmung mit der Empfehlung im Gutachten der TU Dresden, AG Hydro-technische Bodenkunde, einen Wert $w = 6 \cdot 10^{-5}$ m/m/s zu verwenden.

Mit Rücksicht auf die zwar erkannten aber nicht exakt bestimmbareren Abhängigkeiten der Kolmation von den verschiedenen Faktoren wurde der Vorratsnachweis mit einem Wert $w = 9 \cdot 10^{-5}$ m/m/s geführt. Es wurde aber empfohlen, die geplante Fassung zunächst im Versuchsbetrieb zu fahren.

3. Beispielobjekt B

3.1. Zielstellung

Ziel der gegenwärtig laufenden hydrogeologischen Untersuchungsarbeiten ist der Vorratsnachweis für ein bestehendes Wasserwerk an einem Fluß sowie die Untersuchung seiner Erweiterungsmöglichkeit. Die derzeitige Kapazität liegt bei 50 000 bis 60 000 m³/d und soll auf das Doppelte gesteigert werden.

Die o.g. Wassermenge, gewinnbar aus Grundwasser, Uferfiltrat und Infiltrat (Grundwasseranreicherung) soll in kürzester

Zeit zur Sicherung der Trinkwasserversorgung bereitgestellt werden.

Die ca. 6,2 km lange Brunnengalerie der Fassungsanlage (Heberleitung mit ca. 170 Förderbrunnen) erstreckt sich in 350 - 500 m Entfernung entlang eines Flusses (hierzu siehe Bild 5).

Die Fassungsanlage wird durch 2 Sammelbrunnen bewirtschaftet, wobei die höchstmögliche Absenkung im nördl. Abschnitt ca. 7 m, im südlichen Abschnitt bei ca. 9,5 m unter den Flußwasserspiegel zulässig ist.

3.2. Hydrogeologische Situation

Entgegen dem ersten Beispiel sollen hier die Untersuchungen für eine flußnahe Fassung geführt werden.

Der ca. 35 m breite Fluß ist kanalisiert und an den steil einfallenden Ufern mit Steinpackungen befestigt.

Sondierungen über den Gewässerboden (natürliche Gefälleverhältnisse der Kanalschle, Muddemächtigkeit und Ausbildung des ca. 2,8 - 3,5 m tiefen Kanals liegen bisher nicht vor.

Für das Gewässer ist ferner charakteristisch:

- hohe Schiffsfrequenz
- sehr geringe Fließgeschwindigkeiten durch künstliche Stauhaltungen
- relativ starke Schwebstoffbelastung
- zeitweise Verringerung der Infiltrationsrate im Gewässerbett durch Überflutung der Flußniederung

Im Bereich der unmittelbaren Fassungsanlage liegt ein bedeckter Grundwasserleiter vor, wobei in größeren Abschnit-

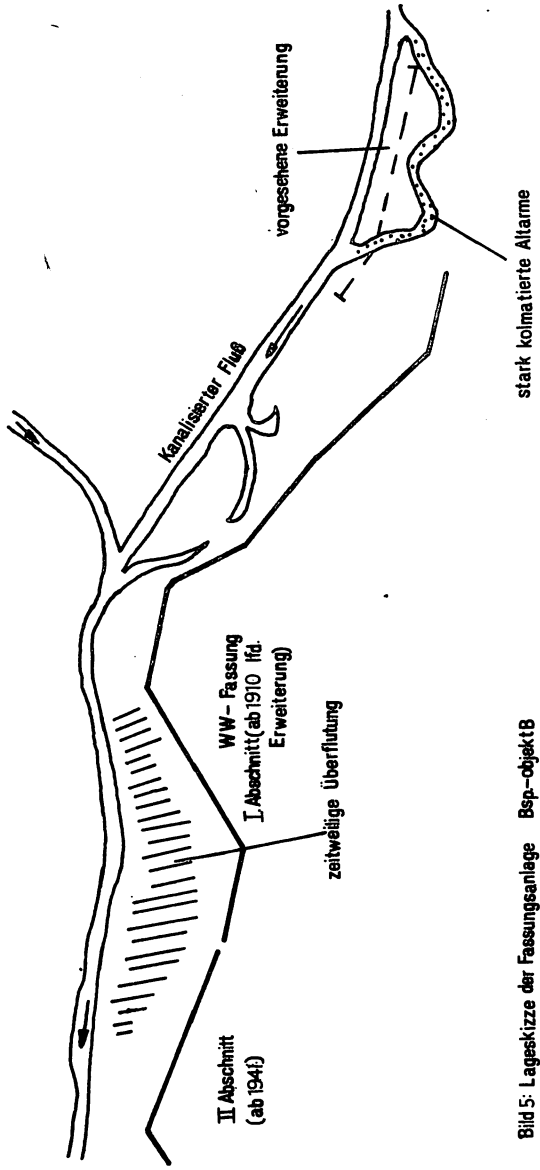


Bild 5: Lagekizze der Fassungsanlage Bsp-objekt B

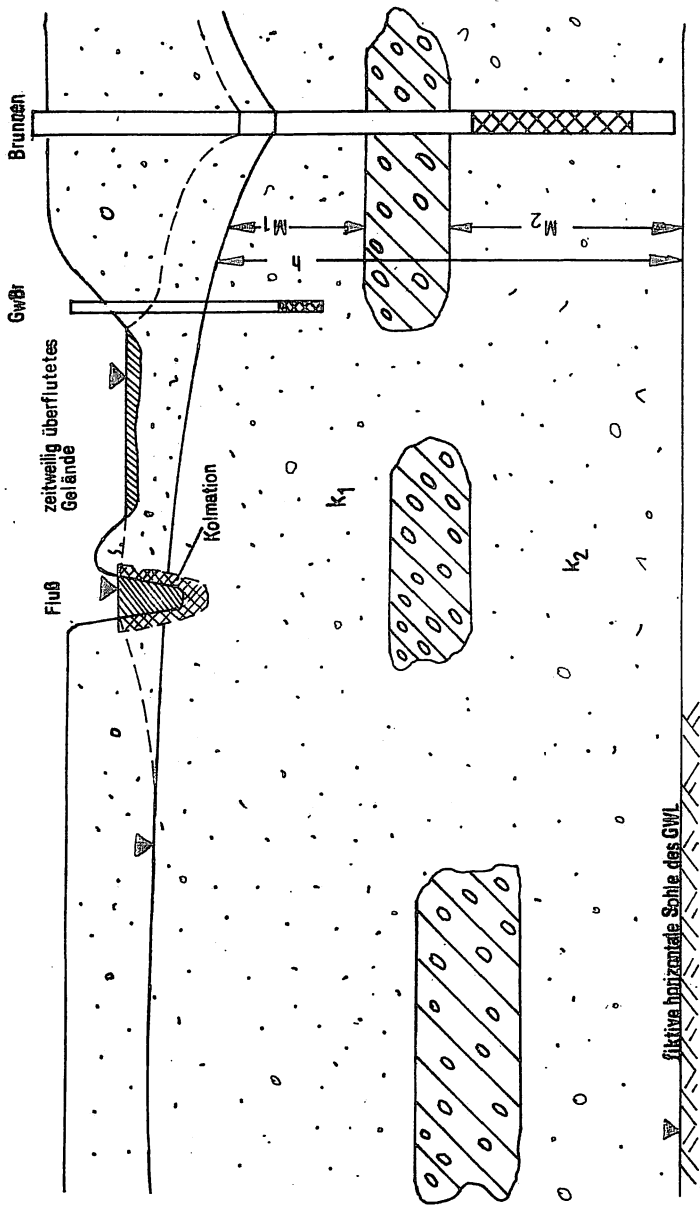


Bild 6: Hydrogeologischer Schnitt Bsp-Objekt B

ten im Bereich der Nordgalerie der obere Geschiebemergel (Saalekaltzeit) nur noch in Erosionsresten vorhanden ist bzw. in stark gestörter Lagerung (Stauchungszone) im Rahmen der Erschließungsarbeiten erbohrt werden konnte.

Im Bereich der Ufer- bzw. ufernahen Zone ist der obere Geschiebemergel nach dem bisherigen Erkundungsstand völlig erodiert; im Hangenden des Hauptgrundwasserleiters werden jedoch Schluff- und Feinsandlagen in größerer Mächtigkeit hydraulisch wirksam. (Schwierigkeit bei der Festlegung des mathematischen Modells zur Erfassung entweder einer gespannten Grundwasserströmung oder einer Grundwasserströmung mit freier Oberfläche über einer horizontalen Sohle).

Bild 6 zeigt eine schematische Darstellung der relativ komplizierten Verhältnisse des Untersuchungsgebietes.

3.3. Abhängigkeit der Vorräte von der Kolmation

Auch bei diesem Beispiel hat die Kolmation entscheidenden Einfluß auf die Erweiterungsmöglichkeiten des WW. Die exakte Analyse des Kolmationszustandes gibt hier bereits Aufschluß, ob die geplante Leistung überhaupt mit Uferfiltrat erzielt werden kann.

3.4. Untersuchungen zur Kolmationsentwicklung des Institutes für Wasserwirtschaft

Im Rahmen einer Forschungsarbeit hat das IfW die Kolmationsentwicklung des WW in einem Zeitraum von 1935 bis 1971 untersucht. Die hier interessierenden Ergebnisse wurden in Tabelle 2 zusammengestellt.

Jahr	Zustand Monat	ΔL_2 [m]	q [%]
1935	April	58,7	100
1939	"	86,0	64
1943	"	31,5	62
	Oktober	167,5	100
	Dezember	118,7	132
1947	Juli	112,0	101
1956	April	130,2	36
<hr/>			
1960	Oktober	788	41
1969	"	952	43
1971	April	656	50
	Oktober	940	52

Tabelle 2: Zeitliche Entwicklung der Werte ΔL_2 -
Beispielobjekt B

Aus diesen Ergebnissen läßt sich ableiten:

- Obwohl die Leistung des Werkes in den letzten Jahren nur etwa 50 % der des Jahres 1935 betrug, hat die Kolmation in der generellen Tendenz erheblich zugenommen.
- Die Ursachen für die zeitweise Abnahme der Kolmation könnten sein:
 1. Verlagerung des Schwerpunktes der Förderung auf andere Galerieabschnitte
 2. Baggerungen
 3. Hochwasserereignisse einschließlich Überflutung der Flußniederung.
- Offensichtlich existiert bei diesem Gewässer kein Endzustand bei der äußeren Kolmation, was im Hinblick auf den Charakter des Gewässers durchaus denkbar wäre.
- Eine Ursache für die starke Zunahme der Kolmation nach 1956 könnte in einer höheren Schwebstoffbelastung des Gewässers liegen.
- Es kann mit großer Sicherheit angenommen werden, daß der vorhandene Kolmationszustand eine Kapazitätserweiterung durch verstärkte Uferfiltratförderung nicht zuläßt.

Interessant ist auch der Vergleich mit den Ergebnissen beim Beispiel A:

Obwohl die geologischen Verhältnisse gleich sind, die Uferbelastung beim Beispiel A sogar größer war, sind derartig hohe Werte für ΔL_2 wie beim Beispiel B nicht aufgetreten. Hier wird der Einfluß der Spezifik des Oberflächengewässers deutlich.

3.5. Aufgaben für die laufenden Erkundungsarbeiten

Im Rahmen der laufenden Erkundungsarbeiten müssen folgende Fragen im Hinblick auf den zu führenden Vorratsnachweis beantwortet werden:

- Wie ist der Verlauf der weiteren Kolmationsentwicklung im Bereich der vorhandenen Fassungstrasse sowie im Bereich einer eventuellen Erweiterung?
- Werden künstliche Versickerungsbecken angeordnet, so verliert die Frage der Kolmation des Gewässers an Bedeutung. Dafür muß geklärt werden, welche Infiltrationswiderstände können bei künstlichen Becken auftreten bzw. zugelassen werden.

4. Zusammenfassung

Das Anliegen unseres Vortrages war, die Schwierigkeiten zu demonstrieren, vor denen der Objektgeologe vielfach steht, wenn Uferfiltratfassungen zu bearbeiten sind. Durch die in der Vergangenheit geleisteten Forschungsarbeiten hat sich die Situation wesentlich verbessert. Wir halten es aber für wichtig, daß in weiteren grundlegenden Arbeiten, vor allem die Abhängigkeit der äußeren Kolmation von den verschiedensten Einflußfaktoren untersucht wird, wobei hier zunächst offen bleiben muß, von wem diese Aufgaben zu lösen sind.

Aus unserer Sicht ergeben sich diese Schlußfolgerungen:

- Die Unterscheidung von innerer und äußerer Kolmation erscheint zweckmäßig, da sie jeweils anderen Gesetzmäßigkeiten unterliegen;
- Die Elektroanalogiemodellierung ist zur Bestimmung des Kolmationszustandes geeignet;
- Die Entwicklung der inneren Kolmation kann durch entsprechende Laborversuche bestimmt werden;

- Die Entwicklung der äußeren Kolmation ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig (u.a. Ufergestaltung, Beschaffenheit des Oberflächenwassers, hydrographische Daten, Uferbelastung), sie läßt sich deshalb nur ungenügend versuchsstechnisch bestimmen;
- Die Entwicklung der äußeren Kolmation ist ausschließlich durch direkte Erkundungsmaßnahmen nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht bestimmbar;
- Nach unserer Auffassung ist die Analyse verschiedener Betriebszustände bestehender Wasserwerke in Verbindung mit speziellen hydrogeologischen Untersuchungen ein aussichtsreiches Mittel zur Bestimmung der Kolmationsparameter;
- Die Nutzung der ersten Ausbaustufe einer Uferfiltratfassung zur Bestimmung der Kolmationsentwicklung ist eine Möglichkeit, Risiken zu vermeiden.

Dr. rer. nat. W. Huhn,
Institut für Wasserwirtschaft,
Berlin

Das Verhalten organischer Wasserinhaltsstoffe bei der Bodenpassage

Allgemeine Betrachtungen

Das Verhalten organischer Wasserinhaltsstoffe bei der Bodenpassage ist heute aus 3 Gründen neu zu überdenken:

1. Die Zukunft der Trinkwasserversorgung liegt in der indirekten Nutzung von verschmutztem Oberflächenwasser.
2. Durch die Chemisierung der gesamten Volkswirtschaft gelangen in zunehmendem Maße biochemisch schwer abbaubare und physiologisch bedenkliche organische Verbindungen in die Gewässer und reichern sich dort an.
3. Die rasche Entwicklung der Analysetechnik bis hin zur kombinierten Gaschromatographie - Massenspektrometrie hat unsere Kenntnisse über das Vorkommen organischer Wasserinhaltsstoffe auch in Spurenkonzentrationen beträchtlich erweitert.

Die grundlegenden Prozesse zur Entfernung organischer Wasserinhaltsstoffe bei der Bodenpassage sind Siebwirkung, Adsorption und biochemischer Abbau. Die Wirkung einer Humusdecke soll hier als nicht typisch für eine Infiltration ausgeklammert werden. Die organischen Wasserinhaltsstoffe werden zweckmäßig in ungelöste und gelöste, biochemisch abbaubare und resistente sowie dissoziierte und molekular gelöste eingeteilt.

Die ausgezeichnete Raumfilterwirkung der obersten Kies- oder Sandschicht einer Infiltrationsstrecke gewährleistet die

Eliminierung aller **organischen** Stoffe, die adsorptiv an suspendierte Partikel gebunden sind oder selbst in suspendierter Form vorliegen. Ein großer Teil der polyzyklischen Aromaten (etwa 70 %) ist durch eine mechanische Reinigung zu entfernen. Die sich bildende Kolmationsschicht ist biologisch äußerst aktiv, bedingt durch eine große Besiedlungsdichte und ein reiches Nahrungsangebot. Leicht abbaubare Verbindungen werden unter einem erheblichen Sauerstoffverbrauch und CO_2 -Anstieg weitestgehend umgesetzt. Der oft sehr angespannte Sauerstoffhaushalt der Gewässer erweist sich in zunehmendem Maße als begrenzender Faktor für eine Uferfiltration unter aeroben Bedingungen, während die Möglichkeit der Vorbelüftung einen erheblichen Vorteil der künstlichen Grundwasseranreicherung darstellt.

Da die biologisch aktive Zone aber **eng** begrenzt ist, ist die Kontaktzeit für gelöste schwer abbaubare Verbindungen, die nicht in dieser Zone fixiert werden können, für eine maßgebliche Reduzierung zu kurz. Die lange Aufenthaltszeit des Infiltrats im Grundwasserleiter, die in Extremfällen in der DDR mehrere 100 Tage betragen kann, wird allgemein als ein wesentlicher Vorteil für die Wassergüteverbesserung gewertet. Es ist jedoch zu bedenken, daß für einen Abbau resistenter Verbindungen denkbar ungünstige Bedingungen herrschen. Ein guter Grundwasserleiter besteht aus Sanden und Kiesen ohne nennenswerte Adsorptionskapazität. Mikroorganismen sind wegen der guten Filterwirkung der Kolmationsschicht und des geringen und spezifischen Nahrungsangebotes nur spärlich vorhanden; der Sauerstoff-Partialdruck ist im Untergrund meist sehr gering.

Zu den schwer abbaubaren Substanzen zählen die Humin- und Ligninstoffe. Sie passieren nur wenig vermindert die Kolmationsschicht und werden im Grundwasserleiter äußerst langsam entfernt, wofür auch die geringe Abnahme des Farbgrades

als Bestätigung gilt. Die Effektivität einer Trinkwasseraufbereitung kann heute nicht mehr mit ruhigem Gewissen nur nach ästhetischen, bakteriologischen und technischen Kriterien beurteilt werden. Auch solche Wasserinhaltsstoffe können schädlich sein, die nicht mit den Sinnesorganen wahrnehmbar sind. Eine akute Toxizität bleibt auf **Katastrophenfälle** beschränkt. Sehr viel bedeutsamer ist die chronische Toxizität mancher organischer Spurenstoffe bei dauerndem Genuß, über deren Ausmaß noch wenig bekannt ist.

Die bedeutendste biologisch und chemisch resistente Fraktion der gelösten organischen Stoffe sind die unpolaren, im Wasser sehr wenig löslichen Verbindungen, die sich durch unpolare organische Lösungsmittel, wie Tetrachlorkohlenstoff, Chloroform oder n-Hexan, aus dem Wasser extrahieren lassen. Zu ihnen gehören 10 physiologisch wirksame Verbindungen, wie die chlororganischen Pestizide, die kanzerogenen polyzyklischen Aromaten und die Polychlorbiphenile, die durch die gebräuchlichen Wasseruntersuchungsmethoden, wie biochemischen und chemischen Sauerstoffverbrauch nicht erfaßt werden. Durch ihren lipophilen Charakter können diese Stoffe im Körperfett angereichert werden und als Summationsgift wirken. Ihr Verhalten bei der Bodenpassage wurde zur Ermittlung der Leistungsgrenze dieses Verfahrens in einer 3-jährigen Arbeit untersucht, über die im folgenden kurz berichtet werden soll.

Spezielle Untersuchungen

Den ersten Schwerpunkt bildeten Untersuchungen zum Verhalten der einzelnen Gruppen des lipophilen Extraktes in den Grundwasseranreicherungsanlagen Dresden-Hosterwitz an der Elbe und Wiesenburg an der Zwickauer Mulde. Eine weitere Charakterisierung der einzelnen Extraktgruppen wurde mit Hilfe der UV-VIS- und IR-Spektroskopie sowie der Dünnschichtchromato-

graphie vorgenommen. Parallel zur Anreicherung liefen direkte Wasseranalysen. Den zweiten Schwerpunkt bildeten Modellversuche mit ausgewählten lipophilen Substanzen zum biochemischen Abbau und zur Adsorption während der Grundwasseranreicherung. Die Versuche zum biochemischen Abbau wurden unterteilt in Versuche zur Wirkung der biologisch aktiven oberen Kiesschicht und eines längeren Aufenthaltes im biologisch wesentlich weniger aktiven Grundwasserleiter. Zur Untersuchung der physikalisch-chemischen Adsorption an unbelebtem Material des Untergrundes wurden Feinsand, Tone und Eisen (III)-oxid eingesetzt.

Lipophile Extraktstoffe:

Die Anreicherung der lipophilen Wasserinhaltsstoffe erfolgte durch kontinuierliche Flüssig-Flüssig-Extraktion in einer pulsierenden Füllkörperkolonne mit Tetrachlorkohlenstoff-Kreislauf. Der Extrakt wurde durch Verteilung zwischen Äther und Wasser bei unterschiedlichen pH-Werten in die Fraktionen Ätherunlösliches, Basen, Amphotere, starke Säuren, schwache Säuren und Neutralstoffe zerlegt. Die Neutralstoffe wurden weiter säulenchromatographisch an Aluminiumoxid in Aliphaten, Aromaten und oxydierte Stoffe getrennt. Insgesamt wurden 9 verschiedene Extrakte untersucht. Die extrahierten Wassermengen lagen zwischen 1000 und 4500 l. Unbehandeltes Elbwasser ergab eine Extraktkonzentration von 1,16 mg/l. Als Untersuchungsprofil diente im Wasserwerk Hosterwitz eine 80 m lange Strecke zwischen einem Infiltrationsbecken und der Heberleitung, wobei 6 Pegel vorhanden waren. Im extrem trockenen Herbst 1969 wurden geflocktes Rohwasser vor der Infiltration und Infiltrat aus dem Pegel 1 extrahiert. Die Werte von 280 und 269, µg/l zeigen eine unwesentliche Abnahme der lipophilen Extraktstoffe bei der vertikalen Untergrundpassage. Das Reinwasser enthielt noch 184, µg/l. Im Herbst 1970 sahen bei normaler Wasserführung

die Werte etwas günstiger aus: 125 µg/l vor der Infiltration, 156 µg/l im Pegel 1 und 97 µg/l im Pegel 4. Bei der vertikalen Untergrundpassage war keine Eliminierung meßbar, während bis zum Pegel 4 ein Rückgang um 37 % eintrat. Unter den verschiedenen Versickerungsarten in Wiesenburg wurde die Teichversickerung ausgewählt. Die Sickerstrecke des Wassers vom Teichboden zum Drän beträgt nur wenige Meter. Die Extraktionen wurden im Sommer 1970 vorgenommen und ergaben mit 393 µg/l im geflockten Rohwasser und 199 µg/l im Infiltrat einen Rückgang der lipophilen Extraktstoffe um 49 %.

Die Extrakte sind braungelb, pastös und besitzen einen intensiv terpenartigen Geruch, den man in Verdünnung als typischen "Flußwassergeruch" bezeichnen kann. Der Anteil ätherunlöslicher und amphoterer Verbindungen ist unbedeutend. Basen sind ebenfalls in geringer Menge vorhanden, nehmen aber zu. Der Anteil starker Säuren ist etwas größer und nimmt ab. Ähnlich verhält es sich mit den schwachen Säuren, die durch ihren intensiven Geruch nach Schwelereiprodukten auffallen. Ihre Konzentration ist in Rohwässern zum Teil erheblich. Die Hauptmenge wird mit 60 - 70 % von den Neutralstoffen gestellt. Ihr Anteil nimmt bei der Untergrundpassage etwas zu. Sie bestehen etwa zur Hälfte aus aliphatischen Verbindungen, die Träger des terpenartigen Geruchs sind. Weniger bedeutend sind die aromatischen Neutralstoffe; größer ist der Anteil an oxydierten Neutralstoffen.

Die basische Fraktion und die einzelnen sauren und neutralen Fraktionen aller Extrakte wurden dünnschichtchromatographisch untersucht. Die einzelnen Fraktionen enthalten noch bis zu 8 verschiedene Stoffe, so daß ein Extrakt aus etwa 40 - 50 nachweisbaren Komponenten zusammengesetzt ist. Bei den schwachen Säuren wurden durch Kupplung mit diazotiertem p-Nitranilin etwa 10 verschiedene phenolische Substanzen sichtbar, unter denen Phenol, β-Naphthol und Resorcin identifiziert werden konnten. Die Hauptmenge der aliphatischen Neutralstoffe bestand aus den geradkettigen Kohlenwasser-

stoffen Docosan bis Pentacosan (wie die Auswertung des IR-Spektrums und des Schmelzbereiches ergab. Daneben traten dunkelgelbe Kristalle mit einem Schmelzpunkt von 175° C und einer charakteristischen Bandenfolge im UV-VIS-Spektrum von 395, 420 und 450 nm auf. Das bandenreiche IR-Spektrum weist auf einen komplizierten Molekülaufbau hin. Als Hauptkomponente der aromatischen Neutralstoffe wurde IR-spektroskopisch Phthalsäureester gefunden, der auch im Rhein, im Ontario-See und in japan. Flüssen nachgewiesen wurde. Die Ähnlichkeit der IR-Spektren der Neutralstoff-Fractionen sowohl bei Elbe- und Muldewasser als auch von Wasser des Ontario-Sees (VOEGE und Vanesche) lassen vermuten, daß es sich um Endprodukte biochemischer Umwandlungen von allgemeiner Bedeutung handelt.

Direkte Wasseranalysen:

Als Ergebnis der direkten Wasseranalysen läßt sich zusammenfassend feststellen, daß die künstliche Grundwasseranreicherung in Hosterwitz und Wiesenburg unter aeroben Bedingungen abläuft. Die größten Güteänderungen erfährt das Wasser bei der vertikalen Untergrundpassage, während der weitere Aufenthalt im Grundwasserleiter nur gering wirksam wird. Eine erhebliche Verminderung erfahren biochemisch abbaubare, chemisch oxydierbare, nitrosierbare und kupplungsfähige organische Substanzen sowie Ammonium und Nitrit. Als Folge der biochemischen Aktivität treten Sauerstoffreduzierung und Kohlendioxidhöhung auf. Es erhöht sich auch wieder der Gehalt an gelösten -o-Phosphat, nachdem er durch die vorgeschaltete Flockung stark erniedrigt wurde. Der Farbgrad wird durch die Flockung deutlich verbessert, während die nachfolgende Untergrundpassage ohne Wirkung ist. Im Wasser verbleiben biochemisch resistente organische Verbindungen, die einen Kaliumpermanganatverbrauch von 5 - 15 mg/l und einen Farbgrad um 10 mg/l bedingen, in ihrer Nitrosierbarkeit 1 - 3 mg/l Calciumlignosulfat entsprechen und mit diazo-

tiertem p-Nitroanilin wie 0,05 - 0,2 mg/l Phenol kuppeln.

Modellversuche:

Als Testverbindungen für die Modellversuche wurden lipophile saure, neutrale und basische Stoffe ausgewählt, deren Anwesenheit im Wasser nachgewiesen oder wahrscheinlich ist. Als Schwerpunkt wurden die physiologisch bedeutsamen aromatischen Amine und Nitroverbindungen sowie die Pestizide angesehen. Es wurden β -Naphthol, Nitrobenzol, Lindan, Indol, β -Naphthylamin und Dimethylanilin eingesetzt. Ihre quantitative Bestimmung erfolgte mit Hilfe der Kolorimetrie, UV-Spektrophotometrie und Dünnschichtchromatographie.

Beim Modellversuch zur Wirkung der biologisch aktiven Kiesober-schicht wurden Glassäulen von 7,5 cm Durchmesser 30 cm hoch mit Filterkies gefüllt und über 3 Wochen mit geflocktem Elbe-Rohwasser eingearbeitet. Die Flächenbelastung betrug $1,5 \text{ m}^3/\text{m}^2$. 24 h. Zur Versuchsdurchführung wurden 1mg Testsubstanz und 2 mg Glucose in einem Liter unbeimpften synthetischem BSB-Verdünnungswasser gelöst. Glucose diente entsprechend den natürlichen Bedingungen als leicht abbaubarer Anteil. 5 l Lösung wurden in 18 h über die Filter gegeben. Jede Substanz wurde dreimal geprüft, beim 3. Versuch ohne Glucosezusatz, um einen Hinweis für den Einfluß leicht abbaubarer Substanzen zu erhalten.

Die Versuchsreihe zeigte insgesamt, daß echt gelöste lipophile organische Substanzen in der biochemisch aktiven Kiesober-schicht gar nicht (β -Naphthol, Nitrobenzol, Lindan) oder nur ungenügend (Dimethylanilin 15 %, β -Naphthylamin 19 %, Indol 27 %) eliminiert werden. Kolorimetrische Verfahren täuschen dabei einen höheren Eliminierungsgrad vor als die Messung der UV-Absorption, bei der das gesamte Molekül erfaßt wird. Glucose förderte die Eliminierung in unterschiedlichem Maße.

Die langsame Strömung im Grundwasserleiter und die sich allmählich ändernden Bedingungen wurden durch ein 3-Stufen-Modell simuliert. Die Aufenthaltszeit betrug in jeder Stufe 10 Tage. Die einzelnen Stufen bestanden aus Tubusflaschen, die mit sterilisiertem Quarzkies 1 - 3 mm gefüllt waren und in völliger Dunkelheit bei 16 - 19 ° C aufbewahrt wurden.

Die Einarbeitung erfolgte über 7 Wochen mit Hosterwitzer Infiltrat unter Wahrung des jeweiligen Sauerstoff-Gehaltes. Die Einarbeitung wurde nach jeder Stufe am Sauerstoff- und o-Phosphatgehalt verfolgt. Die Testlösungen wurden wie beim Modellversuch Kiesober-schicht, aber ohne Glucose und mit eingestelltem Sauerstoffgehalt um 4 mg/l eingesetzt. Nach je 10 Tagen Aufenthalt wurden die Gehalte an Testsubstanz, Sauerstoff und o-Phosphat gemessen.

Die Ergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen: Echt gelöste lipophile organische Substanzen werden im Grundwasserleiter auf vielfältige Weise und in unterschiedlichem Maße biochemisch umgewandelt. Die durch UV-Messung ermittelten Eliminierungsraten lagen zwischen 0 % (Indol) und 55 % (β -Naphthylamin). Der Verlauf der o-Phosphat- und Sauerstoffkurven zeigt eine außerordentlich hohe Aktivität der 1. Stufe und erheblich verminderte Leistungen in der 2. und 3. Stufe.

Die Versuche zur Adsorption an Feinsand, kaolinitischem und montmorillonitischem Ton und Eisen (III)-oxid wurden als Schüttelversuche mit einer Kontaktzeit von 1, 2,5 und 5 Stunden ausgeführt. Die Testsubstanzen wurden mit einer Konzentration von 1 mg/l in einer verdünnten Phosphatpufferlösung vom pH-Wert 6,6 gelöst. Aus den Stoffbilanzen wurde die adsorbierte Menge pro g Adsorbens berechnet. Mit Lindan waren die Versuche praktisch nicht durchführbar.

Die Adsorptionskapazitäten nach 5 Stunden Kontaktzeit stiegen von 2,0 μ g/g bei Feinsand über Eisen (III)-oxid und Guttauer Ton auf 16,0 μ g/g bei montmorillonitischem Ton. Die Adsorbierbarkeit der Testsubstanzen ist an den 4 Adsorbentien unterschiedlich. Im Mittel stiegen sie von

3,3 $\mu\text{g/g}$ bei β -Naphthol über Indol, β -Naphthylamin und Nitrobenzol auf 17,0 $\mu\text{g/g}$ bei Dimethylanilin. Die Adsorptionskapazität von Sand, Ton und Eisen (III)-oxid ist also für echt gelöste, nichtionogene lipophile organische Spurenstoffe minimal und nicht mit Ionenaustauschkapazität vergleichbar. Ihr Beitrag zur Eliminierung im Untergrund ist unwesentlich.

Schlußfolgerungen

Die Reinigungskraft des Untergrundes wird von Biologen, Chemikern und Hygienikern hoch eingeschätzt. Unbestritten ist die große Aktivität der obersten Infiltrationsstrecke für relativ gut abbaubare organische Verbindungen als billiger Reaktor. Dabei besteht die Gefahr einer unbegründeten Sicherheit. Am Verhalten lipophiler organischer Spurenstoffe wurde die Leistungsgrenze des Verfahrens gezeigt. Wenn aber eine Nachbehandlung des Infiltrats erforderlich wird, kann unter erheblichen Platzeinsparungen die Aufenthaltszeit im Grundwasserleiter auf das für einen gewissen Temperaturnausgleich und Puffereffekt notwendige Maß verkürzt oder die Sandlangsamfiltration angewendet werden.