

.-9829-

~~Nur für den Dienstgebrauch~~

Untersuchungen zur Kolmationsentwicklung
in Fließgewässern. Ein Beitrag zur
Methodik der hydrogeologischen Erkundung.

Der Fakultät für Mathematik und Naturwis-
senschaften des Wissenschaftlichen Rates
der Bergakademie Freiberg eingereichte
Dissertation zur Erlangung des
Grades eines

Dr. rer. nat.

VED Hydrogeologie
BT Nordhausen
Abt. Informations Dokumentation
Kommunikationsabg.
Telefon 2831
Nordhausen
5500

199/88

Vorgelegt von: Dietwolf Heeger

Geboren am: 17.9.1939 in: Pirna

Vorwort

Die Selbstdichtung der Flußsohle kann in erheblichem Maße die Strömungsvorgänge zwischen Oberflächen- und Grundwasser beeinflussen. Zur Vermeidung von Ergiebigkeitsrückgängen in ufernahen Wasserfassungen und zur Berücksichtigung beim Uferfiltrat-Vorratsnachweis ist die Erforschung der Kolmationsentwicklung unter den natürlichen Bedingungen im Gewässer erforderlich. Die vorliegende Arbeit liefert durch Auswertung von Meßdaten langjährig fördernder Wasserwerke grundlegende Erkenntnisse über die Entstehung, das zeitliche Verhalten sowie die Größe der Selbstdichtung in Fließgewässern. Durch großräumige Taucheruntersuchungen des Elbbettes wird zur Klärung der Erscheinungsform, flächenhaften Verbreitung und Mächtigkeit der Kolmation in breiten Strömen beigetragen. In der Arbeit wird ein Verfahren für die quantitative Vorhersage des Kolmationskoeffizienten entwickelt, womit eine Vervollkommnung der Methodik der hydrogeologischen Erkundung von Uferfiltrat verbunden ist. Praktische Hinweise zur Intensivierung des Betriebes von Uferfiltratanlagen werden gegeben.

Die Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsthemas "Kolmation von Gewässerbetten" des Planes Wissenschaft und Technik, das auf Grund seiner besonderen volkswirtschaftlichen Bedeutung unter Kontrolle des Generaldirektors des Kombines Geologische Forschung und Erkundung Halle stand. Sie wurde gefördert durch eine außerplanmäßige Aspirantur, für die sich der Verfasser bei seinem Betrieb, dem VEB Hydrogeologie Nordhausen, vielmals bedankt.

Ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. habil. JORDAN für die Betreuung der Arbeit, die wertvollen Anregungen und die Übernahme des Referats.

Herrn Prof. Dr. Dr. habil. BUSCH und Herrn Prof. Dr. sc. HEEG danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Gedankt sei auch Herrn Dr. MIBUS und Herrn Dipl. Geogr. MEINERT für ihre Unterstützung sowie Frau BODENBERGER und Frau CLAUS für die Durchführung der Zeichen- bzw. Schreibearbeiten.

III

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	<u>Seite</u>
1. Einleitung	1
2. Ableitung und Begründung der Zielstellung	1
2.1. Problemstellung	1
2.2. Zusammenfassung des Kenntnisstandes	4
2.3. Zielstellung	7
3. Bedeutung der Kolmation für den Nachweis von Uferfiltratvorräten	8
3.1. Kolmationserscheinung	9
3.1.1. Begriffsdefinition	9
3.1.2. Bildungsbereiche	9
3.1.3. Ursachen und Rückhalte-mechanismen	11
3.2. Geohydraulische Kennzeichnung und quantitative Beschreibung der Kolmation	12
3.3. Kolmation in Fließgewässern	14
3.3.1. Kolmationsverhalten bei Uferfiltratgewinnung	14
3.3.2. Einflußfaktoren der Kolmation	18
3.3.2.1. Kolmationsbildende Faktoren	18
3.3.2.2. Kolmationshemmende Faktoren	19
3.4. Stellung der Kolmation in der Erkundungs-methodik	21
3.4.1. Allgemeine Methodik des Mengennachweises	21
3.4.2. Realisierung der Kolmation als Randbedingung	22
4. Methodik zur Untersuchung der Kolmationsent-wicklung in der Elbe	25
4.1. Lösungsweg	25
4.2. Lösungsmaßnahmen	26
5. Zustand der Elbsohle	28
5.1. Untersuchungsprogramm	28
5.2. Petrografische Beschaffenheit	29
5.2.1. Allgemeines	29
5.2.2. Elbsohle	29
5.3. Kolmationserscheinung	31

IV

	<u>Seite</u>
5.3.1. Allgemeines	31
5.3.2. Elbsohle	32
5.4. Kolmationsmasse	36
5.4.1. Allgemeines	36
5.4.2. Elbsohle	37
6. Gesetzmäßigkeiten der Kolmationsentwicklung im Gewässerbett der Elbe	38
6.1. Grundlagen der Untersuchungen	38
6.1.1. Uferfiltratwerke	38
6.1.1.1. Allgemeine Kennzeichnung	38
6.1.1.2. Hydrogeologische Verhältnisse	39
6.1.1.3. Meßprofile für Identifikation des Kolmationskoeffizienten	39
6.1.2. Charakteristik der Elbe	43
6.1.2.1. Allgemeine Kennzeichnung	43
6.1.2.2. Laufbildung und Profilgestaltung	44
6.1.2.3. Schwebstoffbelastung	45
6.2. Identifikation des Kolmationskoeffizienten	45
6.2.1. Verfahren zur Berechnung des Kolmationskoeffizienten	46
6.2.2. Berechnung der Kolmationskoeffizienten	48
6.2.2.1. Berechnungsgrundlagen	48
6.2.2.2. Repräsentanz der Ausgangsdaten der Berechnung	50
6.2.2.3. Berechnungsergebnisse	53
6.3. Kolmationszustand vor Uferfiltratwasserwerken	55
6.4. Zeitliche Entwicklung der Kolmation	55
6.4.1. Langjährige Entwicklung	56
6.4.2. Innerjährlicher und jahreszeitlicher Gang	65
6.5. Bildungsbedingungen der Kolmation	67
6.5.1. Zeitliche Bildungsbedingungen	68
6.5.2. Örtliche Bildungsbedingungen	70
6.6. Einfluß des Abflußregimes im Fluß auf die Kolmation	74
6.6.1. Kolmationsabbau durch Hochwasser	75
6.6.2. Kolmationsbildung bei Mittelwasser	80
6.6.3. Kolmationsbildung bei Niedrigwasser	82

	<u>Seite</u>
7. Uferfiltratabgabe der Elbe	88
8. Einsatz der Forschungsergebnisse für den Uferfiltratvorratsnachweis	90
8.1. Verfahren zur Prognose des Kolmationskoeffizienten	90
8.1.1. Bemessungsverfahren	90
8.1.2. Methodische Empfehlungen zur Anwendung des Bemessungsverfahrens	91
8.1.3. Anwendungsbeispiele	93
8.2. Verallgemeinerung und Einsatzgrenzen der Forschungsergebnisse	96
9. Nutzen der Forschungsergebnisse	97
9.1. Methodische Ergebnisse	97
9.2. Nutzen für die Erkundung und Bewirtschaftung von Uferfiltrat	98
Zusammenfassung	101
Literaturverzeichnis	106
Verzeichnis der Symbole	113

1. Einleitung

Das dynamische Wachstum der industriellen Produktion, die Intensivierung der Landwirtschaft und die Realisierung des vom 8. Parteitag der SED beschlossenen Wohnungsbauprogramms haben in unserem Land zu einem spürbaren Anstieg des Wasserbedarfs geführt. Die jährliche Steigerungsrate des Trinkwasserbedarfs beträgt gegenwärtig 2,5 - 3 %, was einem Zuwachs von 200 - 250 T m³/d entspricht (NESTLER /52/). Im Zusammenhang damit wächst die Bedeutung der Wasserbereitstellung aus Oberflächengewässern.

Besonders in den industriellen Ballungsgebieten, wo die natürlichen Grundwasservorräte i.d.R. bereits vollkommen in Anspruch genommen werden, wird Oberflächenwasser durch direkte Entnahme oder indirekt durch ufernahe Brunnenfassungen und Grundwasseranreicherungsanlagen genutzt. Der Anteil des Uferfiltrats am Trinkwasseraufkommen der DDR beträgt etwa 14 %.

In vielen hochindustrialisierten Ländern Mitteleuropas ist die Uferfiltration eine wichtige Grundlage der Wasserversorgung und eine bevorzugte Möglichkeit zur Lösung der aktuellen Versorgungsaufgaben. Im Vergleich zur künstlichen Grundwasseranreicherung werden für die Versickerung keine betriebs- und bautechnischen Aufwendungen erforderlich. Allerdings ist mit einem durch die Kolmation der Gewässersohle bedingten Rückgang der Förderleistung zu rechnen, der durch technische Maßnahmen nicht wieder beseitigt werden kann. Diesem Gesichtspunkt ist bei der Nutzung von Uferfiltrat besondere Beachtung beizumessen.

Versuche zur maschinellen Beräumungen der Flußsohle, wie sie bei Anreicherungsbecken zur Erhaltung der Versickerungsleistung üblich sind, erwiesen sich als erfolglos. KLUDIG /41/ berichtet, daß nach der Sohlenberäumung eine erneute Kolmationsentwicklung einsetzte, durch die in kurzer Zeit der ursprüngliche Verdichtungsgrad wieder erreicht wurde.

2. Ableitung und Begründung der Zielstellung

2.1. Problemstellung

Das Wasser der Fließgewässer bildet ein heterogenes, polydisperses System. Es hat die Eigenschaften einer Suspension. Besteht ein zum Grundwasser gerichtetes Potentialgefälle, so infiltriert das schwebstoffhaltige Wasser in den Grundwasserleiter. Es kommt zur Bildung von Uferfiltrat. Dieser Vorgang ist nicht nur eine von den hydraulischen Bedingungen abhängige einfache Einströmung, sondern auch ein Filtrationsprozeß, bei dem die Verdichtung des Gewässerbettes erfolgt. Das ist beim Betrieb ufernaher Brunnenfassungen ebenso wie bei Stauhaltungen im Fluß der Fall. Während im Staubecken die Selbstdichtung zur Eindämmung der Sickerverluste und zur Einsparung kostspieliger Dichtungsmaßnahmen sehr willkommen ist, sind in den Wasserwerken Förderverluste unerwünscht.

Für die Wassergewinnung hat die Kolmation sowohl unter quantitativem, als auch unter qualitativem Aspekt Bedeutung. Ihre Doppelfunktion äußert sich:

- durch Verminderung der Korrespondenz zwischen Fluß- und Grundwasser und Begrenzung der Menge des gebildeten Uferfiltrates;
- durch Beeinflussung der Beschaffenheit des Infiltrates hauptsächlich i. S. einer Qualitätsbesserung infolge mechanischer Absiebung, chemophysikalischer und chemischer Vorgänge sowie biologischer Umwandlungsprozesse.

Sie ist die wichtigste Randbedingung der Austauschströmung zwischen Gewässer und Grundwasser und die vorratsbestimmende Größe der uferfiltratgespeisten Lagerstätte, die letztlich das Leistungsvermögen der Wasserwerke bestimmt. Ohne genaue Kenntnis des Kolmationskoeffizienten des Flußbettes ist keine exakte Vorratsberechnung möglich.

Die vorliegende Dissertation befaßt sich mit der Kolmation bei Uferfiltratgewinnung, wobei ausschließlich die mengenbezogenen Probleme behandelt werden.

Wasserwirtschaftliche Investitionen und Nutzungen von Grundwasservorräten erfolgen auf der Grundlage erkundeter und von der Staatlichen Vorratskommission der DDR bestätigter Bilanzvorräte. Der Nachweis von Uferfiltrat fußt auf der Berechnung der Wasserabgabe des kolmatierten Gewässers. Da das Uferfiltrat auf Jahre hinaus uneingeschränkt gewinnbar sein muß, sind Leistungsprognosen erforderlich, die die Kenntnis der langzeitigen Kolmationsentwicklung voraussetzen. Dem Vorratsnachweis muß ein Kolmationskoeffizient zu Grunde gelegt werden, dessen Größe durch den Einfluß der Wassergewinnung und der flußspezifischen Bildungsbedingungen bestimmt wird. Nur dieser vorratsadäquate Verdichtungszustand und nicht der natürliche Eintrittswiderstand, der in jedem Flußbett unabhängig von der Wassergewinnung in geringem Maße existiert, ist für den Mengennachweis relevant. Die hydrogeologische Erkundung als erste Stufe der Nutzbarmachung von Uferfiltratvorräten trägt in diesem Zusammenhang eine besondere Verantwortung.

Im Mittelpunkt der Erkundung steht die Bestimmung des repräsentativen Kolmationskoeffizienten w . Dabei bereitet es immer wieder Schwierigkeiten, diesen Parameter quantitativ vorauszusagen. Das wird offenkundig, vergegenwärtigt man sich die derzeitigen Möglichkeiten, die sich praktisch mit folgenden Verfahrenswegen erschöpfen:

1. Bezug des w -Wertes aus dem Werkstandard WAPRO 1.52 /68/.
2. Ermittlung des w -Wertes durch Analogieschlüsse zu Uferfiltratwerken.

Bevorzugt werden die Kolmationsfestwerte des WAPRO 152 verwendet, die von der Existenz eines quasistabilen Endzustandes der Kolmationsentwicklung ausgehen (BEYER/BANSCHER /9/), der entsprechend den Ergebnissen dieser Arbeit jedoch in Fließgewässern nicht besteht. Sie werden somit den natürlichen Bildungsvorgängen nicht gerecht. Abgesehen von diesen sachlichen Einschränkungen führte die unmittelbare Verwendung bzw. Modifizierung der Richtwerte in der Vergangenheit auch immer wieder zu starken subjek-

tiven, mitunter zu vollkommen falschen Entscheidungen, die letztlich in unzureichenden Vorratsberechnungen ihren Niederschlag fanden.

Analogieschlüsse zu Vergleichswasserwerken basieren auf der Analyse der Kolmationsverhältnisse im Analogiewerk. Sie gestattet aber nur die Erfassung eines aus dem Entwicklungsprozeß herausgelösten Augenblickzustandes, der dann dem sog. quasistabilen Endzustand gleichgesetzt wird. Zeitabhängige Vorgänge finden keine Beachtung, so daß die Voraussage einer großen Willkürlichkeit und Zufälligkeit unterliegt. Bei jedem neuen Erkundungsobjekt wiederholen sich diese Untersuchungen, was der Reduzierung des Aufwandes entgegensteht.

Die im WAPRO 1.52 empfohlenen Gerinneversuche zur direkten Messung des w -Wertes fanden keinen Eingang in die Erkundungspraxis. Die Gründe liegen in der mangelhaften Aussage - die im Fluß maßgebenden Einflußfaktoren lassen sich nicht simulieren - und im hohen materiellen Aufwand der in situ durchzuführenden Versuche.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die praktizierten Verfahrensweisen zur Bestimmung des Kolmationskoeffizienten wegen ihrer Aussageunsicherheit und der damit verbundenen ungerechtfertigten Einschränkung der Uferfiltratmenge nicht geeignet sind, den ständig steigenden Wasserbedarf entsprechend den volkswirtschaftlichen Erfordernissen - große Wassermenge bei optimaler Versorgungssicherheit - Rechnung zu tragen. Das unterstreicht die Notwendigkeit, die langfristige Kolmationsentwicklung unter Naturbedingungen zu erforschen. Derartige Arbeiten stehen z. Z. noch aus.

2.2. Zusammenfassung des Kenntnisstandes

Es wird eine Übersicht über den nationalen und internationalen Kenntnisstand gegeben. Weiterführende Literaturinformationen sind in das Kapitel 3 eingearbeitet.

Beobachtungen über die Verdichtung der Gewässersohle vor Wasserwerken werden sehr häufig beschrieben. Quantitative Aussagen

zur Selbstdichtung können hieraus nicht abgeleitet werden (u.a. BMI-Fachausschuß Uferfiltration /3/, HOLLUTA u.a. /36/, KLUDIG /41/, OFFERHAUS /53/, WERNER /63/). Die Forschungen auf dem Gebiet der Filtertechnik an Sandfiltern berühren diese Fragen nur hinsichtlich der Rückhalte-mechanismen im porösen Medium (u.a. ROLKE /59/).

Alle bisherigen Untersuchungen zum Kolmationsproblem waren i.a.w. auf Laborversuche an Filtersäulen und auf Gerinneversuche an Feldstandorten beschränkt (u.a. ALBIKER /1/, BEYER/BANSCHER /9/, GELDNER /24/, HANSEL /30/, VAN RIESEN /58/). Zur Interpretation der Meßwerte wurden filtrationskinetische Ansätze verwendet. Daraus leitet sich die Vorstellung vom Kolmationsvorgang als einen stetigen Wachstumsprozeß ab, der einen Grenzzustand erreicht. Filterversuche erfordern allerdings eine Reihe von Einschränkungen gegenüber der natürlichen Vielfalt der Einflußfaktoren und der Komplexität ihrer Wirkung. Die idealisierten Bedingungen solcher Experimente wie auch die geringe Versuchsdauer gestatten keine Übertragung der Ergebnisse auf Fließgewässer.

Der Zusammenhang zwischen der Selbstdichtung und den flußspezifischen Erosionsvorgängen ist bislang lediglich mit vereinfachten Laborversuche erforscht worden.

In begrenztem Umfang haben BEYER/BANSCHER /9/ und VAN RIESEN /58/ Feldmessungen an Uferfiltratwerken ausgewertet, die wenige Jahre der Kolmationsentwicklung umfassen. Die Ergebnisse wurden zur Stützung der aus den Filterversuchen gewonnenen Kenntnisse verwendet, wobei von den Autoren gegensätzliche Standpunkte bezogen werden. Schlußfolgerungen, die den praktischen Anforderungen der Wassergewinnung gerecht werden, sind hieraus nicht ableitbar. Die Arbeit von GELDNER /24/ beschränkt sich wie die von HANSEL /30/ auf die Identifikation bzw. Messung der natürlichen Kolmation bei der Versickerung aus Stauräumen bzw. kleinen Vorflutern und Gräben ohne den Einfluß ufernaher Wasserfassungen. GELDNER führt Methoden zur indirekten Bestimmung der Selbstdichtung aus Wasserstandsmessungen über Modellrechnung vor,

HANSEL verwendete die direkte Messung mit einem Lysimeter und dem sog. "Versickerungsmeßrohr".

Untersuchungen an Kanälen und Staudämmen, die in der Sowjetunion und in Ungarn durchgeführt wurden, sehen die natürliche Kolmation als eine erwünschte Abdichtung zur Verringerung der Sickerverluste. Die Veröffentlichungen geben allgemeine Informationen zum Dichtungsvorgang.

In Polen werden vor Uferfiltratwerken Filtrationsmessungen mit einem "Infiltrimeter" zur direkten Ermittlung der Flußbettverdichtung praktiziert. Es wird ein Augenblickszustand der langfristigen Entwicklungsfunktion aufgenommen, der als Analogiewert für den Vorratsnachweis Verwendung findet.

In der CSSR werden z. T. mehrjährige halbtechnische Filterversuche auf dem sog. "Kolmator", einem vertikalen Versuchsfilter, durchgeführt. Darauf bauen Vorratsberechnungen und Projekte auf. Der Kolmation als Randbedingung der Uferfiltration wird allgemein wenig Bedeutung beigemessen. Untersuchungen an Fließgewässern werden nicht durchgeführt.

Zusammenfassend läßt sich konstatieren, daß der derzeitige Kenntnisstand charakterisiert ist:

1. Durch eine weitgehende Klärung der Ablagerungsvorgänge im Filter (Rückhaltemechanismen).
2. Durch zwei unterschiedliche hypothetische Standpunkte zur Gewässerbettverdichtung unter dem unmittelbaren Einfluß der Flußströmung und der Dauerbelastung durch Uferfiltration. Entsprechend der ersten Vorstellung nähert sich die zeitliche Entwicklung der inneren Kolmation einem Grenzwert, bei dessen Erreichen sich der Kolmationskoeffizient nur noch sehr wenig ändert. Bei mehrjähriger Förderung entsteht ein quasi-stabiler Endzustand, dessen Größe hauptsächlich vom Korn-durchmesser des Filterkörpers abhängt. Die Infiltrationsgeschwindigkeit hat dabei untergeordnete Bedeutung. Auch größere Schleppspannungen während eines Hochwassers verursachen hiernach keine wesentliche Verminderung. Nur extreme Hochwässer, die zur Sohlendeformation führen, können eine Störung des stabilen Kolmationsfilters bewirken. Diese Posi-

tion fand Eingang in den Werkstandard WAPRO 1.52. Erstmals in der Fachliteratur werden hier mit den Richtwerten der inneren Kolmation standardisierte Festlegungen getroffen. Zur Einschätzung der Entwicklung werden Labor- und Feldversuche empfohlen (Versickerungs- und Gerinneversuche, Pumpversuche am Gewässerrand).

Im Gegensatz dazu geht die zweite Hypothese von einer Beeinflussung der Selbstdichtung durch das Strömungsgeschehen im Fluß aus. Als maßgebliche Einflußfaktoren werden die "Zeit" und die "Infiltrationsrate" herausgestellt. Die Kolmationsentwicklung wird nur bedingt als eine stetige Zunahme des hydraulischen Widerstandes der Gewässersohle angesehen, der Flußerosion wird Bedeutung beigemessen.

3. Zur Ausbildung der Selbstdichtung über die Flußbreite existieren keine praktischen Erfahrungen. Es werden Annahmen getroffen, die meistens eine gleichmäßig über den Gewässerquerschnitt verteilte Kolmation vorsehen.

2.3. Zielstellung

Das Ziel dieser Arbeit besteht in der Erforschung des Kolmationsverhaltens bei Uferfiltratgewinnung unter den natürlichen Bildungsbedingungen in Fließgewässern. Die Untersuchungen erfolgen am Beispiel der Elbe.

Unter dem Aspekt des Mengennachweises von Uferfiltrat soll ein Verfahren zur größenmäßigen Vorhersage des Kolmationskoeffizienten entwickelt werden. Allerdings lassen sich die komplexen Vorgänge der Selbstdichtung beim heutigen Wissensstand nicht in ihre Einzelwirkungen aufgliedern. Eine allgemeine Beziehung der Kolmationsentwicklung in Abhängigkeit von den vielzähligen Einflußfaktoren kann noch nicht aufgestellt werden. Es geht vorerst darum, repräsentative Einflußgrößen summarisch zu erfassen und ihre Wirkung auf den Selbstdichtungsprozeß zu ermitteln. In Anbetracht des angespannten Wasserhaushaltes fällt unserem Land bei der Lösung dieser Aufgabe eine gewisse Pionierrolle zu, der mit den erstmalig durchgeführten umfangreichen Naturuntersuchungen entsprochen wird. Damit wird ein Beitrag zur Klärung

der Kolmationsentwicklung in Fließgewässern und zur Verbesserung der Methodik zur Erkundung von Uferfiltratvorräten (Mengennachweis) geleistet.

Das besondere gesellschaftliche und volkswirtschaftliche Interesse an dieser Thematik leitet sich ab:

- aus der zunehmenden Bedeutung der Uferfiltration für die Deckung des ständig steigenden Wasserbedarfs;
- aus dem Verlangen, die Effektivität der hydrogeologischen Erkundungsarbeiten und Vorratsberechnungen quantitativ und qualitativ zu verbessern;
- aus der Dringlichkeit, den derzeit unbefriedigenden Stand der Prognose des Kolmationskoeffizienten zu verbessern.

Der Forderung nach optimaler Bereitstellung von Trink- und Brauchwasser, immer wieder artikuliert in den Beschlüssen der Parteitage und in den Volkswirtschaftsplänen, ist nur durch eine umfassende Erhöhung der Effektivität der Wassergewinnung nachzukommen. Das setzt u. a. die intensive Nutzung von Uferfiltratvorräten und eine Verbesserung der Qualität ihres hydrogeologischen Nachweises voraus. Unter diesem Aspekt soll in der vorliegenden Arbeit die Kolmation praxisbezogen erforscht und quantifiziert werden.

Nicht Gegenstand der Dissertation ist die Untersuchung der Ablagerungs- und Eliminierungsvorgänge disperser Wasserinhaltsstoffe im Filterkörper und auf diesem selbst, sind die Probleme der Änderung der inneren Struktur des porösen Medium. Auch der Problemkreis des Stofftransports ist nicht Anliegen dieser Arbeit. Hierunter fallen auch sämtliche Fragen der Beschaffenheitsänderung des Infiltrats durch Sorptions- und Stoffwandlungsprozesse in der Selbstdichtungsschicht.

3. Bedeutung der Kolmation für den Nachweis von Uferfiltratvorräten

Als Einführung in die Problematik wird die Bedeutung der Kolmation für die Wassergewinnung veranschaulicht. Die Ausführungen gehen auf Literaturaussagen zurück, abgerundet durch spezielle

Forschungsergebnisse dieser Dissertation. Die Schilderung der Erscheinungsformen führt zu den Ursachen der Kolmation. Es werden ihre geohydraulische Wirkung beschrieben und als Ausdruck zur Quantifizierung der Kolmationskoeffizient w vorgestellt. Die anschließenden Erläuterungen beziehen sich ganz speziell auf die Vorgänge an der Gewässersohle bei Uferfiltratentnahme. Aufmerksamkeit finden die Faktoren, die im Fluß die Selbstdichtung fördern, ihr aber auch entgegenstehen. Abschließend wird unter erkundungsmethodischem Aspekt die Einbeziehung der Kolmation in den Vorratsnachweis erläutert.

3.1. Kolmationserscheinung

3.1.1. Begriffsdefinition

Unter Kolmation wird gemäß TGL 23989 /66/ verstanden:

"Ablagerungen von Partikeln außerhalb sowie Einlagerung von Partikeln innerhalb des Korngefüges und die dadurch bedingte Verringerung von Porenvolumen und Permeabilität unter dem Einfluß von Infiltration und Sedimentation."

Nach dem Ort der Entstehung wird eine innere und eine äußere Kolmation unterschieden.

"Die innere Kolmation ist die Kolmation im Inneren eines Grundwasserleiters bzw. porösen Mediums."

"Die äußere Kolmation ist die Kolmation auf der Oberfläche eines Grundwasserleiters bzw. porösen Mediums."

In der internationalen Fachliteratur wird auch der Begriff "Selbstdichtung" gebraucht.

3.1.2. Bildungsbereiche

Die äußere Kolmation bildet sich durch Sedimentation und mechanische Absiebung von Sink- und Schwebstoffen beim Eindringen des Infiltrats in die Gewässersohle. Die Produktion von Kolmationsmasse durch biologische Prozesse besonders in β -mesosapronen bis polysapronen Gewässern (KUSTERMAN /43/) sowie

chemische Ausfällungen verstärken diesen Prozeß. Die Ablagerung von Feststoffpartikeln ist u. a. von der Gewässerfließgeschwindigkeit abhängig und nur bei einer Sohlgeschwindigkeit $v_s < 0,3$ m/s möglich. Die Turbulenzintensität (Schwankungsgrößen der Strömung) und der Schiffsverkehr haben einen starken Einfluß auf die Bildungsvorgänge, so daß äußere Kolmation selten anzutreffen ist.

Der Aufbau der inneren Kolmation geht sowohl durch Fortschreiten der Kolmationsfront nach der Tiefe, als auch durch einen rückschreitenden Ausbau von zuerst kolmatierten günstigen Querschnittsminima tieferer Porenkanäle nach oben vonstatten. Hierdurch wird die Kolmationsmächtigkeit begrenzt, die für die Substratbelastungen unserer Flüsse in sandigen Filtern nur wenige Zentimeter, in kiesigen Filtern wenige Dezimeter beträgt. Maximal wurden bei relativ sauberem Wasser 0,5 - 1 m gemessen (u. a. KLUDIG /41/). Die stärkste Verdichtung existiert in der obersten Schicht. Mit zunehmender Tiefe nimmt die Intensität der Kolmation, nimmt ihr Dichtungsgrad ab.

Nach HANSEL /30/ und BEYER/BANSCHER /7/ verläuft der zeitliche Entwicklungsprozeß, sofern er frei von Störeinflüssen erfolgt, prinzipiell in zwei Phasen ab:

1. Konstitutionsphase: intensive Entwicklung durch Anreicherung von Kolmationsmasse.
2. Stabilisationsphase: Stabilisierung und Verdichtung des Kolmationsfilters. Die Zunahme des Kolmationswiderstandes ist hier geringer, als in der Konstitutionsphase.

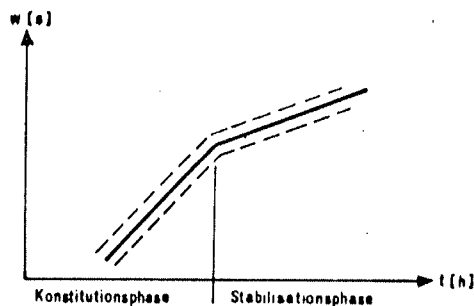


Bild 1: Bildung der inneren Kolmation $w = f(t)$ nach BEYER/BANSCHER /7/

Der Verdichtungsgrad und die Kolmationsmächtigkeit sind von gewässerspezifischen Faktoren abhängig (Abschnitt 3.2.2.; 6.5.). Die *i n n e r e K o l m a t i o n* ist die in Fließgewässern verbreitete Erscheinungsform.

3.1.3. Ursachen und Rückhalte-mechanismen

Ursachen der Kolmation sind mechanische, chemophysikalische und chemische sowie biologische Vorgänge.

Wichtigste Voraussetzung für die Kolmation sind Schwebstoffe. Sie bedingen den mechanischen Selbstdichtungsprozeß durch Absiebung der grob- und kolloidgelösten Partikel infolge mechanischer Blockade auf der Oberfläche und im Innern des Filters. Maßgebend sind die geometrischen Abmessungen von Porenraum und Kolmatant. Es erfolgt eine unmittelbare Verstopfung. Der Aufbau einer schwammartigen Zwischensubstanz im Filterkörper, deren Hauptbausteine Tonminerale sind, führt zum sogenannten "Filterfeineffekt" (BETTAQUE /6/) mit Absieburgs- und Ionenaustauschreaktionen. Letztere regen durch Speicherung gelöster Stoffe die biologische Kolmation an (Nährstoffe) und verursachen eine Quellung der Tonminerale.

Im Laufe der Zeit tragen auch chemische Reaktionen an den eingedrungnen Feinstanteilen - Entstehen unlöslicher Fällungsprodukte (Eisen-, Mangan- und Kalziumverbindungen); Ausflokung von gelösten organischen Stoffen und Kolloiden in den Porenkanälen - und biologischen Vorgänge zur Selbstdichtung bei. Die biologische Kolmation ist in den obersten Schichten der Gewässersohle lokalisiert, reagiert milieuhabhängig und ist vor allem bei günstigem Nährstoffangebot sehr wirkungsvoll. Sie beruht auf der Verstopfung der Porenräume durch Produktion von Biomasse: Wachstum und Vermehrung besonders von Algen, aber auch von Eisen- und Manganbakterien. Die biologisch aktive Schicht hat eine relativ große Wasserdurchlässigkeit, so daß im Sommerhalbjahr bei günstigen Lebensbedingungen die Gewässerbettverdichtung gedämpft oder gar rückläufig verläuft. Das wird mit den Ergebnissen dieser Arbeit bestätigt (Abschnitt 6.4.2.).

In den Fließgewässern treten die genannten Prozesse nicht separat auf, so daß die Selbstdichtung nicht ausschließlich

durch den einen oder anderen Vorgang entsteht. Das Kennzeichnende der Kolmationsbildung ist vielmehr das komplexe Zusammenwirken und Überlagern der Einzelvorgänge, die sich auch gegenseitig bedingen, wobei in Abhängigkeit von den örtlichen Verhältnissen einzelne dominieren können.

Rückhalte- und Festhalte-mechanismen bewirken als Annäherungs- und Festhalte-mechanismen die Ablagerung der suspendierten Stoffe im Filterkörper. Zu ihnen zählen im wesentlichen:

- Sterische Behinderung und Brückenbildung (Siebeffekt)
- Interzeption
- Sedimentation
- Diffusion
- Elektrostatische Grenzflächenpotentiale mit Adsorption, Ionenaustausch.

Bei allen Mechanismen sind die für die Ablagerung zur Verfügung stehende Oberfläche des Filterkorns und die Strömungsgeschwindigkeit im porösen Medium die wichtigsten Faktoren für die Retention.

3.2. Geohydraulische Kennzeichnung und quantitative Beschreibung der Kolmation

Der hydraulische Effekt der Kolmation kommt in einer erheblichen Reduzierung der Wasserdurchlässigkeit des Filterkörpers zum Ausdruck. Die Kolmationsschicht ist nicht als vollkommen dicht anzusehen. Es durchströmt sie nur viel weniger Wasser, als der liegende Grundwasserleiter in der Mehrzahl der praktischen Fälle abführen kann.

Im Vertikalprofil besteht eine reduzierte Durchlässigkeit k_f' bis zu einer bestimmten Tiefe, die die Kolmationsschicht begrenzt. Als charakteristische Kennzeichen der Selbstdichtung gelten der k_f' - Wert und die Kolmationsmächtigkeit m_k . Letztere Größe ist in der Literatur nicht eindeutig definiert. Beispielsweise grenzen BEYER/BANSCHER / 8 / den kolmatierten Raum als den Bereich ab, bei dem eine Veränderung des unbeeinflussten Filtrationskoeffizienten um das 5-fache eingetreten ist.

Nachstehende Grafik veranschaulicht die starke Abhängigkeit des k'_f -Wertes von der Kolmationstiefe.

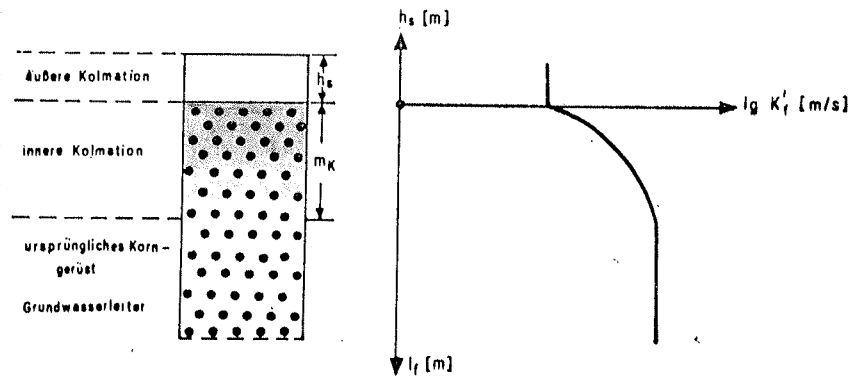


Bild 2: Schematische Darstellung der Abhängigkeit des mittleren Filtrationskoeffizienten k'_f von der Filtertiefe l_f

Als Ausdruck der geohydraulischen Wirkung wird der komplexe Wert des Kolmationskoeffizienten w verwendet:

$$w = \frac{m_k}{k'_f} \text{ /s/} \quad (1)$$

Laut TGL 23989 ist der w -Wert bestimmt als

$$w = \frac{m_k}{\int k'_f \, dm} \quad (2)$$

Er gibt den hydraulischen Widerstand der Infiltration infolge Selbstdichtung an und ist gleichbedeutend mit der hydraulischen Verlusthöhe Δh /m/, die bei der Durchströmung des kolmatierten Profils mit der Geschwindigkeit v_i /m/s/ entsteht:

$$w = \frac{\Delta h}{v_i} = \frac{\Delta h}{k'_f \cdot I} = \frac{\Delta h}{k'_f \cdot \frac{\Delta h}{m_k}} = \frac{m_k}{k'_f} \quad (3)$$

$\Delta h = H - h$ (vgl. Bild 7 auf Seite 23)

Existiert neben der inneren auch eine äußere Kolmation, dann ist der Gesamtwiderstand gleich der Summe der partiellen Widerstände der inneren und äußeren Kolmation.

Im mathematischen Modell der Uferfiltration findet der w -Wert über den Speisungsfaktor B des undichten Strömungsleiters (leaky-factor) Eingang in den Algorithmus der Vorrats-

berechnung. Er wird damit den Anforderungen der modernen Grundwasserhydraulik gerecht.

$$B = \sqrt{k_f \cdot M \cdot \frac{m_k}{k'_f}} = \sqrt{k_f \cdot M \cdot w} \quad (4)$$

Der w -Wert läßt sich für den stationären Strömungszustand auch in eine fiktive Zusatzlänge ΔL_2 des Strömungsfeldes zwischen dem Gewässer und den Brunnenfassungen umrechnen. Hierfür sind in der Fachliteratur und in Standards entsprechende Formeln angegeben (WAPRO 1.42 /67/, WAPRO 1.52 /68/).

3.3. Kolmation in Fließgewässern

3.3.1. Kolmationsverhalten bei Uferfiltratgewinnung

Unter ungestörten Verhältnissen erfolgt eine Zusickerung von Grundwasser zum Fluß, wie aus der Verteilung der Infiltrationsgeschwindigkeit v_i im Bild 3 ersichtlich ist.

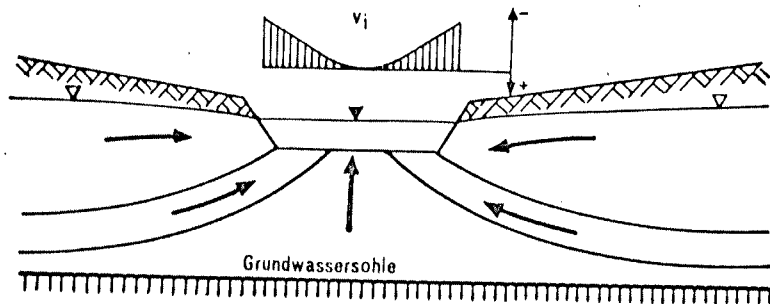


Bild 3: Symmetrische Zusickerung zum Fluß

Eine natürliche Kolmation bildet sich durch Umkehr der natürlichen Strömungsrichtung, wenn der Fluß über dem des Grundwasserspiegels liegt: z. B. Stauhaltung im Fluß; Absenkungsgebiet eines Tagebaues. Voraussetzung ist der hydraulische Kontakt des Oberflächen- mit dem Grundwasser durch Einschnitt des Flußbettes in den Grundwasserleiter. Gleichartige Bedingungen bestehen beim Betrieb ufernaher Brunnenfassungen, wo der Zufluß uferfiltrierten Wassers erzwungen wird. Dabei entsteht die Kolmation durch Uferfil-

tratgewinnung. Bei breiten Flüssen steht die Versickerung an der Gewässersohle im Vordergrund, der größte Teil des geförderten Wassers ist Uferfiltrat. Der Zuflußanteil, der durch Unterströmung des Flusses aus dem gegenüberliegenden Einzugsgebiet stammt, geht mit zunehmender Breite des Flusses gegen Null und erhöht sich andererseits mit anwachsender Kolmation (GELDNER /24/). Nach Untersuchungen von ZIPFEL /65/ ist er bei kolmatierter Gewässersohle mit $<10\%$ sehr gering. VAN RIESEN /58/ ermittelte diesen Anteil für breite Flüsse - relative Flußbreite $b/M \geq 5$ - selbst bei extrem starker Kolmation mit $<1\%$. Für die Elbe beträgt $b/M \sim 10$! Die Zuflüsse aus dem Hinterland der Fassungen sind von den Neubildungsbedingungen und der Größe des nutzbaren Einzugsgebietes abhängig und in ihrer Größe oft unbedeutend.

Hydraulisch wird die Uferfiltration durch drei Phasen charakterisiert. In der ersten Phase konzentriert sich die Infiltration auf das fassungsseitige Flußufer, da hier das größte Potentialgefälle zwischen Fluß- und Grundwasserspiegel besteht (vgl. Verteilung der Infiltrationsgeschwindigkeit v_i in Bild 4).

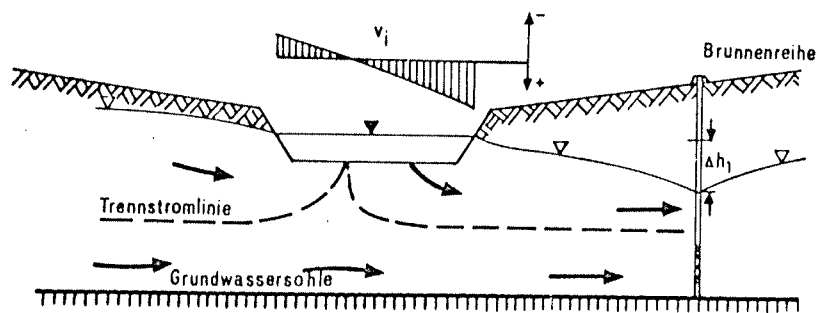


Bild 4: Uferfiltratentnahme bei nichtkolmatiertem Flußbett

Es kommt zu einem starken Stoffeintrag, was mit einer verstärkten Kolmation der Uferzone verbunden ist. Das hat zur Folge, daß sich die Versickerungsintensität verringert, wodurch die Kolmationsentwicklung gedämpft wird, Nach ZIPFEL /65/

erfolgt nach dem Erreichen eines merklich erhöhten Eintrittswiderstandes im Uferbereich eine Umlagerung der Infiltrationsbelastung auf weitere Abschnitte des Flußquerschnittes. Die versickerungsaktive Fläche verschiebt sich sukzessive in Richtung der Strommitte. Besteht anfangs der ersten Phase noch eine große Ungleichförmigkeit in der Verteilung der Infiltrationsrate q_i über die Flußbreite, so vergleichmäßigt sich diese im Verlauf der ersten Entwicklungsstufe. Die erste Phase ist für den Betrieb des Uferfiltratwerkes der Normalfall. Die zweite Phase ist durch eine fortschreitende Selbstdichtung aller Bereiche der Gewässersohle gekennzeichnet. Die spezifische Infiltrationsrate sinkt, die Förderleistung geht zurück. Im Wasserwerkbetrieb wird dann zur Aufrechterhaltung einer bestimmten Entnahme die Brunnenabsenkung erhöht, was einer Vergrößerung des hydraulischen Druckgefälles gleichkommt. Ist dadurch die Fördermenge größer als die infiltrierende Wassermenge, so verliert die obere Stromlinie des Grundwassers (freie Oberfläche) die Verbindung zum Flußwasserspiegel und gleitet an der Gewässerbettkontur abwärts. Die Versickerung erfolgt in einen mitunter wasserluffterfüllten Filterkörper (Bild 5).

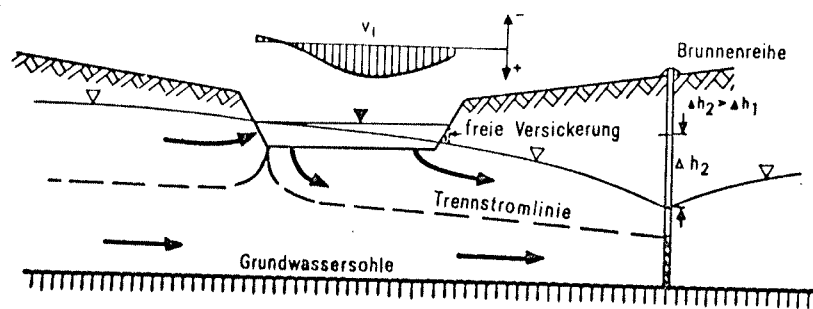


Bild 5: Uferfiltratentnahme bei kolmatiertem Flußbett

Die Erhöhung des Druckgefälles führt vorerst zu einer Zunahme der Sickerungsgeschwindigkeit, die dann maßgeblich wieder den Dichtungsgrad verstärkt. Werden aus diesem Grund weitere zusätzliche Brunnenabsenkungen veranlaßt, so wird der Übergang zur besonders ungünstigen dritten Phase vollzogen, bei der die obere Stromlinie die Gewässersohle vollkommen unterwandert (Bild 6).

Kennzeichnend für diesen Zustand ist die freie Versickerung, bei der die Wasserabgabe nicht mehr durch den Betrieb der Fassungsanlage beeinflusst werden kann (Vernachlässigung der kapillaren Saugspannung). Hierfür ist jetzt allein die Höhe des Flußwasserspiegels über der Gewässersohle maßgebend, das maximale Infiltrationsgefälle ist erreicht (vgl. Abschnitt 3.4.2.). Es erfolgt anfangs der dritten Phase eine kurzzeitige Steigerung der Sickerate und eine weitere Ausbreitung der Fläche mit hoher Sickergeschwindigkeit über die gesamte Flußbreite. Gleichzeitig kommt es zu einer erheblichen Intensivierung der Selbstdichtung. Das Resultat ist schließlich ein allmähliches Nachlassen, im Extremfall eine rapide Abnahme der Fördermenge, die bis zur weitgehenden Erschöpfung der Wassergewinnung führen kann.

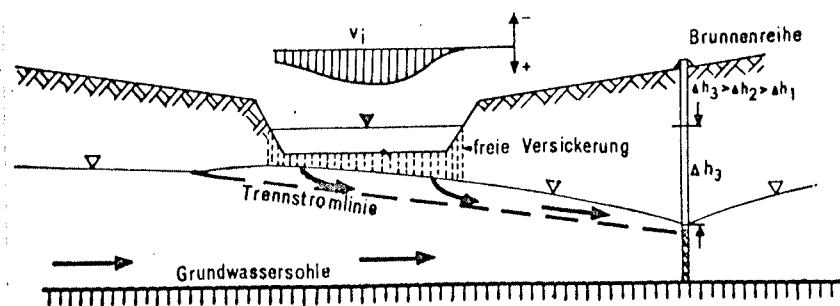


Bild 6: Uferfiltratentnahme bei stark kolmatiertem Flußbett

Die zweite und dritte Phase gehen ineinander über. Sie stellen keine normalen Betriebsverhältnisse dar. Für eine unkontrollierte Förderung sind beide Phasen um so gefährlicher, als sie zunächst eine Leistungssteigerung bringen bzw. eine Leistungskonstanz bei in Wirklichkeit fallender Tendenz vortäuschen. Danach geht der Rückgang um so schneller vor sich. Nach Angaben der Fachliteratur sind jedoch Betriebsfälle, bei denen Uferfiltratwerke ihre Förderung einstellen mußten, sehr selten. Mit der Verlagerung der Infiltration vom Ufer zur Flußmitte kommt das Uferfiltrat zusehends aus Querschnittsbereichen, in denen kolmationshemmende Faktoren (Strömungskräfte) die Sohlenverdichtung behindern. Das wird durch die Taucheruntersuchungen, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit in der Elbe durchgeführt

wurden, bestätigt. Die Kolmation ist danach vor Wasserwerken nur in der fassungsseitigen Uferzone vorhanden und höchstens bis in die Nähe der Strommitte ausgebreitet (Abschnitt 5.3.).

3.3.2. Einflußfaktoren der Kolmation

In ihrer Größe und in ihrer zeitlichen Abhängigkeit wird die Selbstdichtung von sogenannten Kolmationsfaktoren bestimmt. Entsprechend den Ergebnissen der Dissertation ist der Einfluß dieser Faktoren von Bedingungen im Gewässer abhängig, die mit dem Durchflußgeschehen zusammenhängen. Sie sind für den nachgewiesenen ungleichförmigen Kolmationsverlauf verantwortlich.

3.3.2.1. Kolmationsbildende Faktoren

Kolmationsbildende Faktoren sind für den Aufbau der Selbstdichtung zuständig. Zu ihnen zählen:

1. Art, Größe und Konzentration der im Oberflächenwasser mitgeführten Stoffe, wobei die ungelösten Wasserinhaltsstoffe besondere Bedeutung haben, da vor allem sie die Flußbettverdichtung verursachen: Sink- und Schwebstoffe mineralischer und organischer Natur.
2. Geohydraulische Infiltrationsbedingungen und der Faktor "Zeit": Druck- und Geschwindigkeitsverteilung im Sohlenbereich; insbesondere die Infiltrationsrate q_1 , da in ihr die eingetragene Feststoffmenge implizite enthalten ist (Transportrate c_T nach VAN RIESEN /58/).
3. Petrophysikalische Beschaffenheit des Filterkörpers unter der Gewässersohle; Korndurchmesser und Porengröße, Form und Lagerungsdichte des Filterkorns. Wesentliche Bedeutung hat das Korngrößenverhältnis von Filterkörper zu Kolmatant. Nach VAN RIESEN /58/ liegt der maximale Verdichtungseffekt bei $\frac{d_f}{d_k} = 15 - 25$.
4. Biologische Verhältnisse im Gewässer, die für die mikrobielle Tätigkeit maßgebend sind: Eutrophierungsgrad, Milieubedingungen (u. a. Temperatur, Lichtklima, Sauerstoff, Toxine).
5. Fließgeschwindigkeit und Turbulenzintensität an der Gewässersohle, da sich bei Unterschreitung bestimmter Grenzwerte äußere Kolmation bildet.

3.3.2.2. Kolmationshemmende Faktoren

Besondere Beachtung verdienen die Hemmungsfaktoren, da sie nachhaltig der Selbstdichtung entgegenwirken, ihre Entwicklung abbremsen bzw. ihre Beständigkeit in Frage stellen. Hierzu gehören:

1. Schleppspannung des fließenden Wassers
2. Schiffsverkehr
3. Vorgänge bei intermittierendem Betrieb einschließlich längerer Stilllegung von Uferfiltratwerken.

Wichtigster Hemmungsfaktor ist die Schleppspannung. Sie ist in unseren regulierten Flüssen mit definiertem Mittel- und Niedrigwasserprofil hauptsächlich auf die Gewässersohle gerichtet und als geschwindigkeits- bzw. abflußadäquate Kraft fortwährend in Strömungsrichtung wirksam. Die Folge sind der Geschiebetrieb mit Umlagerungen an der Sohle (Überschreitung der Grenzsleppspannung) sowie Erscheinungen der äußeren Suffosion (NEMECEK /51/), die auf Turbulenzen mit Sogwirkung im Bereich größerer Steine zurückzuführen sind. Letztere bewirkt den Austrag von Feinsedimenten zwischen den Steinen und letztlich wiederum eine verstärkte Geschiebeumlagerung.

Das Zerstören und Abräumen der Kolmation erfolgt einerseits durch den direkten Angriff der Schleppkraft: Auflockerung und Aufwirbelung, Auswaschung. Andererseits ist der schmirgelnde Effekt des aus Gesteinstrümmern bestehenden Geschiebes beachtlich, das sich auf der Sohle gleitend, rollend oder springend fortbewegt. Von dem bei hohen Durchflüssen mitgeführten grobem Geschiebe geht eine besondere große Kraftwirkung aus. Die wirkungsvollste Beseitigung der Selbstdichtung wird bei Hochwasser durch die fluviale Erosion erreicht, bei der zusammen mit der eingebrachten Kolmationsmasse oft auch die obersten Schichten des Strombettes abgetragen werden. VAN RIESEN /58/ berichtet, daß Extremhochwässer im Rhein zu einer völligen Umlagerung der Gewässersohle führten, so daß annähernd die ursprüngliche Durchlässigkeit wieder erreicht wurde. Durch eigenen Untersuchungen vor Uferfiltratwerken an der Elbe wird der Abbau effekt der Hochwässer zweifelsfrei nachgewiesen (Abschnitt 6.6.1.).

Wie andere schiffbare, nicht staugeregelte Flüsse mit strengem Hochwasserabflußprofil (z. B. Rhein, Donau, Oder - nach NEMECEK /51/ die meisten Flüsse Europas), so unterliegt auch die Elbe einer ständigen Eintiefung. Das ist vor allem auf die Ausbau- und Regulierungsmaßnahmen des vergangenen Jahrhunderts zurückzuführen, die mit einer starken Einschränkung der Normalbreite verbunden waren. Im Rhein und in der Donau wurden in den letzten 50 bis 100 Jahren Erosionsraten von 0,3 - 3 cm/Jahr gemessen (TIPPNER /62/). Nach GLAZIK /25/ ist der gesamte Elbelauf auf dem Gebiet der DDR der Tiefenerosion ausgesetzt, nur unterbrochen von wenigen Hebungsstrecken durch Geschiebeanlandung. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die langjährigen Wasserspiegel- bzw. Sohlen-senkungen in der Elbe.

Tabelle 1: Absinken des Wasserspiegels an Pegeln der Elbe innerhalb der DDR nach GLAZIK /25/ und KAUTZ /39/

Pegel	Elbe-km	Zeitraum	Anzahl der Jahre	Wasserspiegelabsenkung gesamt /cm/	pro Jahr /cm/a/
Schöna	2,1	1874-1971	98	48	0,49
Pirna x)	34,4	1874-1971	98	43	0,44
Pillnitz x)	43,0	1874-1971	98	63	0,65
Dresden	55,6	1874-1971	98	98	1,01
Meißen	82,2	1874-1971	98	78	0,80
Grödel	103,8	1874-1971	98	84	0,87
Riesa x)	108,4	1874-1971	98	41	0,42
Strehla	115,1	1874-1971	98	75	0,77
Torgau	154,6	1892-1961	69	142	2,06
Aken	274,7	1904-1961	57	41	0,72
Barby	293,4	1883-1961	78	75	0,96
Magdeburg-Roth.	332,7	1923-1959	36	64	1,78
Wittenberge	454,6	1904-1960	56	17	0,30
Lenzen	484,6	1884-1953	69	43	0,62
Darchau	535,8	1887-1952	65	102	1,57

x) Werte nach KAUTZ

Der Schiffsverkehr hat durch die erodierende Kraft der Schiffs-schraube, die hauptsächlich bei Bergfahrten durch Pulsation und örtliche Turbulenz wirksam wird, und durch die Querschnittsverengung im Schiffsbereich (Rückstrom unter dem Schiffsboden) Einfluß auf die Beständigkeit der Kolmation. Es entstehen kurzzeitige starke Störungen an der Gewässersohle, die den Verdichtungsprozeß

mit gewisser Regelmäßigkeit ständig unterbrechen. Darüber hinaus entstehen neue Angriffspunkte für die Flußerosion (ESCHWEILER /19/). In verkehrsreichen Wasserstraßen, in denen vor allem Motorgüterschiffe die Sohle stark aufwühlen, wird besonders bei Niedrigwasser, d. h. bei geringer Fahrwassertiefe die Selbstdichtung in der weiteren Umgebung der Fahrrinne angegriffen, aufgerissen und zerstört. Nach eigenen Erhebungen betrug beispielsweise der Umfang des Schiffsverkehrs in der Elbe bei Dresden im Jahr 1980 13 800 Fahrten; im Jahresdurchschnitt 38 Fahrten pro Tag (19 Bergfahrten), in den Sommermonaten Mai ... August sogar 46 Fahrten.

Während kurz- oder längerfristigem Betriebsstillstand der Wasserwerke gewinnt die hydrodynamische Strömungskraft an der Flußsohle vorrangige Bedeutung. Insbesondere bei langjährigem Förderstillstand kann durch die von Kolmationsakkumulation unbehinderte Einwirkung der Schleppspannung ein weitgehender Abbau der Selbstdichtung erfolgen. Tiefgründige "Filterrückspülungen" mit Durchlässigkeitsveränderungen setzen nach BEYER/BANSCHER /9/ erst bei Rückspülgeschwindigkeiten von 0,3 cm/min. ein und sind wegen des geringen natürlichen Gefälles zum Gewässer bei diskontinuierlicher Betriebsweise nicht zu erwarten.

3.4. Stellung der Kolmation in der Erkundungsmethodik

3.4.1. Allgemeine Methodik des Mengennachweises

Die Uferfiltration ist vom Vorhandensein eines Gewässers als Speisungsobjekt, eines Grundwasserleiters und dessen hydraulischer Kommunikation mit dem Gewässer abhängig. Der Vorrat ist ein Mischwasser aus Uferfiltrat und landseitigem Grundwasserzufluß, wobei der Uferfiltratanteil Priorität besitzt. Leistungsstarke Brunnengalerien werden nahe dem Flußufer angeordnet, um das Infiltratdargebot in langgestreckten Fassungen optimal zu nutzen. Für die Standortwahl sind auch die hydrogeologischen Verhältnisse in Gewässernähe und die durch die Untergrundpassage angestrebte Beschaffenheitsverbesserung maßgebend.

Der Mengennachweis beinhaltet:

1. Berechnung der gewinnbaren Wassermenge
2. Hydraulische Bemessung der Fassungsanlage (Brunnenabsenkungen)
3. Geohydraulische Berechnung des beeinflussten Strömungsfeldes (Grundwasserabsenkung durch Brunnenbetrieb).

Es stehen analytische, modelltechnische und numerische Lösungsmethoden zur Verfügung.

Grundlage des Mengennachweises bildet das erkundete, repräsentative hydrogeologische Modell, in dem alle Gegebenheiten des Strömungsfeldes erfaßt und in schematischer Form verarbeitungsadäquat dargestellt sind. Wesentliche Schwerpunkte sind:

- Hydrogeologischer Aufbau und Geometrie des Grundwasserleiters
- Grundwasserneubildung
- Örtliche Lage der Berandungen, d. h. der geologischen und hydraulischen Grenzen des Strömungsfeldes einschließlich der dort herrschenden Bedingungen.

Die Besonderheit des Uferfiltratnachweises besteht in der zusätzlichen Berücksichtigung der hydraulischen Randbedingung, die bei der Infiltration wirksam wird (kolmatiertes Flußbett).

3.4.2. Realisierung der Kolmation als Randbedingung

Das mathematische Modell der nichtstationären horizontalebene Grundwasserströmung lautet:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{v_N}{k_f} - \left(\frac{S}{T}\right) \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

$$\phi = M \cdot h - \frac{M^2}{2} \quad \text{für gespanntes Grundwasser} \quad (6)$$

$$\phi = 1/2 h^2 \quad \text{für ungespanntes Grundwasser} \quad (7)$$

Die konkrete Lösung dieser Gleichung erfolgt nach der hydrogeologischen Erkundung der jeweiligen Rand- und Anfangsbedingungen des Strömungsfeldes. So werden die Verteilung der Geschwindigkeiten und Standrohrspiegelhöhen im Inneren des Feldes durch den Aufbau des Grundwasserleiters, die Grundwasserneubildung und die Be-

Die Durchströmung der Kolmationsschicht an beliebiger Stelle (x, y) geschieht mit der Geschwindigkeit

$$v_i(x, y) = k'_f \cdot \frac{H-h(x, y)}{m_k} = \frac{h(x, y)}{w} \quad (9)$$

Bei gesättigter Filterströmung (Regelfall der Uferfiltration) ist für die Größe von $v_i(x, y)$, abgesehen vom w -Wert, nicht der absolute Flußwasserstand, sondern das Eintrittsgefälle

$$I(x, y) = \frac{H-h(x, y)}{m_k} \quad (10)$$

verantwortlich. Der Uferfiltratzufluß kann über die Brunnenabsenkung reguliert und für Flußquerschnitte mit beliebigem Profil pro lfd. Meter Uferlänge mit Gleichung (11) berechnet werden.

$$q_{\text{Ufer}} = \int_U v_i \, dU \quad (11)$$

Der Energiebedarf zur Beförderung des Infiltrates vom Fluß zu den Brunnen besteht aus drei Anteilen:

1. Durchsickerung der Kolmationsschicht.
2. Krümmung der Strombahnen des infiltrierten Wassers von der vertikalen zur horizontalen Fließrichtung.
3. Transport im Grundwasserleiter vom Fluß zu den Fassungen.

Kolmatisierte Gewässerbetten gelten als Randbedingung 3. Art. Beim Vorratsnachweis (geohydraulischer stationärer Endzustand) wird der Potentialverlust am Fluß als fiktive Zusatzlänge ΔL_2 verwirklicht. Für das Strömungsfeld wird ein Ersatzfeld eingeführt, in dem der Rand des infiltrierenden Gewässers gegenüber der tatsächlichen Entfernung zwischen Ufer und Brunnen um einen dem Kolmationswiderstand gleichwertigen Betrag ΔL_2 verschoben wird (Ersatzrand). Die speisende Berandung wird dann wie eine nichtkolmatisierte Infiltrationsfläche behandelt. Die Durchlässigkeit des fiktiven Bereiches ΔL_2 entspricht der des Wasserleiters zwischen den Fassungen und dem Gewässer.

Bei analoger Modellierung oder digitaler Simulation wird der Eintrittswiderstand durch Diskretisierung des Gewässers bzw. Gewässerrandes realisiert. Für jeden Abschnitt wird ein der Kolmation entsprechender Widerstand vorgeschaltet bzw. beachtet.

4. Methodik zur Untersuchung der Kolmationsentwicklung in der Elbe

4.1. Lösungsweg

Der Forderung der Zielstellung nach objektiven Aussagen zum Kolmationsverhalten wird mit einem empirischen Lösungsverfahren entsprochen. Das generelle Untersuchungsprogramm beinhaltet:

- Langfristige Erfassung und Analyse der Kolmationsentwicklung durch Auswertung von Feldmessungen in Uferfiltratwasserwerken,
- Zustandsaufnahme der Elbsohle durch Taucher.

Die Kolmation wird unter den natürlichen Bildungsbedingungen erforscht. Waren die Ergebnisse der bisherigen Labor- und halbtechnischen Versuche nicht auf die Fließgewässer übertragbar, so werden mit den Arbeiten am konkreten Gewässer jetzt repräsentative Aussagen gewonnen. Eine detaillierte Interpretation des Selbstdichtungsprozesses ist mit den Feldwerten allerdings nicht möglich. Die berechneten Kolmationsparameter sind vielmehr Integralwerte, die die Untersuchung ursächlicher Zusammenhänge der Selbstdichtung mit anderen integralen Größen (Uferate, Durchfluß im Gewässer) durch eine korrelative Auswertung gestatten. Auf den Ergebnissen kann die Erforschung von Einzelursachen im Rahmen späterer Arbeiten aufbauen.

Das methodische Konzept sieht folgende Arbeitsschritte vor:

1. Zeitabhängige, quantitative Ermittlung von Kolmationskoeffizienten auf der Grundlage des hydrogeologischen Modells der Uferfiltratfassung. Für Stichtagsmessungen der Grund- und Flußwasserstände erfolgt die Berechnung von Einzelwerten des w -Wertes. Entsprechend dem verfügbaren Datenangebot - gefragt sind historische Meßdaten - wird das Verhalten über viele Jahrzehnte verfolgt, da sich Gesetzmäßigkeiten nur mit langen Zeitreihen, bei denen die Einbeziehung extremer Bildungszustände wahrscheinlich ist, erkennen lassen.
2. Quantitative Erfassung relevanter Bildungsfaktoren: Wasserstand- und Durchflußbedingungen im Gewässer, Infiltrationsbelastung.

3. Wissenschaftliche Auswertung der identifizierten Kolmationswerte: Bestimmung der zeitlichen Veränderung der Selbstdichtung bei permanenter Uferfiltration, Auffindung empirischer Gesetzmäßigkeiten des Kolmationsverhaltens. Auf Grund der Vielfalt der Einflußfaktoren wird das "Black-Box-Prinzip" angewendet, wonach das System des Filters (Flußsohle) in sich als "Black-Box" betrachtet wird. Für nachgewiesene relevante Bildungsbedingungen werden Abhängigkeiten zwischen der Uferrate (INPUT) und dem Kolmationswiderstand (OUTPUT) untersucht. Gemäß den praktischen Bedürfnissen wird die in den Wasserwerken bisher erreichte Uferrate q_{Ufer} analysiert und mit dem dabei entstandenen Verdichtungsgrad des Flußbettes verglichen. Auf der Grundlage des konkreten Gewässerleistungsvermögens werden praktikable Belastungswerte q_{Ufer} abgeleitet. Ergänzend wird der aktuelle Zustand der Gewässersohle durch Taucher erkundet. Damit werden die gewonnenen Erkenntnisse zum Kolmationsverhalten gestützt und die methodischen Empfehlungen zur Berücksichtigung der Selbstdichtung beim Vorratsnachweis untermauert.
4. Ableitung eines Verfahrens zur Prognose des Kolmationskoeffizienten auf der Grundlage der gefundenen empirischen Beziehungen. Ins einzelne gehende methodische Angaben sind den entsprechenden Abschnitten zu entnehmen.

4.2. Lösungsmaßnahmen

Die Lösung der Forschungsaufgabe basiert i. a. auf der Recherche und Auswertung der Betriebsverhältnisse von Uferfiltratwasserwerken und des Durchflußgeschehens der Elbe. Abgesehen von der Flußsohlen-erkundung werden keine technischen Arbeiten durchgeführt. Der Erfolg der Arbeit hängt von den bereitgestellten Betriebsdaten ab. Bezugswasserwerke sind zwei Wasserwerke an der Oberen Elbe. Von den zahlreichen recherchierten Fassungsanlagen sind es die einzigen Werke, in denen langjährige Meßreihen über mehr als 50 Betriebsjahre zur Verfügung stehen.

Die wichtigsten Lösungsmaßnahmen sind in Tabelle 2 zusammengefaßt. Hieraus geht auch die Zusammenarbeit mit verschiedenen wissenschaftlichen und technischen Institutionen hervor.

Tabelle 2: Lösungsmaßnahmen zur Untersuchung der Kolmationsentwicklung in der Elbe

Wasserwerks- und Betriebsanalysen	Hydrogeologisches Modell	Gewässeranalysen Elbe	Identifikation des Kolmationskoeffizienten	Wissensch. Auswertung der Ident. Kol.- Zustände
<p>1. Recherche Grundwasserstandsmessungen im uferseitigen Anströmfeld der Brunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Erhebung historischer Grundwassermeßdaten für Meßprofile zwischen Fluß und Brunnenreihe (Wasserwerkstatistik) <p>2. Recherche des Förderregimes:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kontrolle des Langzeitverlaufs der Förderung - Erhebung der Fördermenge (Wasserwerkstatistik) <p>3. Aufnahme von Lage und Ausbau der Grundwasserbeobachtungsrohre und Brunnen</p> <p>BETREIBER DER WASSERWERKE I UND II</p>	<p>1. Erhebung der hydrogeolog. Daten für das Anströmfeld der ufernahen Fassungen der Wasserwerke I und II</p> <p>2. Darstellung der Lagerungsverhältnisse und Approximation der geometrischen und hydrogeologischen Parameter für repräsentative Stromröhren der w-Wertidentifikation (Profile zwischen Brunnenreihen und Fluß)</p>	<p>1. Erhebung hydrologischer Gewässerkenntwerte am repräsentativen Flußpegel des Sondernetzes: Wasserstand (langjährige Ganglinie), Durchfluß, Gefälle, Fließgeschwindigkeit.</p> <p>2. Erhebungen zur Wasserbeschaffenheit, vor allem zur Schwebstoffkonzentration</p> <p>WWD OBERE ELBE/NIEBE DRESDEN</p> <p>3. Recherche zur Laufbildung und Profilgestaltung: Erhebung der Flußquer- und -längsprofile; Ausbauprojekte der Elbe</p> <p>VEB WASSERSTRASSENBETR. U. UNTERH. MAGDEBURG, BT DRESDEN</p> <p>4. Recherche zum Umfang des Schiffsverkehrs</p> <p>VEB BINNENREEDEREI DRESDEN WEIßE FLOTTE DRESDEN TSCHECHOSLOV. ELBESCHIFFFAHRT ČSPLO DRESDEN</p> <p>5. Taucheruntersuchungen zur Sohlenbeschaffenheit und Kolmation des Gewässerbettes</p> <ul style="list-style-type: none"> - visuelle Begutachtung des Gewässerbettes; Schürfarbeiten auf der Flußsohle mit Bodenprobenahme und Messung der Kolmationsmächtigkeit <p>VEB WASSERSTRASSENBETR. U. UNTERH. MAGDEBURG VEB BAUGRUND BERLIN</p> <ul style="list-style-type: none"> - Siebanalytische Bestimmung der Kornverteilung der Sohlensedimente; mineralogische Analysen der Kolmationsmasse <p>VEB HYDROGEOLOGIE NORDHAUSEN TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN, SEKTION BAUINGENIEURWESEN</p>	<p>1. Für das Wasserwerk I und II Berechnung von 558 Terminalwerten des Kolmationskoeffizienten. Identifikationsprinzip: Stromröhre zwischen Fluß und Brunnenreihe und Anwendung der Fragmentmethode</p> <p>2. Berechnung eines Einzelwertes des Kolmationskoeffizienten für einen Elbabschnitt, der von Uferfiltration unbelastet ist. Verwendung von Meßwerten aus einem ufernahen Pumpversuch</p>	<p>1. Interpretation der zeitlichen Einzelwerte des Kolmationskoeffizienten</p> <ul style="list-style-type: none"> - Zeitliche Entwicklung: Langzeitverhalten; Innerjährliche Entwicklung; Jahreszeitlicher Gang der Entwicklung - Kolmationsbildung unter Mittel- und Niedrigwasserdurchfluß im Gewässer in Abhängigkeit von der Intensität der Uferfiltration - Kolmationsverhalten bei Hochwasser <p>2. Schlussfolgerungen in Hinblick auf die Berücksichtigung des Kolmationswiderstandes beim Vorratsnachweis</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ableitung eines Algorithmus zur Voraussage des Kolmationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Infiltrationsbelastung des Flußbettes und den fluviatilen Bildungsbedingungen bei Mittel- und Niedrigwasser - Begründung praktikabler Relativierungswerte C_{rel} für den Betrieb von Uferfiltrationswerken

5. Zustand der Elbsohle

Anliegen der Elbsohlenerkundung ist die systematische Gewinnung authentischer Informationen über das Vorkommen der Selbstdichtung in Fließgewässern. Erstmals werden damit räumlich ausgedehnte Untersuchungen über die Erscheinung, die tatsächliche flächenhafte Verbreitung und die Mächtigkeit der Kolmation in großen Strömen durchgeführt.

Die Taucherarbeiten werden zu dem Ergebnis führen, daß die Gewässersohle praktisch nur durch innere Kolmation in der fassungsseitigen Uferzone verdichtet ist, deren Masse sich vor allem aus anorganischen Schwebstoffen rekrutiert.

5.1. Untersuchungsprogramm

Mit einem Spezialschiff mit Taucherschacht erfolgte vom 1. - 24. 9. 1980 zwischen Pirna und Wittenberg (Stromkilometer 37 - 222) die Aufnahme des Gewässerbettzustandes auf einer Strecke von rund 200 km. Es wurden 26 Flußquerprofile vor 12 Wasserwerken mit 3 - 4 Tauchpunkten je Profil befahren. Für 13 Entnahmestandorte wurde aus Bodenproben der Flußsohle Kolmationsmasse gewonnen und durch mineralogische Analysen untersucht - Thermogravimetrische Analysen, röntgenografische Phasenanalysen. Zum Untersuchungsprogramm vgl. Tabelle 2 in Abschnitt 4.2.



Bild 8: Spezialboot mit Taucherschacht in Schiffsmitte

Vereinzelt existieren lokale Anlandungen grober Sande in strömungsarmen Zonen, die bei höheren Durchflüssen schnell wieder abgetragen werden. Die Unterschicht besteht aus Kiesen (60 bis 70 % Mengenanteil) und Grobsand (20 %), dem wenig Mittelsand (10 - 20 %) beigemischt ist.

In der Mittleren Elbe (Torgau-Wittenberg) bilden vorzugsweise Kiese (70 %), eingebettet in Grob- bis Mittelsande (30 %), die Deckschicht. Steine kommen nur noch selten vor.



Bild 10: Deckschicht der Elbsohle im Mittellauf

Ausgenommen die Bühnenfelder bleibt dieses Bild über den Querschnitt vorerst unverändert, bis dann im Raum Wittenberg der Kies- und Sandanteil differenziert zwischen 30 und 70 % auftritt. Viel häufiger als im Oberlauf erscheinen kleine, unbeständige Sandbänke von 4 - 15 cm Stärke.

Die Unterschicht unterscheidet sich mit 70 % Kies und 30 % Sand kaum noch von der Deckschicht. Im Staubereich der Bühnen sind Sandablagerungen aller Korngrößen in wechselnder Lagerung, überwiegend aber Feinsande, lokalisiert.

Zusammenfassung der Ergebnisse der Elbsohlenuntersuchung:

Die für die innere Kolmation maßgebende Unterschicht der Flußsohle hat zwischen Pirna und Wittenberg einen quasi gleichartigen Kornaufbau:

70 % Kiese, 30 % Grob- bis Mittelsande,
Mittelwert $k_f = 13,8 \cdot 10^{-4}$ m/s (Spektrum $k_f = 10 - 17,5 \cdot 10^{-4}$ m/s),
mittlerer wirksamer Korndurchmesser $d_{10} = 0,43$ mm (Spektrum
 $d_{10} = 0,38 - 0,48$ mm)。



Bild 11: Sandanlandung auf der Elbsohle im Mittellauf

5.3. Kolmationserscheinung

5.3.1. Allgemeines

Die Beständigkeit der Selbstdichtung hängt von der Stabilität der Gewässersohle ab. Von besonderer Bedeutung sind Strecken mit Geschiebeaufnahme infolge ständiger oder periodischer Erosion. Aber auch dort, wo Geschiebegleichgewicht besteht, ist die Flußsohle hydraulisch nicht stabil, befindet sich das Sohlenmaterial in Abhängigkeit von den Durchflußschwankungen in ständiger Bewegung. Unter diesen Bedingungen ist das Entstehen einer dauerhaften äußeren Kolmation ausgeschlossen. In Abschnitten mit permanenter Geschiebeaufnahme wird auch die innere Kolmation fraglich,

wenn die Eintiefung schneller verläuft, als der Aufbau der Selbstdichtung (z. B. bei Hochwasser).

Im Ober- und Mittellauf ist die innere Kolmation für die Uferfiltration relevant.

Nur im Staubereich der Flüsse und bei deren Eintritt in die fast gefällelose Ebene bzw. bei Flachlandflüssen ist oft die äußere Kolmation die maßgebende Größe des Eintrittswiderstandes.

5.3.2. Elbsohle

Es existiert hauptsächlich innere Kolmation, die in der Oberen Elbe generell in der Unterschicht, in der Mittel- und Unterelbe bereits in der Deckschicht ausgebildet ist.

In ihrer flächenhaften Verbreitung ist sie vor Wasserwerken i. a. auf die fassungsseitige Uferzone beschränkt und selten bis in die Nähe der Flußmitte ausgedehnt. Praktisch unkolmated ist der Bereich des Stromstriches. Damit stehen allerorts noch infiltrationsaktive Sohlflächen der Uferfiltration zur Verfügung.



Bild 12: Innere Kolmation in der Elbsohle

Die Mächtigkeit der inneren Kolmation beträgt 3 - 30 cm, überwiegend 10 - 30 cm. Bemerkenswert ist, daß die oberen 3 - 5 cm

des Filters durch die Strömung ausgewaschen und unkolmatiert sind. Lokale Sandablagerungen sind wegen ihrer ständigen Umlagerung nicht kolmatiert. Selbstdichtung besteht hier erst in der liegenden Kiesschicht.

Das kolmatierte Sohlenmaterial hat auf Grund anaerober Zersetzung der organischen Substanzen eine markante Schwarzfärbung (Bild 12, 13), die auf die Produktion von Schwefelwasserstoff durch sulfatreduzierende Bakterien und die Bildung von Eisenmonosulfid durch Reaktion mit sedimenteigenem Eisenoxid bzw. Eisenoxidhydrat zurückzuführen ist, das schon in geringen Mengen die Schwarzfärbung bewirkt.



Bild 13: Kolmatiertes Sohlenmaterial

In der Elbe befindet sich i. a. keine äußere Kolmation, auch nicht in den Gewässerrandzonen mit ihren geringen Fließgeschwindigkeiten $v_{\text{Fluß}} < 0,3 \text{ m/s}$ (Ausnahme: Bühnenfelder, s. u.). Das ist auf die am Ufer noch vorhandene Turbulenzintensität zurückzuführen. Nur im Oberen Elbtal kommen sporadisch lokal begrenzte Ablagerungen von Industrierückständen unterhalb von Abwassereinleitungen vor. Entlang der sich am Flußufer hinziehenden Abwasserfahne bestehen sie aus schleimigen und schmierigen Belägen, die die Gewässersohle bedecken und den Porenraum mitunter bis in die Unterschicht ausfüllen (Eindringtiefe 3 - 5 cm), siehe Bild 14-16.

Zum Dichtungsgrad können keine Angaben gemacht werden. Eine stoffliche Bestimmung erfolgte nicht. Durch gute Hafteigenschaften bleiben die Beläge auch bei Überschreitung der Grenzgeschwindigkeit $v_{\text{Fluß}} = 0,30 \text{ m/s}$ und relativ großer Turbulenzintensität erhalten.



Bild 14: Rückstände der Zellstoffindustrie auf der Elbsohle



Bild 15: Schmierige, stark riechende Abfälle einer Schiffsreparaturwerft auf der Elbsohle

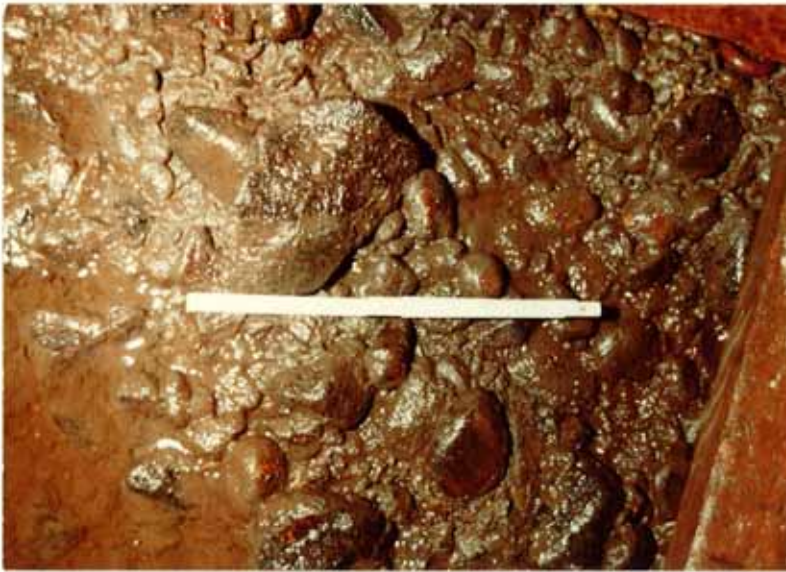


Bild 16: Schleimige, fadenförmige Bedeckung der Elbsohle unterhalb einer städtischen Kläranlage

Auch in Stromabschnitten, die nicht durch Uferfiltration belastet sind, wurden Industrierückstände angetroffen, so daß ihre Ablagerung nicht unmittelbar von der Wassergewinnung abhängig gemacht werden kann. Derartige Bildungen sind auch keinesfalls nur auf die Elbe beschränkt. Beispielsweise berichtet KLUDIG /41/, daß im Rhein vor Uferfiltratwerken "Verklebungen des Sohlenmaterials mit zähem, schwarz-grauem Schlamm" festgestellt wurden, deren "Verklebungstiefe zur Strommitte hin abnimmt."

In den Bühnenfeldern entsteht grundsätzlich äußere Kolmation, die bei höheren Durchflüssen besonders von Fein- und Mittelsanden überlagert und dann zur inneren Kolmation wird. Langfristig bildet sich dann eine Schichtung aus Kolmations- und Sandschichten mit starker Dichtungswirkung.

Die Erkundung der Kolmationserscheinung in der Elbe führt zusammengefaßt zu folgenden Ergebnissen:

1. Es besteht hauptsächlich innere Kolmation, die vor Wasserwerken i. w. in der fassungsseitigen Uferzone angesiedelt ist. Unkolmatisierte Flächen befinden sich in Flußmitte bzw. im Stromstrich.

2. Die Mächtigkeit der inneren Kolmation beträgt 3 - 30 cm.
3. Äußere Kolmation ist in den Bühnenfeldern und sporadisch in Form lokaler Ablagerungen von Industrierückständen unterhalb von Abwassereinleitungen vorhanden.

5.4. Kolmationsmasse

5.4.1. Allgemeines

Die Kolmationsmasse entsteht aus den Gewässerinhaltsstoffen, deren Spektrum sehr vielfältig und deren stoffliche und chemische Charakterisierung noch immer unvollkommen ist (ROLKE /59/).

Flußwasser besteht aus einer Lösungs- und Feststoffphase mit anorganischen und organischen Bestandteilen sowie den Kolloiden als Übergangsphase. Daneben enthält es Lebewesen tierischer und pflanzlicher Natur. Die Feinteile werden durch die Turbulenz aufgewirbelt und als Suspension weitertransportiert. Hauptbestandteile der Schwebstoffe sind Quarze, Feldspatsplitter und Tonminerale: z. B. im Rhein 45 % Quarz, 16 % Tonminerale (HELLMANN/BRUNS /34/). Weiterhin sind u. a. Karbonate, Mikroorganismen, flockige, z. T. abgestorbene Algen und Pflanzenfasern von Bedeutung. Die Konzentration und Palette der Inhaltsstoffe wird durch die häuslichen und industriellen Abwassereinleitungen noch erhöht. Sie bringen besonders Zuführungen von industriellen, refraktären organischen Produkten wie Abwässer der Zellstoffindustrie (Lignin), Mineralölkohlenwasserstoffe, Phenole, Fett- und Eiweißverbindungen, aber auch von Salzen sowie Eisen- und Manganverbindungen.

Die Verteilung der Schwebstoffe über die Flußtiefe ist ungleichmäßig. Wenn auch durch die Strömung eine ständige Durchmischung und Umverteilung stattfindet, so bedingt doch die Schwerkraftentmischung ein größeres Angebot von groberen Feststoffteilchen $> 0,1$ mm in der unteren Fließzone (WERNER /63/), die für die Infiltration als Wasserlieferant in Frage kommt. Das relative Maximum der Schwebstoffkonzentration tritt bei anwachsender Flutwelle auf (Hochwasser mit Überflutung und Sohlenerosion), das absolute Minimum bei beharrenden Wasserständen nach einem Hochwasser.

5.4.2. Elbsohle

Nach den Untersuchungsbefunden erreicht die Kolmationsmasse in der Elbe 0,5 - 1,65 %, i. M. 1 % des Bodengewichtes der Filterzone. In der Oberelbe sind es 1,1 %, in der Mittelelbe 0,7 %. In ähnlicher Größenordnung (1,9 % des Bodengewichtes) bestimmte BANSCHER /5 / den Kolmationsanteil mit einem Gerinneversuch unter Verwendung von Elbwasser aus dem Raum Dresden-Hosterwitz.

Tabelle 3: Teilanalysen der Kolmationsmasse der Elbsohle

Stoff	Quantitative Bestimmung [Massen-%]		Qualitative Bestimmung
	Mittelwert	Maximalwert	
Organische Substanzen	8,5	10,5	
Quarz	29	43	
Kaolinit	10,7	15,4	
Kalziumkarbonat	4,1	8	
Tonminerale			vorhanden
Kalifeldspat			vorhanden

Entsprechend seiner Vorrangstellung bei den Schwebstoffen - vgl. Abschnitt 5.4.1. - bildet der Quarz auch die wichtigste Komponente der Kolmationsmasse. Bedingt durch seine rein mechanische Absiebung ist er besonders in der oberen Filterschicht vertreten, wo sein Anteil mit 35,4 % fast doppelt so groß ist, wie in der tieferliegenden Schicht von 3 - 10 cm unter Gewässer-
sohle. Das organische Material ist mit 10,25 - 10,5 % der Kolmationsmasse vor allem in die oberste Schicht bis in eine Tiefe von 3 cm eingetragen. In 10 - 30 cm unter Sohle erreicht es nur noch 2,5 % der Gesamtkolmation. Auch vom Unterlauf der Spree liegen eigene Kolmationsbefunde vor, die den Gehalt organischer Stoffe mit i. M. 10,8 %, den des Quarzes mit i. M. 26,6 % ausweisen.

Bemerkenswert ist, daß in der Elbe i. M. 91,5 % der Kolmationsmasse anorganischer und 8,5 % organischer Natur sind. Vergleichsweise erbrachten Einzelanalysen vom Rheingrund im obersten Filterbereich einen organischen Anteil von 11,7 % (HOLLUTA u. a. /36/). Hieraus wird deutlich, daß das prozentuale Vorkommen der

organischen und anorganischen Phase in den großen Strömen weitgehend übereinstimmt. Weiterführende Schlußfolgerungen erfordern breiter gefächerte Analysen, die derzeit noch nicht vorliegen.

Zusammenfassend ist festzustellen:

1. Die Kolmation besteht im wesentlichen (~ 90 %) aus anorganischer Materie.
2. Die Kolmationsmasse umfaßt rund 1 % des Bodengewichtes der Filterzone.
6. Gesetzmäßigkeiten der Kolmationsentwicklung im Gewässerbett der Elbe

Im Mittelpunkt der Untersuchungen steht die Analyse des Langzeitverhaltens der inneren Kolmation. Dabei wird sich zeigen, daß die zeitliche Entwicklung durch eine Folge von Auf- und Abbauphasen gekennzeichnet ist. Hierfür sind zeitvariable Bildungsbedingungen verantwortlich, die mit den Hoch-, Mittel- und Niedrigwasserdurchflüssen im Gewässer identisch sind. Die partiellen Kolmationsvorgänge unter diesen Verhältnissen werden erforscht, das Bildungsverhalten wird durch empirische Funktionen beschrieben.

6.1. Grundlagen der Untersuchungen

Entsprechend Abschnitt 4.2. basieren die Untersuchungen auf den Betriebsergebnissen zweier Uferfiltratwasserwerke. Es werden nachstehend die allgemeinen Bedingungen und die hydrogeologischen Verhältnisse skizziert, unter denen die Wassergewinnung erfolgt. Eine problembezogene Charakteristik der Elbe rundet diese Darlegungen ab.

6.1.1. Uferfiltratwasserwerke

6.1.1.1. Allgemeine Kennzeichnung

Beide Bezugswasserwerke fördern seit 80 - 90 Jahren mit langgestreckten, ufernahen und flußparallelen Brunnenfassungen Uferfiltrat der Elbe (Heberbetrieb). Es sind mehrere zehntausend

Kubikmeter pro Tag. Schematische Systemdarstellungen der Fassungstrassen und Meßprofile enthalten die Bilder 21 und 22.

Verlief der Betrieb im Wasserwerk I bis zum Ende des 2. Weltkrieges kontinuierlich, so erfolgte ab 1947 ein Rückgang der Wassergewinnung, bis 1949/50 nur noch sporadisch gefördert wurde. Von 1951 - 1956 lag das Wasserwerk still. Die Wiederinbetriebnahme fand 1957 statt. Im Wasserwerk II kam es 1948 - 1951 infolge mehrmonatiger Betriebsstillstände zur Einschränkung der Tagesförderung auf rund 30 % der mittleren Fördermenge. Das Werk war auch von November 1965 bis November 1966 sowie einige Monate in den Jahren 1952 - 1957, 1974, 1977 und 1978 außer Betrieb.

6.1.1.2. Hydrogeologische Verhältnisse

Die Uferfiltration ist nach BAMBERG/GARLING /4 / an einen Grundwasserleiter des Lagerstättentyps "Mächtiges quartäres Lockergestein - Taltyp - Breite Flußtäler" gebunden, für den fluviale Schotter typisch sind: Grobsande, Kiese, untergeordnet Mittelsande mit einem Durchlässigkeitskoeffizienten von i. M. $7,5 - 10 \cdot 10^{-4}$ m/s. Er ist praktisch homogen und isotrop und gilt unter geohydraulischem Aspekt als ungeschichtet. Im Bereich der Brunnentrassen ist die Grundwassersohle relativ eben ausgebildet. Die Elbe ist mehrere Meter in den Wasserleiter eingeschnitten, so daß hydraulische Kommunikation zwischen dem Oberflächen- und Grundwasser besteht. Letzteres hat eine freie Oberfläche. Es wird auf die schematischen hydrogeologischen Schnitte in Bild 17 - 20 verwiesen,

6.1.1.3. Meßprofile für Identifikation des Kolmationskoeffizienten

In den Uferfiltratwerken wurden Grundwasserstände in rechtwinklig zur Elbe angeordneten Profilen, die aus Beobachtungsrohren und Brunnen bestehen, gemessen. Die Messungen wurden im Werk I im April 1965 eingestellt. Im Werk II existieren für 1945 - 1953 keine und ab 1954 nur noch lückenhafte Aufzeichnungen. Für die Berechnung des Kolmationskoeffizienten stehen die Meßdaten der in Tabelle 4 zusammengestellten Profile zur Verfügung.

Tabelle 4: Angaben zu den Grundwassermeßprofilen

		Wasserwerk I		Wasserwerk II	
		Profil 1	Profil 1	Profil 2	Profil 4
Abstand Brunnen bis Mittelwasserstreiflinie der Elbe	[m]	84	105	94	94
Abstand der Brunnen untereinander	[m]	25	17-27	20	10-14
Meßwerte verfügbar		1930-1944 1957-1965 vor 1930 sporadisch	1912/1914 1920-1923 1927-1979	1913/1914 1920-1923 1927-1978	1914-1918 1920-1923 1929-1963
Entfernung Flußwasserpegel vom Meßprofil	[m]	2300	4530	4100	3620

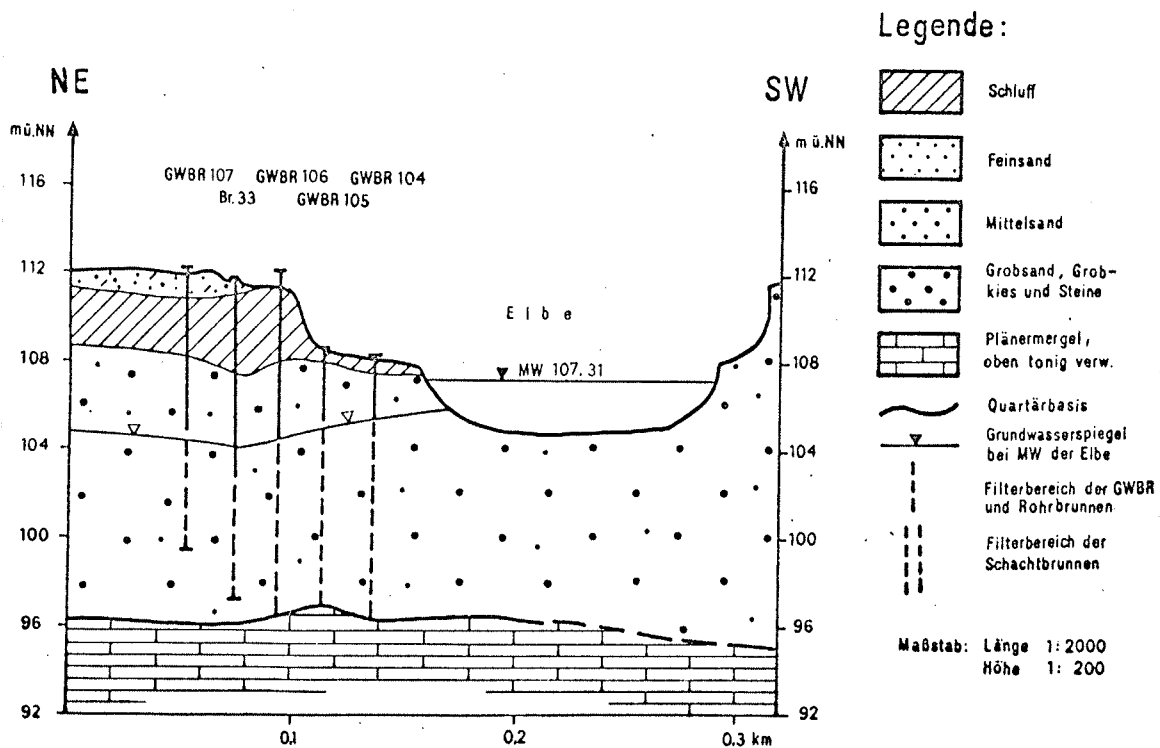


Bild 17: Schematischer hydrogeologischer Schnitt durch das Meßprofil 1 des Wasserwerkes I

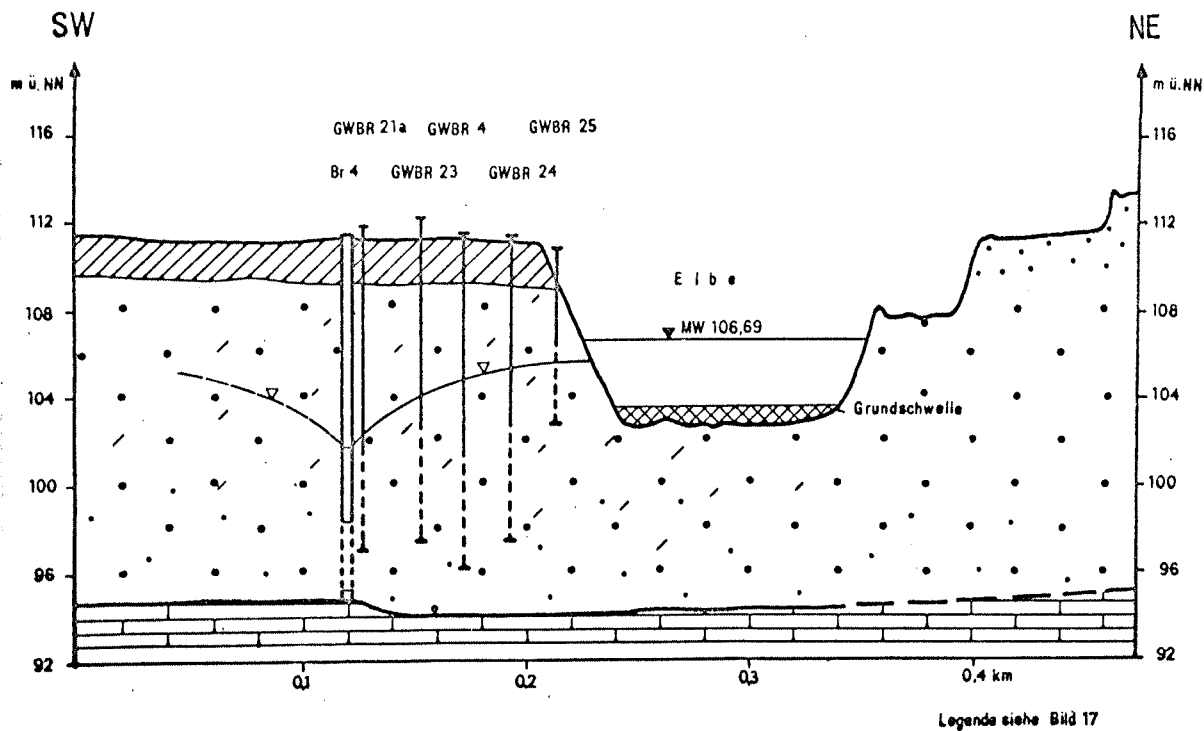


Bild 18: Schematischer hydrogeologischer Schnitt durch das Meßprofil 1 des Wasserwerkes II

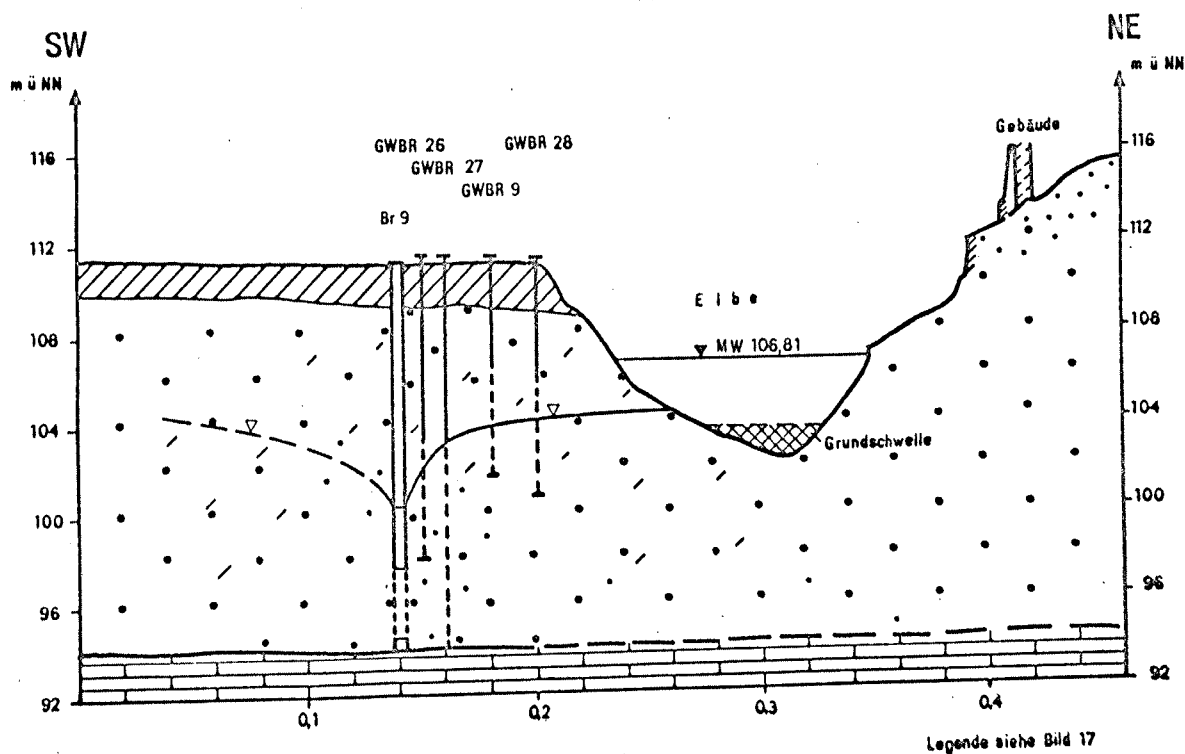


Bild 19: Schematischer hydrogeologischer Schnitt durch das Meßprofil 2 des Wasserwerkes II

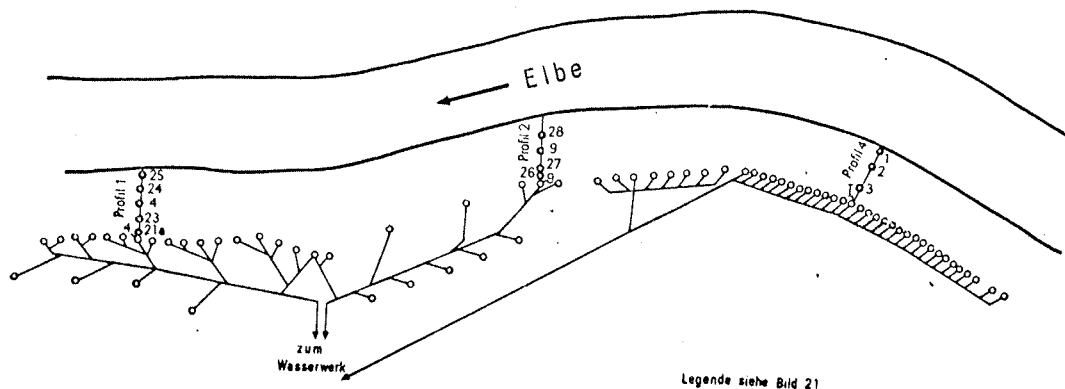


Bild 22: Systemschema der Uferfiltratfassungen und der Meßprofile im Wasserwerk II

6.1.2. Charakteristik der Elbe

6.1.2.1. Allgemeine Kennzeichnung

Das Strombett des Oberlaufes der Elbe ist seit Ende des 19. Jahrhunderts durch einen Mittelwasserausbau (Längswerke) reguliert. Im Betrachtungsraum ist die Normalbreite auf 110 - 140 m eingeschränkt. Zur Beseitigung umfangreicher Auskolkungen am Wasserwerk II wurden 1958/60 Grundswellen eingebaut. Bühnen sind nicht vorhanden.

Als Wasserstraße hat die Elbe einen starken Schiffsverkehr. Es wird in diesem Zusammenhang auf Abschnitt 3.3.2. verwiesen. Ein Flußpegel des Sondernetzes repräsentiert mit täglichen Wasserstandsablesungen den Bereich der untersuchten Wasserwerke. Die Durchflüsse sind durch folgende Hauptzahlen gekennzeichnet: $MNQ = 97,5 \text{ m}^3/\text{s}$, $MQ = 316 \text{ m}^3/\text{s}$, $MHQ = 1419 \text{ m}^3/\text{s}$ (Reihe 1931/75). Das Spiegelgefälle beträgt bei Mittlerem Niedrig- bis Mittelwasser ca. 0,25 o/oo, die mittlere Fließgeschwindigkeit bei Niedrigwasser $v_{\text{Fluß}} = 0,5 - 1 \text{ m/s}$, bei Mittlerem Niedrigwasser $v_{\text{Fluß}} = 1 \text{ m/s}$ und bei Mittelwasser $v_{\text{Fluß}} = 1,15 \text{ m/s}$.

Tabelle 5: Hydrologische Hauptzahlen Sonderpegel Elbe
(Pegel-Null 105,86 m NN)

W a s s e r s t ä n d e		
Reihe 1936/40		Reihe 1956/65
MHW	107,09 m NN ± 1,23 m ü PN	106,92 m NN ± 1,08 m ü PN
NW	108,29 m NN ± 2,43 m ü PN	107,95 m NN ± 2,11 m ü PN
MHW	111,62 m NN ± 5,76 m ü PN	110,75 m NN ± 4,91 m ü PN
HNW (1933) 106,36 m NN ± 0,52 m ü PN		
HHW (1890) 115,52 m NN ± 9,68 m ü PN		

6.1.2.2. Laufbildung und Profilgestaltung

Die Elbe hat ein ausgeprägtes Muldenprofil und am Wasserwerk I einen quasi-geradlinigen Verlauf ohne Gleit- und Prallufer-effekt. Am Wasserwerk II besteht eine Linkskrümmung, die Mehrzahl der Brunnen befinden sich am Gleithang.

Der Sohlenlängsschnitt im Bild 23 verdeutlicht die Tiefenerosion im Strombett. Es fällt das geringe Sohlengefälle am Werk I auf, das hier auf eine relative Stabilität des Gewässerbettes schließen läßt. Dagegen treten am Werk II sehr starke Eintiefungen in Erscheinung; Schwankungen in der Tiefenlage der Sohle von ± 100 cm stehen nur solche von ± 10 cm am Wasserwerk I gegenüber.

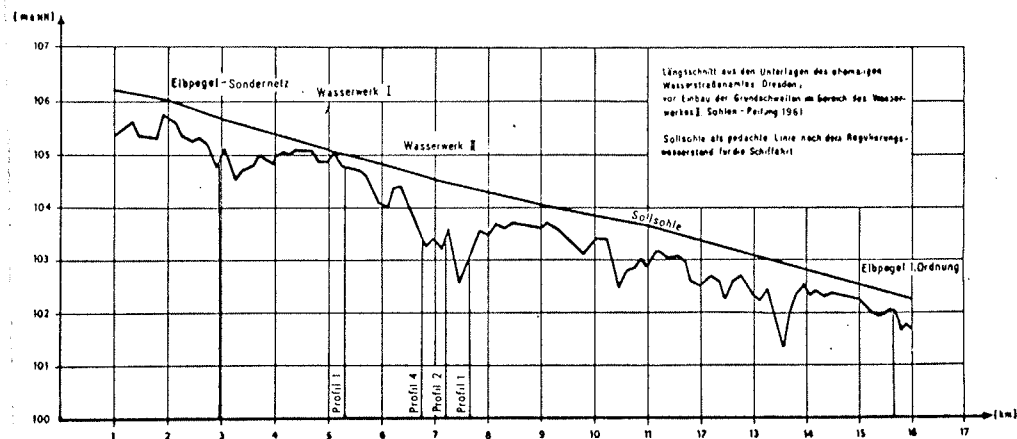


Bild 23: Elbsohlenlängsschnitt im Bereich der Uferfiltratwasserwerke I und II

6.1.2.3. Schwebstoffbelastung

Zur Beurteilung stehen Analysenwerte der 20jährigen Meßreihe 1960/1980 von einem nur 2 - 4 km von den Bezugswasserwerken entfernten Gütepegel zur Verfügung. Aus den Jahren 1960 liegen keine Befunde vor.

Die Konzentration der abfiltrierbaren Stoffe schwankt von Monat zu Monat erheblich. Die Abhängigkeit extrem hoher Konzentrationen von Hochwasserereignissen wird sichtbar. Jahresmittelwerte variieren zwischen 16 - 28,5 mg/l. Tendenzielle Veränderungen (Zunahmen) der Schwebstoffführung innerhalb des Zeitraumes 1960 - 1980 sind aus der Ganglinie der Jahresmittelwerte (Bild 24) nicht ableitbar. Die Jahreswerte streuen um den Mittelwert der Meßreihe von 21,7 mg/l.

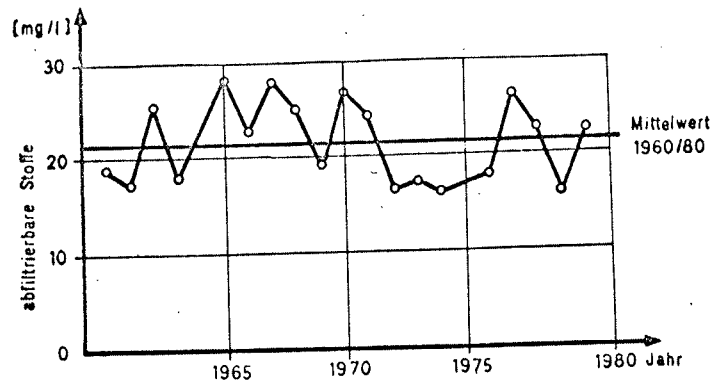


Bild 24: Ganglinie der Jahresmittelwerte der abfiltrierbaren Stoffe in der Elbe im Bereich der Uferfiltratwerke I und II

6.2. Identifikation des Kolmationskoeffizienten

Die Kolmationsparameter bilden die Grundlage für die Erforschung der langfristigen Kolmationsentwicklung. Jeder w -Wert widerspiegelt einen bestimmten, für den Meßzeitpunkt charakteristischen Verdichtungsgrad. Erst eine Vielzahl von Einzelwerten gestattet Rückschlüsse auf zeitliche Abläufe.

In den Abschnitten 6.2.1. - 6.2.2. wird auf das Verfahren zur analytischen Ermittlung des w -Wertes und auf die Berechnungsergebnisse detailliert eingegangen. Der Umfang der identifizierten Kolmationskoeffizienten, ihre statistische empirische Verteilung und ihre Repräsentanz wird dargelegt.

6.2.1. Verfahren zur Berechnung des Kolmationskoeffizienten

Ausgehend von der Erkenntnis, daß das Grundwasserfließregime einer Uferfiltratfassung in guter Näherung der Grabenströmung entspricht, wird dem Bestimmungsverfahren das Modell der ein-dimensionalen stationären Grabenströmung zu Grunde gelegt. Bei der Identifikation der w -Werte wird die Umkehrung der klassischen Strömungsfeldberechnung praktiziert. Aus Messungen der Grundwasserbewegung wird auf Eigenschaften des Systems geschlossen.

Die Kolmation findet ihren Ausdruck in der Potentialverteilung zwischen Gewässer und Fassungen. Durch Vorgabe der Grundwasserspiegelverteilung und der Transmissibilitätsbedingung in einem vertikal ebenen Schnitt senkrecht zur Längsachse der Elbe (Stromröhre) wird unter Hinzuziehung des Flußwasserstandes der hydraulische Widerstand des Gewässerbettes vorerst als fiktive Zusatzlänge ΔL berechnet. Hilfsmittel ist die Fragmentmethode, mit der einzelne Teilströmungen unter Beachtung der Übergangsbedingungen berechnet werden können (BUSCH/LUCKNER/14/). Der Zufluß durch Unterströmung des Flußbettes wird infolge seiner Geringfügigkeit vernachlässigt (Abschnitt 3.3.1.). Die Neubildung des Grundwassers aus Niederschlägen bleibt wegen der geringen Größe des Untersuchungsraumes Fluß - Brunnen unberücksichtigt.

Im Wert ΔL ist sowohl der Kolmationswiderstand ΔL_2 , als auch der Widerstand infolge hydraulisch unvollkommener Berandung

ΔL_1 integriert:

$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 \quad (12)$$

Die Größe ΔL_1 ist bei dem an der Elbe bestehenden Verhältnis $\frac{h}{H} \gg 1$ unbedeutend (WAPRO 1.42 /67/), so daß ΔL praktisch dem Kolmationswiderstand entspricht.

Entsprechend dem geohydraulischen Schema in Bild 25 erfolgt die Berechnung von ΔL . Es werden quasistationäre Austauschströmungen im ungespannten Wasserleiter betrachtet. Der Rückschluß von Wasserstandswerten zweier Beobachtungsrohre und dem Flußwasserstand auf die Selbstdichtung ist mit dem Berechnungsansatz

$$\Delta L \hat{=} \Delta L_2 = L_1 \cdot \frac{\phi_H - \phi_2}{\phi_2 - \phi_3} \quad (13)$$

ϕ_H, ϕ_2, ϕ_3 für ungespanntes Wasser gleich $\frac{H^2}{2}, \frac{h_2^2}{2}, \frac{h_3^2}{2}$

auf einfache Weise möglich, was bei der großen Anzahl auszuwertender Zustände von besonderem Vorteil ist.

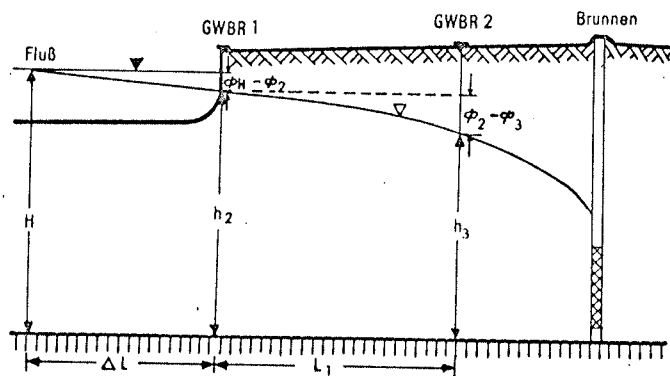


Bild 25: Geohydraulisches Schema zur indirekten Berechnung des Kolmationswiderstandes

Da eine vergleichende Auswertung an verschiedenen Standorten nur auf der Grundlage des universellen Parameters w möglich ist (Ausschaltung der standortspezifischen Transmissibilitäts-einflüsse), wird ΔL_2 nach der im WAPRO 1.42 angegebene Gleichung in den w -Wert umgerechnet:

$$\Delta L_2 = \frac{\sqrt{T \cdot w}}{\sqrt{\frac{b^2}{T \cdot w}}} \quad (14)$$

Voraussetzung für die Anwendung des beschriebenen Verfahrens ist die Einhaltung der Charakteristika der Grabenströmung:

1. Quasistationäre Anströmung der Fassungen.
2. Stromlinien im Grundriß parallel verlaufend (Parallelströmung) und senkrecht auf die Uferberandung gerichtet. Verteufung der Brunnen bis zur Grundwassersohle.
3. Idealisierung des Strömungsprofils mit ebener, horizontaler Sohle; Grundwasserleiter homogen, isotrop. Einheitlicher, repräsentativer k_f -Wert.
4. Parallelströmung im Vertikalprofil. Zur Vermeidung von Verfälschungen des Uferpotentials durch eine vertikale Strömungskomponente im Infiltrationsbereich bzw. durch Stromlinienkrümmung in Ufernähe auf Grund geohydraulisch unvollkommener Berandung des Gewässers ist der ufernahe Grundwasserstand von einer Meßstelle zu verwenden, deren Uferentfernung eine vertikalparallele Strömung gewährleistet. Dieser Uferabstand ist dann vom errechneten ΔL -Wert zu subtrahieren.

6.2.2. Berechnung der Kolmationskoeffizienten

6.2.2.1. Berechnungsgrundlagen

Den Berechnungen liegen die Meßprofile der Tabelle 6 sowie die dort angegebenen geometrischen Abmessungen und hydrogeologischen Parameter zu Grunde (vgl. auch Schnittdarstellung im Bild 17-20).

Die Flußwasserstände werden für die Profilstandorte aus den Ablesungen des Elbpegels berechnet. Mit den Elbquerprofilen wird die Gewässerbreite und die Lage der Uferlinie für unterschiedliche Wasserstände ermittelt (Querprofile und Pegelganglinie sind in der Archivakte abgelegt).

Tabelle 6: Geometrische und hydrogeologische Parameter der Untersuchungsprofile

Wasserwerk	Profil Nr.	Grundwassermeßstellen im Profil		Abstand der GWBR untereinander. L ₁ [m]	Hydrogeologische Profilparameter		Auswertbare Strömungszustände Anzahl
		ufernahes GWBR Nr.	uferfernes GWBR Nr.		k _f [m/s]·10 ⁻⁴	GWL-Sohle [m NN]	
Werk I	1	104	106	40	10,5	96,5	83
		104	105	19,9			
Werk II	1	25	23	60	7,6	94	127
		24	23	40			40
		25	21a	86			16
	2	28	27	40	7,5	94	142
4	1	1	3	60	7,6	94	99
	1	1	2	25			9

Wegen der Unkenntnis der realen Verbreitung der Selbstdichtung über den Stromquerschnitt an den jeweiligen Meßterminen wird für die Umrechnung der ΔL_2 - in die w-Werte die Annahme einer über die Gewässerbreite konstanten Kolmation getroffen (Einführung der vollen Elbbreite in Formel 14). Verwendung findet der k_f-Wert für 10° C Grundwassertemperatur, womit eine Normierung der w-Werte auf eine einheitliche Basistemperatur und eine bessere Veranschaulichung bei der späteren Auswertung des Entwicklungsvorganges erreicht wird. Das ist gerechtfertigt, da der Einfluß der jahreszeitlich schwankenden Temperaturen auf den Kolmationskoeffizienten bereits im ΔL_2 -Betrag zum Ausdruck kommt (vgl. Pkt. 6.2.2.2.).

Nachstehend soll überprüft werden, ob in den Wasserwerken die im Abschnitt 6.2.1. zusammengefaßten Voraussetzungen für die ein-dimensionale stationäre Betrachtungsweise vorliegen.

1. Die Existenz quasistationärer Grabenströmung wird durch die Untersuchungen zur Repräsentanz der verwendeten Grundwasserstichtagsmessungen unter Pkt. 6.2.2.2. belegt.

2. Alle Brunnenreihen verlaufen in einem Uferabstand von 84 - 105 m parallel zur Elbe, so daß in Anbetracht der geringen Abstände der Brunnen untereinander von 10 - 27 m und der Lage der Untersuchungsprofile im Zentrum langgestreckter Fassunggalerien Parallelströmung zwischen dem Ufer und den Brunnen besteht, die senkrecht an die Gewässerberandung anschließt. Die Brunnen sind bis zur Grundwassersohle verteuft.
3. Die homogenen hydrogeologischen Verhältnisse in Ufernähe gestatten die Approximation einer konstanten Durchlässigkeit k_f und einer horizontalen Grundwassersohle in der Stromröhre.
4. Ufernahe Meßstellen haben einen Flußabstand von mindestens 10 m, so daß hier nach dem von ZIPFEL /65/ gefundenen Kriterium $L' \cong M$ Parallelströmung im Vertikalprofil existiert. Ein gekrümmter Stromlinienverlauf im Vertikalschnitt ist nur bis in eine Entfernung von L' über den Gewässerrand hinaus zu erwarten.

6.2.2.2. Repräsentanz der Ausgangsdaten der Berechnung

Sämtliche Grundwasserspiegelmessungen wurden auf ihre Brauchbarkeit für die Berechnung der Kolmationskoeffizienten überprüft und unter dem Aspekt der Vorgabe ungestörter Daten bereinigt. Meßwerte, die durch stark wechselnde Flußwasserstände sowie sich hebende oder sinkende Grundwasserstände im Hinterland beeinflusst sind, wurden eliminiert.

Die Ausgangsdaten für die Berechnung beruhen:

1. Auf der Auswahl der Meßwerte nach folgenden Kriterien:
 - 1.1. Kontrolle der Stichtagsmessungen der Grundwasserstände mit der Elbpegelganglinie. Für die weitere Verwendung wurden nur Terminwerte zugelassen, bei denen der Flußwasserstand mindestens 3 - 5 Tage vor dem Stichtag quasi-konstant war (zulässige Schwankungen < 15 cm). Diese Festlegung basiert auf einer im Wasserwerk II gemessenen zeitlichen Phasenverschiebung zwischen Fluß- und Brunnenwasserstand von 1 - 2 Tagen. Spiegelschwankungen der Elbe werden danach fast ohne zeitliche Verzögerung im 100 m breiten Ufergrundwasserleiter reflektiert.

- 1.2. Grafische Überprüfung des Absenkverlaufes im Strömungsprofil. Darstellung der Depressionskurve zwischen Elbe und Brunnen unter Verwendung der Potentiale aller im Profil vorhandenen Meßstellen für jeden Meßtermin. Vergleich ihres Verlaufes mit einer für quasistationäre Verhältnisse repräsentativen Kurve und Aussonderung von Terminwerten, bei denen prägnante instationäre Effekte sichtbar sind, z. B. "Grundwasserwellen" nach einem Hochwasser. (Ablage der Absenkungskurven in den Archivunterlagen.)
2. Auf dem Repräsentanznachweis der Ausgangsdaten durch eine hinreichend gute Korrelation aller nach obigem Pkt. 1 ausgewählten Terminwerte der ufernahen und -fernen Meßstellen. Bewertungsgröße für die Güte der Ausgangsdaten ist der lineare Korrelationskoeffizient r .

Tabelle 7: Zusammenhang der Grundwasserstände ufernaher und uferferner Grundwasserbeobachtungsrohre

Wasserwerk	Profil Nr.	ufernahes GWBR Nr.	uferfernes GWBR Nr.	Terminwerte Anzahl	Korrelationskoeff. r ufernah./uferfern. GWBR
Werk I	1	104	106	83	0,997
		104	105	42	0,996
Werk II	1	25	23	127	0,965
		24	23	40	0,958
		25	21a	16	0,978
Werk II	2	28	27	142	0,987
		4	1	99	0,982
		1	3	9	0,981

Mit einem mittleren Korrelationskoeffizienten aller 558 Terminwerte von $r = 0,98$ besteht ein straffer Zusammenhang der ufernahen und -fernen Grundwassermeßdaten. Sie sind damit für die Berechnung der Kolmationsparameter repräsentativ. Im Koeffizienten $r = 0,96 - > 0,99$ kommt auch das Vorhandensein quasistationärer Grundwasserdynamik zum Ausdruck.

Die Kontrolle einer konstanten Förderleistung vor den Stich-tagsmessungen ist wegen des Fehlens der Tagesfördermengen der Einzelbrunnen nicht möglich. Der gute korrelative Zusammenhang der Wasserstände o. g. GWBR schließt jedoch Einflüsse durch kurzfristig schwankende Förderungen aus.

Im Rahmen der Repräsentanzbetrachtung soll auch der Einfluß der wechselnden Temperaturen des Uferfiltrates auf die Größe des Kolmationswiderstandes bewertet werden. Bekanntermaßen ändert sich mit der Temperatur des Wassers seine kinematische Zähigkeit, womit ein temperaturabhängiges Fließverhalten im Grundwasserleiter verursacht ist. Der k_f -Wert ist proportional der Temperatur des Fluids. Das bedeutet, daß bei konstantem Durchfluß die Grundwasserstände mit abnehmender Temperatur absinken, mit zunehmender Temperatur ansteigen. Folglich sind in den in situ gemessenen Winter- und Sommerwasserständen gegenüber einem Verhalten bei 10°C äquivalente Zusatzabsenkungen bzw. -anstiege enthalten. Mit Testrechnungen wurde deren Einfluß auf den Kolmationskoeffizienten überprüft. Als Ergebnis ist zu konstatieren, daß die Auswirkungen jahreszeitlich wechselnder Wassertemperaturen auf die Größe des ΔL_2 -Wertes mit $< \pm 5\%$ - bezogen auf eine Jahresmitteltemperatur von 10°C - so gering sind, daß sie bei der Erforschung des Selbstdichtungsvorganges vernachlässigt werden können. Zu einem analogen Resultat kommen BEYER/BANSCHER /9/.

Da beim Durchströmen des porösen Mediums in Abhängigkeit von der Länge des Fließweges auch ein Wärmeaustausch stattfindet, treten theoretisch im ufernahen und -fernen GWBR unterschiedlich starke Temperaturwirkungen auf. Praktisch sind diese infolge minimaler Dämpfungseffekte von $2 - 3,5^\circ \text{C}$ (LUCKNER u.a. /46/) auf einem Fließweg von 20 - 80 m aber vollkommen unbedeutend, so daß dadurch die Plausibilität der verwendeten Grundwasserstände nicht beeinträchtigt ist.

6.2.2.3. Berechnungsergebnisse

Insgesamt werden 558 Einzelwerte des Kolmationskoeffizienten berechnet. Ihre wasserwerks- und profilbezogene empirische Verteilung wird durch Häufigkeits- und Wahrscheinlichkeitsverteilungen angegeben. Aus letzteren wird de facto die Über- bzw. Unterschreitungswahrscheinlichkeit des w -Wortes erkennbar.

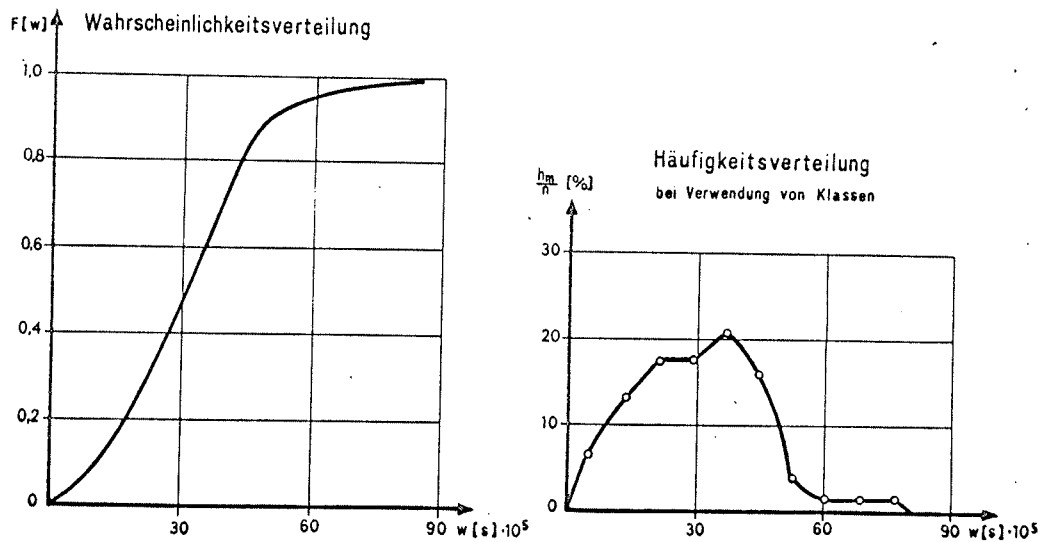


Bild 26: Empirische Verteilung der Kolmationskoeffizienten im Wasserwerk I

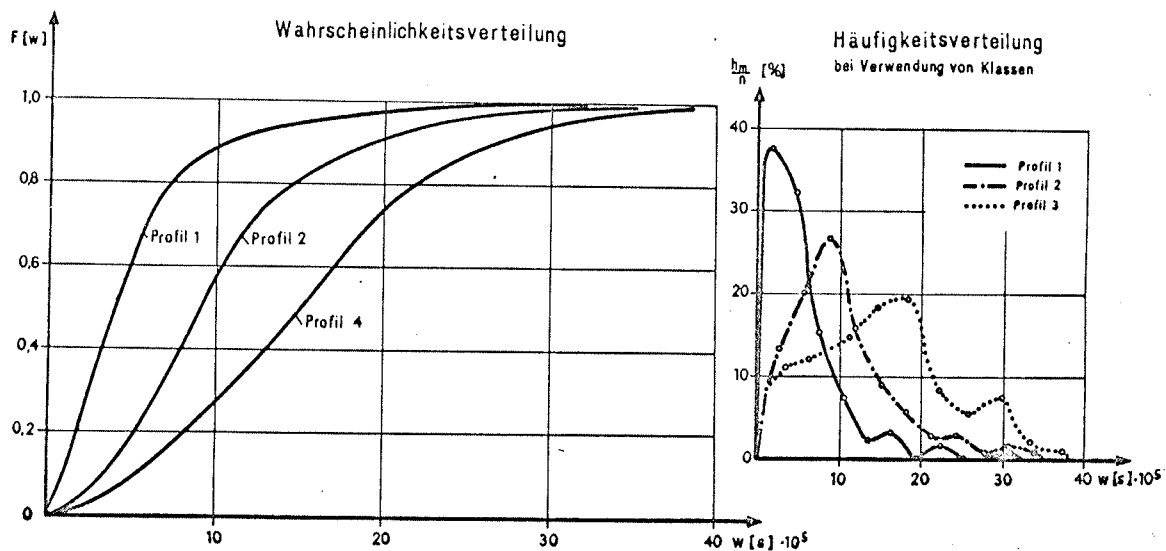


Bild 27: Empirische Verteilung der Kolmationskoeffizienten im Wasserwerk II

Die Häufigkeitsverteilungen enthalten generell eine linksseitige Asymmetrie, wobei die Profile 1 und 2 im Werk II mit einem Schiefheitsmaß nach JOHANNSSON von $C_s = 1,23 - 2,33$ eine erhebliche bis sehr starke Linksschiefe besitzen. Hier sind die Kolmationswerte logarithmisch normalverteilt. Im Profil 1 des Werkes I und Profil 4, Werk II, ist diese dagegen nur in geringem Maße vorhanden ($C_s = 0,49 - 0,56$); es besteht in guter Näherung Normalverteilung. Die Mehr-
gipfligkeit weist bereits darauf hin, daß die Selbstdichtung nicht auf einen einheitlichen Ursachenkomplex, sondern auf mehrere Einzelursachen zurückzuführen ist. Das wird mit der Analyse des Langzeitverhaltens der Kolmation und den Untersuchungen zu den Bildungsbedingungen in Abschnitt 6.4. und 6.5. bestätigt.

Die statistischen Maßzahlen, die die empirische Verteilung der w-Werte charakterisieren, sind in Tabelle 8 zusammengestellt.

Tabelle 8: Statistische Maßzahlen der Kolmationskoeffizienten

Wasserwerk	Profil	Anzahl d.w-Werte	Variationsbreite	Mittelwert arithm.	Zentralwert	Varianz	Standardabw.	Variationskoeff.	Schiefheitsmaß (JOHANNSSON)
	Nr.	n	d [s]·10 ⁵	\bar{w} [s]·10 ⁵	\tilde{w} [s]·10 ⁵	s ² [s]·10 ¹⁰	s [s]·10 ⁵	v [%]	c _s
Werk I	1	125	80,6	31,03	30,10	242,11	15,56	50	0,56
Werk II	1	183	32,1	5,11	4,00	20,95	4,58	90	2,33
	2	142	34,5	10,28	7,15	40,62	6,37	62	1,23
	4	108	37,4	15,44	21,80	63,79	7,99	52	0,49

Ergänzend wird der Kolmationswiderstand für das durch Uferfiltration unbelastete Strombett der Elbe berechnet: $w = 7,5 \cdot 10^3 \text{ s}$.