

6.3. Kolmationszustand vor Uferfiltratwasserwerken

Vor den untersuchten Wasserwerken ist die Flußsohle durch innere Kolmation verdichtet. Vergleicht man den Koeffizienten des unbelasteten Elbbettes $w = 7,5 \cdot 10^3 s$ mit den durch die Uferfiltration bewirkten Widerstandswerten in Tabelle 9, so wird der Effekt der ufernahen Wassergewinnung augenfällig:

- am Werk I durch eine Verdichtung des Strombettes um das 400fache,
- am Werk II durch eine Verdichtung des Strombettes um das 70 - 200fache.

Tabelle 9: Kolmationswerte des Elbbettes vor Uferfiltratwasserwerken

Wasserwerk	Profil Nr.	Untersuchungszeitraum	Kolmationskoeffizient		
			\bar{w} [s] · 10 ⁵	w_{max} [s] · 10 ⁵	w_{min} [s] · 10 ⁵
Werk I	1	1919-1965	31,0	81,5	0,9
Werk II	1	1919-1979	5,1	32,2	0,1
	2	1913-1978	10,3	35,2	0,7
	4	1914-1963	15,4	38,7	1,3

6.4. Zeitliche Entwicklung der Kolmation

Das Ziel der nachfolgenden Untersuchungen besteht in der Bestimmung des empirischen Gesetzes der Veränderlichkeit der Kolmation in der Zeit, wobei in dieser Abhängigkeit eine komplexe Erfassung des Einflusses von Bildungsbedingungen in Verbindung mit der Intensität der Infiltration enthalten ist.

Von besonderer Bedeutung ist die Klärung der Frage, ob die Kolmation in unseren Flüssen einen quasistabilen Endzustand erreicht, von dessen Existenz die Empfehlungen des WAPRO 1.52 /68/ ausgehen (Abschnitt 2.2.).

6.4.1. Langjährige Entwicklung

Die zeitlichen Abläufe werden auf der Grundlage der Jahresmittelwerte des w-Wertes und folgender grafischer Darstellungen ausgewertet:

- Zeitgeraffte Abbildung der Jahresmittelwerte durch Kurven im doppellogarithmischen System, die Auskunft über die zeitlichen Schwankungsbreiten gibt.
- Zusammenfassung der Jahresmittelwerte in einer Wertereihe, wobei mitunter "nicht fortlaufende Zeitabschnitte" unvermeidbar sind, da nicht jedes Jahr mit einem w-Wert belegt ist. Unter der Wertereihe ist dann die zeitliche Aneinanderreihung der Mittelwerte \bar{w} aller Jahre zu verstehen, für die Kolmationsaussagen vorliegen. Um die Zufälligkeit der Jahreswerte weitgehend zu egalisieren, wird eine Glättung der Wertereihe durch schrittweise Ausgleichung auf der Grundlage einer gleitenden Durchschnittsbildung vorgenommen. Die ausgeglichene Kurve veranschaulicht die Grundtendenzen der Entwicklung.
- Darstellung der relativen Veränderung der Jahresmittelwerte von Jahr zu Jahr durch Bildung einfacher Indexzahlen mit fester und variabler Basis, die einen tieferen Einblick in den Entwicklungsablauf gestatten. Die Indexzahlen mit fester Basis geben Auskunft über die Veränderungen gegenüber einem Basisjahr, die mit variabler Basis gegenüber dem jeweils vorangegangenen Jahr.

Die Kurven repräsentieren einen Betriebszeitraum der Uferfiltration von 35 - 65 Jahren. Ihre Auswertung offenbart nachstehendes Entwicklungsbild:

Im Wasserwerk I wird die Kolmation durch ein erhebliches und ständiges zeitliches Schwankungsverhalten geprägt. Markant ist das Kolmationsminimum im Jahr 1941 und das -maximum im Jahr 1964 (Bild 28). Auch die Reihe der Jahresmittelwerte 1930/65 im Bild 30 orientiert mit ihrem parabolischen Verlauf auf die

Jahre 1939 - 1942, in denen die Häufung von 18 Hochwasserereignissen einen absoluten Kolmationstiefstand erzwingt. Ab 1959 zeigt sich mit der Konzentrierung von 4 Niedrigwasserperioden auf die Jahre 1959 - 1964 dann ein Aufwärtstrend, der erst mit dem Hochwasser 1965 wieder abbricht. Es wird in diesem Zusammenhang auf die in Abschnitt 6.5. und 6.6. nachgewiesene Abhängigkeit der Selbstdichtung von den fluviatilen Bildungsbedingungen verwiesen. Ein genereller Trend im Sinne eines tendenziellen Grundverlaufes ist aus den Zeitkurven nicht ableitbar. Das ist besonders aus der Veränderung der Jahresmittelwerte gegenüber dem Basisjahr 1930 im Bild 33 zu erkennen. Bereits 12 Jahre nach Betriebsbeginn liegt im Werk I der mittlere Jahreswert mit $w = 36,2 \cdot 10^5$ über dem Mittelwert der fast 50jährigen Beobachtungsreihe.

Im Wasserwerk II wird aus den Kurven der Profile 1 und 2 Anfang der 60er Jahre ein Entwicklungssprung sichtbar, der mit einer bedeutenden Verstärkung der Kolmation verbunden ist. Dieser Effekt geht anschaulich aus Bild 31 hervor. Die Ursachen werden im Abschnitt 6.5.2. auf die Modifizierung der lokalen Bildungsbedingungen zurückgeführt. Das Zeitverhalten der Selbstdichtung ist hier für die Jahre vor und nach 1960 getrennt zu bewerten. Unter diesem Aspekt ist ein permanent positiver Entwicklungstrend ebenfalls nicht zu konstatieren. Das trifft gleichermaßen auch für Profil 4 zu (Bild 29). Auffällig sind die Unterschiede im Verdichtungsgrad beider Wasserwerke, die sich aus den Mittelwerten \bar{w} der Tabelle 8 ergeben. Die unterschiedlichen Infiltrationsraten rechtfertigen diese Differenzen nicht, sie weisen vielmehr auf voneinander abweichende "Bildungsebenen" der Gewässerbettverdichtung hin.

Die Untersuchungen zeigen, daß sich die Langzeitreaktionen durch einen ständigen kurzfristigen Wechsel des Verdichtungsgrades auszeichnen. Nicht selten weichen die w -Werte aufeinanderfolgender Jahre bis zu einer Zehnerpotenz voneinander ab (Variationskoeffizient aller identifizierten w -Werte

$v = 50 - 90 \%$ - Tabelle 8). Von Streuungen gleicher Größenordnung berichtet auch GELDNER /24/, der dreijährige Messungen am Rhein auswertete. Die Zeitkurve der Monatswerte in Bild 35 macht zudem die Kurzfristigkeit der Veränderungen offenkundig (vgl. Abschnitt 6.4.2.).

Das Entwicklungsbild ist damit als eine Folge von Auf- und Abbauphasen, die einen Mittelwert überlagern, zu erklären. Vorübergehende Tendenzen ergeben sich aus der kurzzeitigen Priorität bestimmter Auf- und Abbaueinflüsse. Eine zeitliche Variabilität in Form regelmäßig wiederkehrender periodischer Schwankungen geht aus den Veränderungen nicht hervor. Diese rühren vielmehr von unregelmäßigen Schwankungen her, die Ausdruck bestimmter Umstände sind, die in den folgenden Abschnitten 6.5. und 6.6. aufgeklärt werden.

Dauerhafte irreversible Verdichtungen der Flußsohle erfolgen nicht. Entgegen der bisher verbreiteten Meinung strebt die Selbstdichtung keinem Grenzwert zu. Ein quasistabiler Endzustand der inneren Kolmation entsteht nicht.

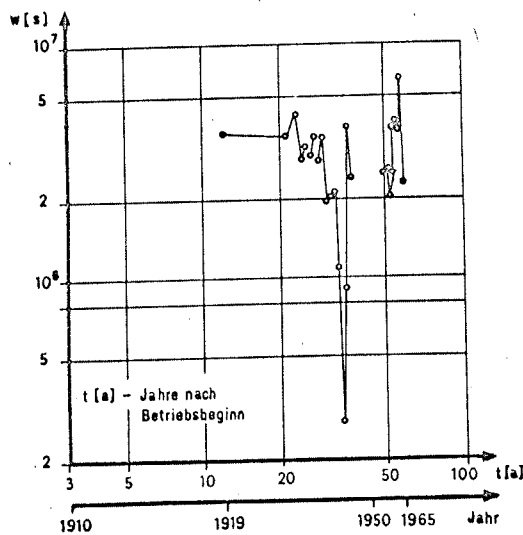


Bild 28: Zeitliche Entwicklung der Jahresmittelwerte des Kolmationskoeffizienten im Wasserwerk I

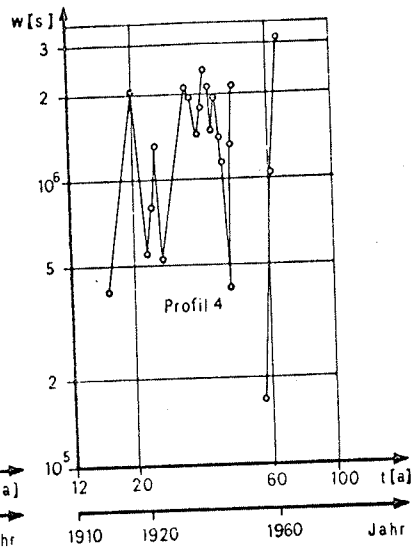
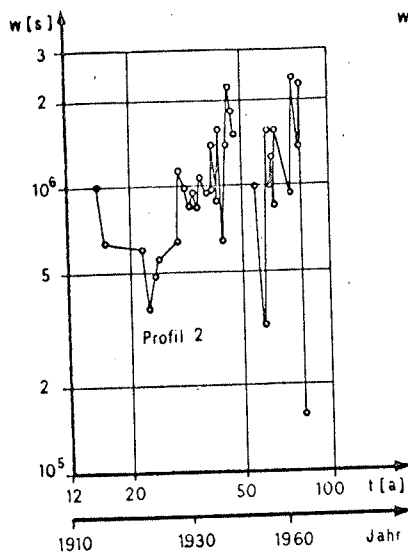
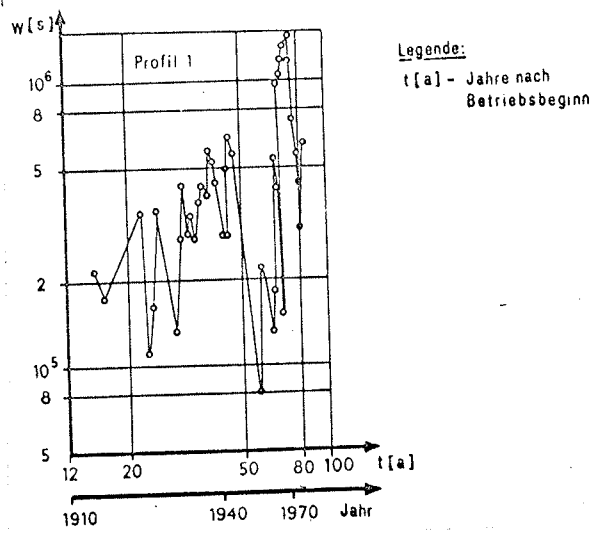


Bild 29: Zeitliche Entwicklung der Jahresmittelwerte des Kolmationskoeffizienten im Wasserwerk II

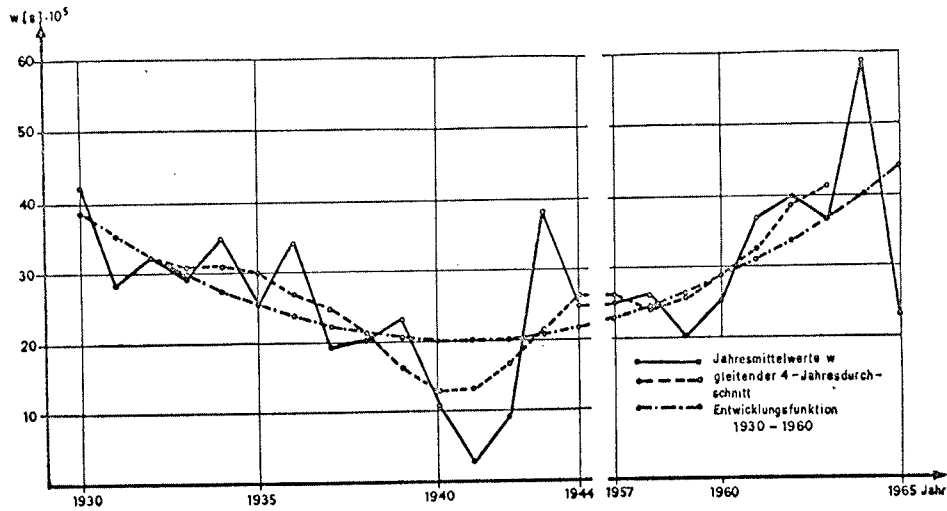


Bild 30: Zeitreihe der Jahresmittelwerte des Kolmationskoeffizienten im Wasserwerk I

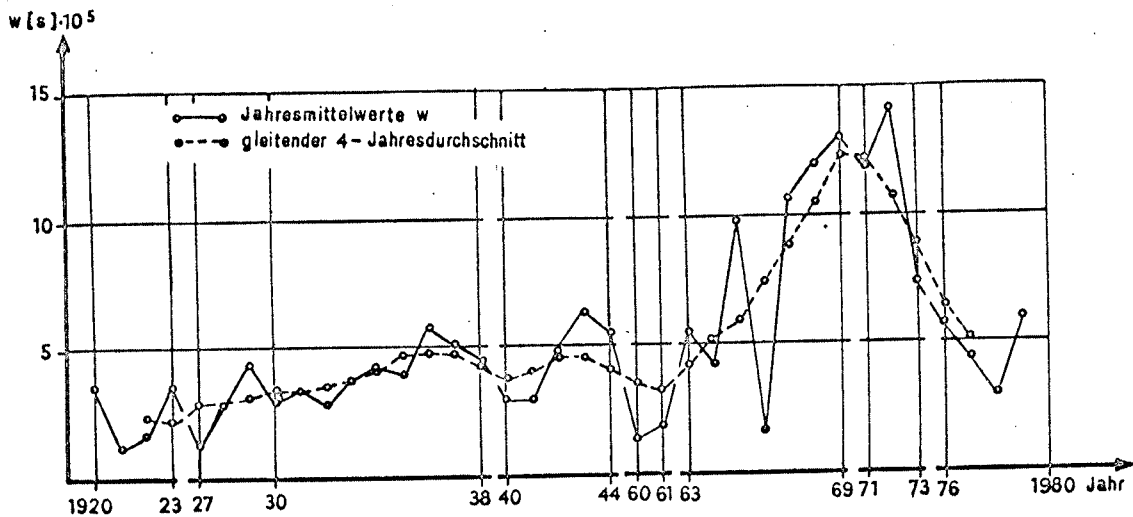


Bild 31: Zeitreihe der Jahresmittelwerte des Kolmationskoeffizienten im Wasserwerk II (Profil 1)

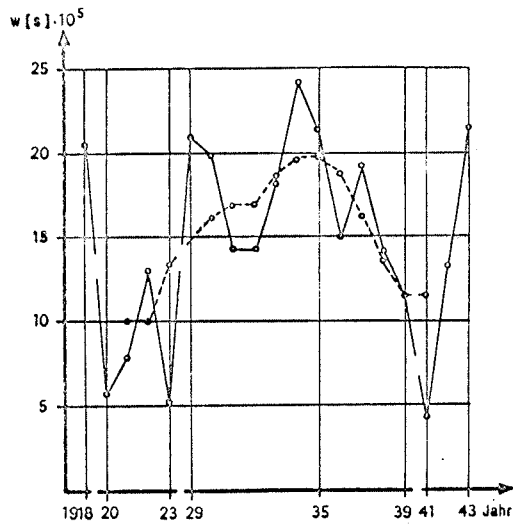


Bild 32: Zeitreihe der Jahresmittelwerte des Kolmationskoeffizienten im Wasserwerk II (Profil 4)

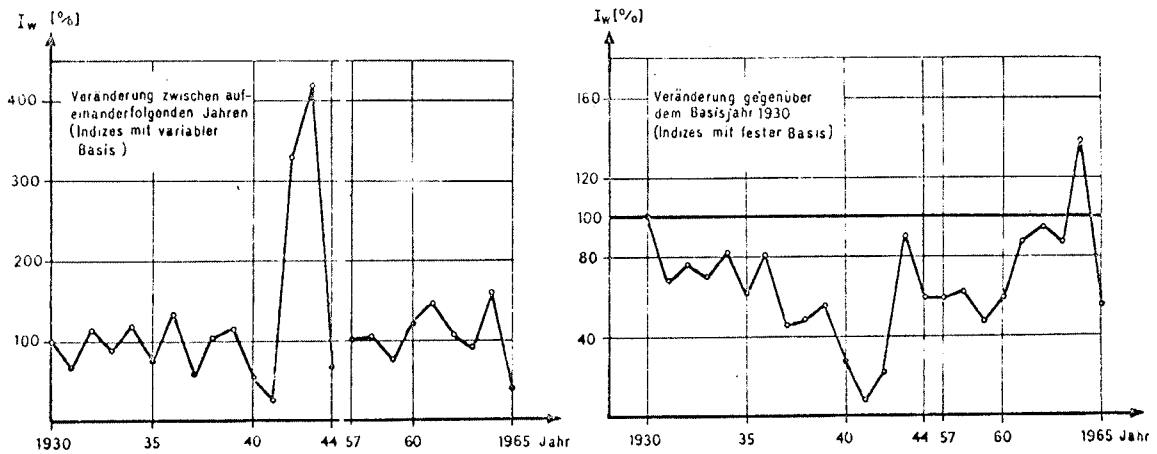


Bild 33: Relative Veränderung des Jahresmittelwertes des Kolmationskoeffizienten innerhalb seiner lang-jährigen Entwicklung im Wasserwerk I

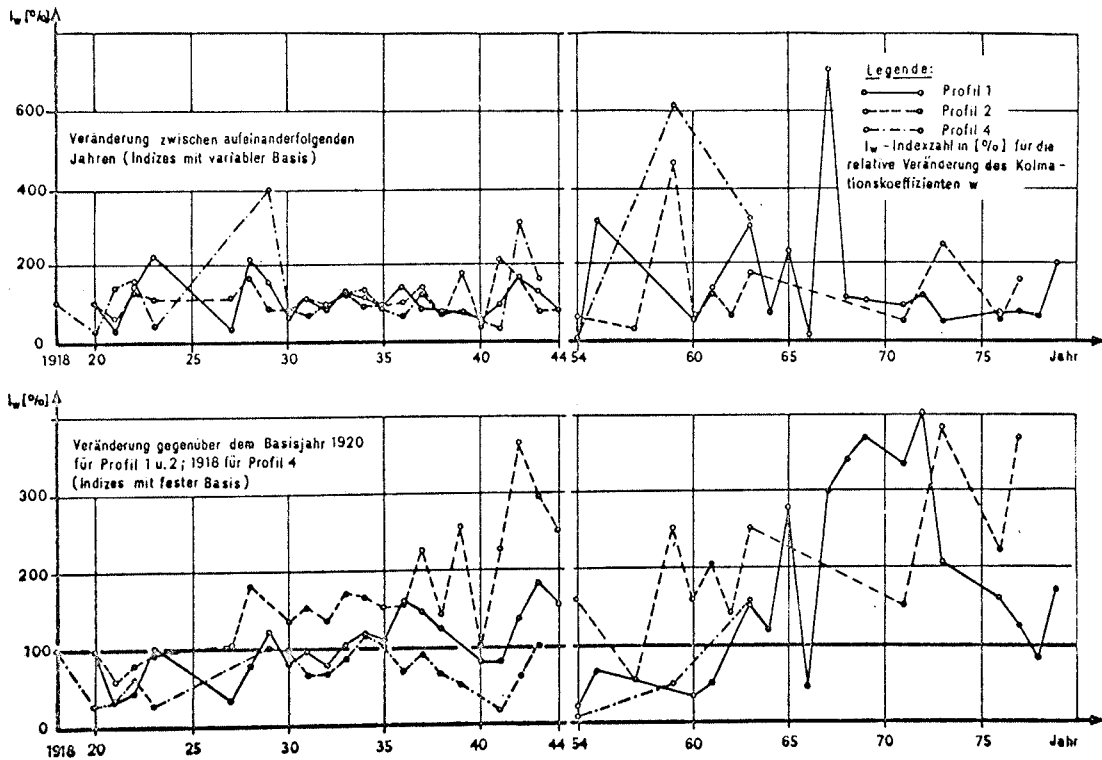


Bild 34: Relative Veränderung des Jahresmittelwertes des Kolmationskoeffizienten innerhalb seiner langjährigen Entwicklung im Wasserwerk II

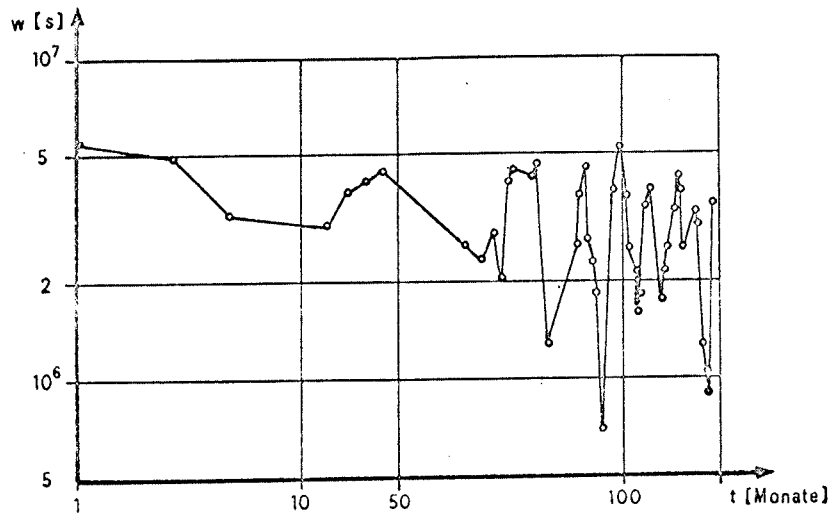


Bild 35: Zeitliche Entwicklung der Monatswerte des Kolmationskoeffizienten in den Jahren 1930 - 1937 im Wasserwerk I

Die Beurteilung der Kolmationsentwicklung in den ersten Monaten und Jahren nach Inbetriebnahme einer Uferfiltratfassung stößt auf Schwierigkeiten, da detaillierte Meßdaten nicht zur Verfügung stehen. Die frühesten Werte entstammen dem 12. (Werk I) bzw. 15./16. Betriebsjahr (Werk II), in dem gemäß Tabelle 10 die Selbstdichtung bereits dem langjährigen Mittelwert entspricht. Allerdings liegen Meßdaten für den Kolmationsaufbau nach Wiederaufnahme der Förderung nach einer längeren Betriebsunterbrechung vor (Tabelle 11), die die bereits hervorgehobene Kurzfristigkeit dieses Vorganges nochmals unterstreichen. Analoges ist aus den Indizes mit variabler Basis erkennbar, nach denen beispielsweise am Profil 1 des Wasserwerkes I im Jahr 1967 eine schnelle und starke Zunahme der Verdichtung nach neunmonatigem Betriebsstillstand erfolgt (Bild 34).

Tabelle 10: Jahresmittelwerte des Kolmationskoeffizienten aus den frühen Betriebsjahren

Wasserwerk	Profil Nr.	Kolmationskoeff. d. ersten Betriebsjahre		Mittl. Kolmationskoeff. der langjährigen Reihe	
		Jahr	w [s]·10 ⁵	Jahresreihe	w [s]·10 ⁵
Werk I	1	1919	36,2	1919-1965	31
Werk II	1 2	1913 1913	2,2 10,1	1913-1944 1913-1944	3,7 x) 9,5 x)

x) Anmerkung: Mittelwert der ersten Entwicklungsetappe vor Einbau der Grundschwellen, vgl. vorstehende Darlegungen zur Langzeitentwicklung im Wasserwerk II.

Tabelle 11: Kolmationskoeffizienten nach Wiederaufnahme des Förderbetriebes im Anschluß an einen längeren Betriebsstillstand

Wasserwerk	Profil Nr.	Förderstillstand Monat / Jahr	Kolmationskoeff. nach Wiedernbetriebnahme		Mittl. Kolmationskoeff. der langjährigen Reihe	
			Monate n. Beginn	w [s]·10 ⁵	Jahresreihe	w [s]·10 ⁵
Werk I	1	8/1948-11/56	8 8-13	45,3 25,2	1919-1965	31
Werk II	1	11/1965- 4/66 7/1966-11/66	10 9-13	11,5 10,6	1960-1979	8 x)

x) Anmerkung: Mittelwert der zweiten Entwicklungsetappe 1960-79 nach Einbau der Grundschwellen, vgl. vorstehende Darlegungen zur Langzeitentwicklung im Wasserwerk II.

Ausgehend von diesen Gegebenheiten ist zu erwarten, daß ein ähnlich zügiger Kolmationsfortschritt auch nach Inbetriebnahme einer neugebauten Brunnenreihe stattfindet. Dafür sprechen die Parameter aus den Wasserwerken III und IV an der Elbe (Tabelle 12).

Tabelle 12: Kolmationskoeffizient des ersten Betriebsjahres

Wasserwerk	Profil [km]	Betriebs- beginn Monat/Jahr	Kolmationskoeff. n. Betriebsbeginn		Mittl. Kolmationskoeffizient	
			Monate	w [s]·10 ⁵	Jahresreihe	w [s]·10 ⁵
Werk III	182,9- 183,2	8/72	4 12	8,3 10,5	1972/78 1973/78	7,1 6,2
Werk IV	215,9- 219,0	5/77	3	2	1977/78	1,2

In beiden Wasserwerken ist bereits in den ersten Betriebsmonaten im Vergleich zum Mittelwert \bar{w} der ersten Förderjahre eine erhebliche Flußbettverdichtung vorhanden. Wie das Beispiel des Wasserwerkes IV zeigt, entsteht dieser Zustand unter günstigen Bedingungen, wie dem Elbeniedrigwasser im späten Frühjahr 1977, besonders schnell.

Damit kann resümiert werden, daß der Kolmationsprozeß sofort nach Inbetriebnahme einer ufernahen Fassung oder Wiederinbetriebnahme nach längerer Förderunterbrechung einsetzt, so daß innerhalb von 1/2 - 1 Jahr ein den jeweiligen Bildungsbedingungen adäquater Verdichtungsgrad entsteht.

Zusammenfassung der Ergebnisse zur Untersuchung des Langzeitverhaltens:

1. Die langjährige Entwicklung der Selbstdichtung läuft als eine Folge von Auf- und Abbauphasen ab, die einen Mittelwert überlagern.
2. Starke Schwankungsanteile des Kolmationskoeffizienten als kurzzeitige und große Streuungen um den Mittelwert sind charakteristisch.

3. Dauerhafte, irreversible Verdichtungen der Gewässersohle entstehen nicht. Ein quasistabiler Endzustand als Grenzwert der Entwicklung bildet sich nicht heraus.
4. Die Kolmation der Flußsohle ist ein relativ kurzfristiger Vorgang, der nach wenigen Monaten bis spätestens einem Jahr abgeschlossen ist.

6.4.2. Innerjährlicher und jahreszeitlicher Gang

Wertet man den langjährigen Verlauf monatsbezogen aus (Bild 35), dann zeigt sich ein innerjährlicher Gang der Kolmation, der mit seinem Schwankungsverhalten der Charakteristik des langzeitigen Ablaufes entspricht. Veränderungen der Größe des Infiltrationswiderstandes treten innerhalb weniger Wochen ein.

Unter jahreszeitlichem Aspekt offenbart sich eine periodische Variabilität (Bild 34). Der mittlere w -Wert des Winterhalbjahres (November - April) ist um 25 - 45 % größer als der des Sommerhalbjahres (Mai - Oktober), trotzdem in den Wintermonaten doppelt so viele kolmationshemmende Hochwasserereignisse als in den Sommermonaten und im Sommerhalbjahr fast doppelt so viele kolmationsfördernde Niedrigwassermonate als im Winterhalbjahr vorkommen (Tabelle 13). Über die gleichen Erscheinungen berichten auch KONTUR /42/ und GELDNER /24/ - Veränderungen des Dichtungsgrades in der Donau und im Rhein - sowie SOSINSKIJ, USAKOW, SABALIN /61/ und BEYER/BANSCHER /9/.

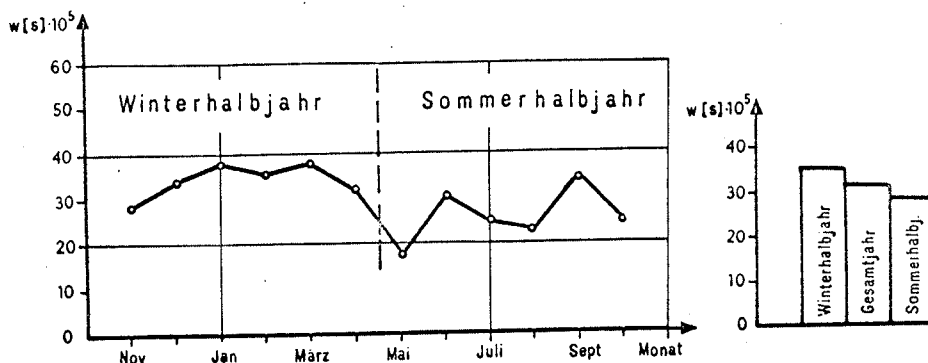


Bild 36: Innerjährlicher Gang des Kolmationskoeffizienten im Werk I - Ganglinie der mittleren Monatswerte und jahreszeitlich orientierter Mittelwerte

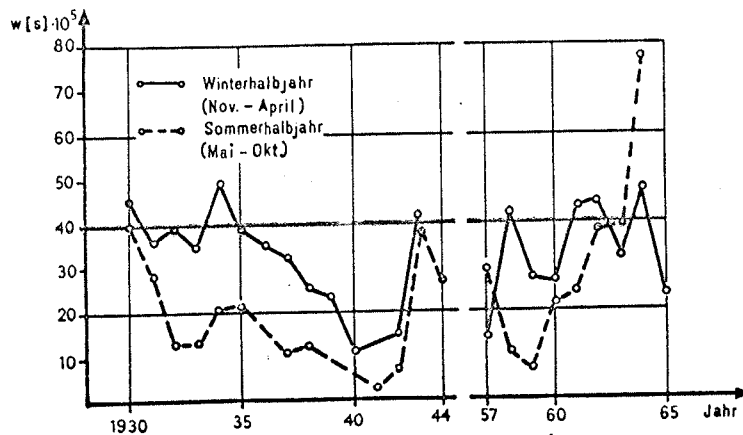


Bild 37: Ganglinie der Mittelwerte des Kolmationskoeffizienten des Sommer- und Winterhalbjahres im Wasserwerk I

Tabelle 13: Mittlerer Kolmationskoeffizient des Sommer- und Winterhalbjahres

Wasserwerk	Profil Nr.	Zeitraum	Mittelwert Kolmationskoeffizient					
			Gesamtjahr \bar{w} [s] · 10 ⁵	Sommerhalbjahr \bar{w} [s] · 10 ⁵	Relation zum Gesamtjahr [%]	Winterhalbjahr \bar{w} [s] · 10 ⁵	Relation zum Gesamtjahr [%]	Relation zum Sommerhalb. [%]
Werk I	1	1919-65	31	27,9	90	34,9	112,6	125
Werk II	1	1913-79	5,1	4,2	82,3	6,1	119,6	145
	2	1913-78	10,3	8,7	84,5	11,7	113,6	134
	4	1914-63	15,4	14,1	91,6	18,5	120,1	131

Der jahreszeitliche Rhythmus wird besonders deutlich bei Einbeziehung des Zeitfaktors in die Auswertung (Bild 37). Der Wechsel der Sommer- und Winterkoeffizienten macht sich jetzt in regelmäßig wiederkehrenden periodischen Schwankungen bemerkbar, deren Ursachen in Faktoren zu suchen sind, die mit periodisch wiederkehrender Intensität auf den Bildungsprozeß einwirken.

Eigene Untersuchungen zur Klärung dieses Phänomens wurden nur insofern durchgeführt, daß eine vordergründige Abhängigkeit von jahreszeitlichen Unterschieden der Infiltrationsrate und der Hoch- und Niedrigwassereinflüsse ausgeschlossen werden kann. Um die eventuellen Ursachen aufzuhellen, muß auf die Fachliteratur

tur zurückgegriffen werden. So berichten BEYER/BANSCHER /9/ über eine Vielzahl von Würmern besonders in der oberen Kolmationsschicht, die nach der Entnahme von Probezylindern aus dem Elbbett festgestellt wurden und den Infiltrationswiderstand verminderten. In den Wintermonaten wird der hohe Selbstdichtungsgrad auf das Absterben eines Teiles der Organismen zurückgeführt. Den jahreszeitlichen Temperaturschwankungen wird nur eine sehr geringe Bedeutung beigemessen; eigene Testrechnungen führen zu dem gleichen Ergebnis (Abschnitt 6.2.2.). BANSCHER /5/ begründet den Rückgang im Sommerhalbjahr mit jahreszeitlich bedingten biologischen und biochemischen Vorgängen in der Kolmationsschicht: Tätigkeit von tierischen Kleinorganismen, besonders von Metazoen (Nutzung des Kolmationsmaterials als Nahrung, Freilegung kolmatierter Porenkanäle); temperaturbedingte Gasausscheidungen bei Stoffumwandlungsprozessen. Auch GELDNER /24/ und VAN RIESEN /58/ heben als Ursache beträchtlicher Auflockerungen die Gasentwicklung, besonders die Sauerstoffproduktion der Algen, die sehr häufig im obersten Filterbereich anzutreffen sind, hervor. Nicht zuletzt verdient auch der erhöhte Schiffsverkehr im Sommerhalbjahr mit seinem Abtragungseffekt Beachtung (vgl. Abschnitt 3.3.2.).

Zusammenfassend ist festzustellen:

1. Die Kolmation unterliegt einem jahreszeitlichen Gang. Der Verdichtungsgrad des Winterhalbjahres ist größer als der des Sommerhalbjahres.
2. Als Ursachen des jahreszeitlichen Rhythmus werden in der Literatur biologische und biochemische Vorgänge in der Kolmationsschicht angegeben.

6.5. Bildungsbedingungen der Kolmation

Im folgenden sollen die Ursachen der in Abschnitt 6.4. nachgewiesenen ständigen Veränderlichkeit der Kolmation erforscht werden. Einerseits weist ihre zeitliche Variabilität auf das Bestehen zeitabhängiger Bildungsbedingungen hin. Andererseits findet der Dichtungsvorgang auf örtlich unterschiedlich hohem Niveau statt, was auf ortsabhängige Bildungsbedingungen schließen

läßt. Unter den Bildungsbedingungen sind damit die Voraussetzungen zu verstehen, unter denen die Kolmationsfaktoren im Fluß wirksam werden. Für die Gewinnung von Uferfiltrat ist ihre Kenntnis, vor allem aber die Kenntnis darüber, mit welcher Intensität die Kolmationsfaktoren zur Geltung kommen, von besonderem Interesse, da nur auf dieser Grundlage Prognosen zur Gewässerbettverdichtung möglich sind. Entsprechende Untersuchungen werden in Abschnitt 6.6. durchgeführt.

6.5.1. Zeitliche Bildungsbedingungen

Analysiert man die Zeitkurven des Kolmationswiderstandes für den Zeitraum 1913 - 1979 in Verbindung mit denen der Uferfiltratförderung und Elbwasserstände, so lassen sich die Ursachen des zeitlichen Schwankungsverhaltens erkennen. Auf Grund der Kurzfristigkeit der Vorgänge wird von Monatsmittelwerten ausgegangen. Großformatige Zeitdiagramme, in die die w -Werte, Uferfiltratmengen, Elbwasserstände sowie sämtliche Hochwasserspitzen eingetragen sind, liegen beim Bearbeiter zur Einsichtnahme vor.

Ergebnisse der Auswertung:

Die Streuungen im zeitlichen Verlauf der Kolmation sind auf Durchflußschwankungen in der Elbe und auf die damit verbundenen Einwirkungen - Akkumulation bzw. Suffosion von Kolmationsmasse - zurückzuführen. Allerdings besteht zwischen dem Flußwasserstand bzw. dem Durchfluß i. a. und der Selbstdichtung kein korrelativer Zusammenhang. Das geht aus einer Regressions- und Korrelationsanalyse zur Überprüfung der stochastischen Abhängigkeit des w -Wertes vom Flußwasserstand hervor. Wie schon VAN RIESEN /58/ feststellte, wird die Gewässerbettverdichtung nicht durch irgendeinen Durchfluß, sondern durch das Über- oder Unterschreiten eines kritischen Durchflusses nachhaltig beeinflusst. Hoch- und Niedrigwasser haben zentrale Bedeutung. Im Sinne einer generalisierten Modellvorstellung werden unter den zeitvariablen Bildungsbedingungen die Verhältnisse bei Hoch-, Niedrig- und Mittelwasser verstanden, für die der unterschiedlich starke Einfluß der Schleppspannung im Fluß charakteristisch ist.

Für die Kolmation ist nicht schlechthin die aktuelle Infiltrationsrate, sondern die Wechselwirkung zwischen dieser und der Schlepptension ausschlaggebend. Nach den Taucherbefunden sind Sohlenauswaschungen, die mit einer Auflockerung und einem Ausstrag von Kolmationsmasse verbunden sind (äußere Suffosion nach BUSCH/LUCKNER /14/), hauptsächlich auf die oberen 5 cm des Filters gerichtet, in dem sich aber generell der Dichtungsgrad entscheidet (vgl. Abschn. 3.1.2.). So setzen bei Mittelwasser infolge der relativen Begrenzung der Schlepptension hohe Infiltrationsraten der äußeren Suffosion durch größeren Materialeintrag und Verdichtungseffekt (Infiltrationsgeschwindigkeit!) einen stärkeren Widerstand entgegen, als geringe Raten. Eine Veränderung der Infiltrationsrate führt hier zwangsläufig zu einer Veränderung der Selbstdichtung. Im Kolmationskoeffizienten drückt sich damit ein Gleichgewichtszustand zwischen der Infiltrationsrate und der Schlepptension aus. Dieses Gleichgewicht wird bei Niedrig- und Hochwasser zerstört, indem jetzt durch die Einschränkung bzw. Verstärkung der fluviatilen Strömungskräfte die auf- bzw. abbauenden Vorgänge überwiegen. Im einzelnen sind die zeitlichen Bildungsbedingungen durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

1. Hochwasser:

Hochwasserereignisse bewirken eine Zäsur der Kolmationsentwicklung. Damit verbundene starke Sohlenschlepptensionen führen zu einer erheblichen äußeren Suffosion des Filterskeletts, wodurch die Selbstdichtung innerhalb kurzer Zeit abgemindert wird. Hiermit bestätigt sich eine entsprechende Vermutung von NEMECZEK /51/, der in diesem Zusammenhang den Begriff "Filterwäsche" gebrauchte. Auch längerfristige Betriebsunterbrechungen bzw. Fördereinschränkungen haben den gleichen Effekt. Durch die dabei aktivierten "Selbstreinigungskräfte" im Strombett erfolgt beispielsweise im Wasserwerk II eine mehr als 70 prozentige Reduzierung der Flußbettverdichtung.

2. Mittelwasser:

Das Wechselspiel zwischen Infiltrationsbelastung und Schleppspannung verursacht eine laufende Änderung des Dichtungsgrades. Die Größe des w -Wertes ist der aktuellen Infiltrationsrate q_i proportional.

3. Niedrigwasser:

In Niedrigwasserperioden sind die Schleppspannungen so stark eingeschränkt, daß eine ungehemmte Zunahme der Selbstdichtung stattfinden kann. Gestützt wird dieser Prozeß durch eine relativ hohe Konzentration der im Fluß mitgeführten, insbesondere anthropogenen Wasserinhaltsstoffe. Durch die ständige Akkumulation von Kolmationsmasse erfolgt selbst bei geringer Uferfiltratförderung eine stetig fortschreitende Verdichtung, die von der infiltrierten Wassermenge pro Flächeneinheit des Strombettes $/m^3/m^2/$ abhängt.

Es ergibt sich zusammenfassend:

1. Die zeitliche Variabilität der Selbstdichtung resultiert aus dem Einfluß zeitabhängiger Bildungsbedingungen. Da sich diese im Fluß laufend und schnell ändern, kommt es zu einer ständigen Veränderung der Kolmation. Akkumulations- und Erosionsphasen alternieren.
2. Die zeitlichen Bildungsbedingungen finden ihren Ausdruck
 - in den Niedrig- und Mittelwasserdurchflüssen im Gewässer, bei denen die Infiltrationsrate als wesentliche Bildungsgröße wirksam ist;
 - in den Hochwasserdurchflüssen, bei denen die kolmationshemmenden Faktoren Priorität besitzen.

6.5.2. Örtliche Bildungsbedingungen

Es wird die Kolmationsentwicklung in den Wasserwerken I und II unter dem Aspekt der örtlichen Verhältnisse im Strombett untersucht. Die Arbeiten zielen darauf ab, die Gründe für die vorgefundenen lokalen Abweichungen im Selbstdichtungsverhalten zu ermitteln.

Ergebnisse der Auswertung

Folgende Besonderheiten kennzeichnen den Verdichtungsprozeß:

- Die Kolmation erfolgt in beiden Wasserwerken auf unterschiedlich hohem Niveau (vgl. Abschnitt 6.4.1.).
- Anfang der 60er Jahre vollzieht sich im Werk II ein Entwicklungssprung, der mit einer starken Zunahme des Infiltrationswiderstandes verbunden ist.

Die Ursachen sind in lokalen Einflüssen zu finden, die trotz gleichartiger allgemeiner Entstehungsbedingungen (Abflußregime, Infiltrationsrate, Filterkörper) an verschiedenen Orten voneinander abweichende Flußbettverdichtungen bewirken.

1. Entsprechend dem Elbsohlenlängsschnitt (Bild 23), befindet sich das Wasserwerk II an einem Flußabschnitt, in dem das Strombett durch Tiefenerosion verändert und gegenüber dem Werk I um 1,5 - 2,25 m (!) eingetieft ist. Das Sollsohlengefälle - "Sollsohle" als gedachte Linie nach dem Regulierungswasserstand für die Schifffahrt - rechtfertigt dagegen nur eine Differenz von 0,5 m. Am Wasserwerk I entspricht die Elbsohle der "Sollsohle", außergewöhnliche Erosionserscheinungen bestehen nicht. Aus der Sicht der Gewässerbettverdichtung existiert hier eine stabile, am Werk II eine instabile Flußsohle.

Es zeichnen sich damit lokale "individuelle" Bildungsbedingungen ab, die auf die örtlichen Unterschiede der Flußströmung (Schleppspannung) bei gleichen Durchflüssen zurückzuführen sind und im Sohlengefälle zum Ausdruck kommen. Ihre Bedeutung wird am Kolmationsverhalten des Gebirgsflusses besonders deutlich. So ist z. B. vor einem Wasserwerk an der Bode, für die permanent hohe Schleppspannungen typisch sind - mittleres Fließgefälle etwa 10fach größer als in der Elbe! - das Flußbett nach fast 100jähriger Uferfiltration mit $w = 3,5 \cdot 10^3 - 2,5 \cdot 10^4$ s praktisch noch unkolmatiert.

2. Mit der Errichtung von Grundschwellen auf der Elbsohle (Punkt 6.1.2.1.) wurden die lokalen Bildungsbedingungen im Wasserwerk II modifiziert. Die damit verbundene Gefälleänderung

und Einschränkung des Arbeitsvermögens des Flusses beeinflusst den Kolmationsverlauf nach 1960 nachhaltig:

- Verstärkung der Selbstdichtung, Entwicklung auf höherem Niveau.
- Wandel in der Reflexion der Hoch- und Niedrigwassereinflüsse, der sich in größeren Abbauraten bei Hoch- und in stärkeren Verdichtungen bei Niedrigwasser zeigt.
- Ausgeprägte zeitliche Reaktionen, die in größeren Streuungen der w-Werte ihren Niederschlag finden.

Charakteristisch hierfür sind die Vorgänge am Profil 1 dieses Werkes. Hier, wo vor dem Grundswelleneinbau die geringsten Verdichtungen entstehen, sind mit der Entschärfung der Strömungsangriffe auf die Sohle die stärksten Veränderungen zu verzeichnen (Veränderungsfaktor 2,2; Tabelle 14).

Tabelle 14: Mittelwerte des Kolmationskoeffizienten des Zeitraumes vor (1913 - 1944) und nach (1960 - 1978/79) dem Grundswelleneinbau in der Elbe

Wasserwerk	Profil Nr.	Zeitraum 1913-1944 \bar{w} [s]·10 ⁵	Zeitraum 1960-1978/79 \bar{w} [s]·10 ⁵	Faktor der Veränderung
Werk II	1	3,7	8,2	2,2
	2	9,5	12,7	1,3

Die Abhängigkeit der Selbstdichtung von den örtlichen Gegebenheiten läßt sich wie folgt erklären:

An Standorten mit starkem Flußsohlengefälle wirkt bereits bei Mittelwasser eine starke Schleppspannung, die die Kolmation in der oberen Filterzone auflockert und mitunter völlig ausspült. Das beweisen die Taucherbefunde, nach denen selbst 20 Jahre nach dem Grundswelleneinbau vor dem Wasserwerk II die obersten 5 cm des Gewässerbettes noch kolmationsfrei sind. Wie bereits im Abschnitt 3.1.2. dargelegt, werden die tieferen Filterbereiche ohnehin weniger verdichtet, so daß sich letztlich ein geringerer Infiltrationswiderstand als an Standorten mit kleinem Sohlengefälle herausbildet. Auch die Abbaureaktionen der Hochwässer, deren Wirkungstiefe i. a. begrenzt ist, fallen

gemessen an der absoluten Veränderung der w -Werte schwächer aus, da nur die bereits gering verdichteten oberen Filtersegmente beeinflusst werden.

In Flußabschnitten mit kleinem Sohlgefälle kolmatisiert dagegen bei Mittelwasser das gesamte Filterprofil bis zur Oberfläche (Taucherbefund aus dem Wasserwerk I), was sich in einem größeren Infiltrationswiderstand äußert. Die Hochwässer zeitigen markantere absolute Abbaueffekte, weil jetzt die undurchlässigeren oberen Schichten einer starken Suffosion unterliegen. Bei Niedrigwasser entstehen stärkere Verdichtungen (vgl. Tabelle 15).

Bemerkenswert ist, daß die relativen (prozentualen) Veränderungen bei Niedrigwasser in gefällestarken und -armen Strecken praktisch übereinstimmen. Entsprechend Bild 38 entsteht nur ein verschieden großer Verdichtungsgrad (w_{\max}), der sich aus dem unterschiedlichen Kolmationsniveau, das mit dem langjährigen Mittelwert \bar{w} charakterisiert ist, ergibt. Analoges gilt für die Abbauraten kleinerer Hochwässer bis zu einer Wiederkehrwahrscheinlichkeit von ca. 2 Jahren (vgl. Abschnitt 6.6.1.).

Tabelle 15: Extremwerte des Kolmationskoeffizienten

Wasserwerk	Profil Nr.	Langzeitiger Mittelwert \bar{w} [s]·10 ⁵	Abbaureaktion bei Hochwasserdurchfluß		Aufbaureaktion bei Niedrigwasserdurchfluß	
			Minimalwert w_{\min} [s]·10 ⁵	relat. Abbau w_{\min}/\bar{w} [%]	Maximalwert w_{\max} [s]·10 ⁵	relat. Aufbau w_{\max}/\bar{w} [%]
Werk I	1	31	0,9	3	81,5	262
Werk II	1	5,1	1,4-2,0	27-39	15,9	312
	2	10,3	6,1-6,6	59-64	26,2	254
	4	15,4	3,7	24	38,7	251

Die Ergebnisse können in 3 Punkten zusammengefaßt werden:

1. Örtliche Bildungsbedingungen sind für die spezifischen lokalen Kolmationsreaktionen verantwortlich. Sie sind auf das örtliche Strömungsgefälle zurückzuführen, das an verschiedenen Standorten bei gleichen Durchflüssen unterschiedlich große Schlepptensionen verursacht, wodurch trotz übereinstimmender zeitlicher Bildungsbedingungen verschieden starke Verdichtungen

- entstehen. Selbst entlang einer Uferfiltratfassung können derartige Differenzen auftreten.
- Der wichtigste Einfluß örtlicher Bildungsbedingungen resultiert aus der Auflockerung bzw. Stabilisierung der obersten Schicht des Kolmationsfilters bei Mittelwasser.
- Werden durch anthropogene Eingriffe die örtlichen Bildungsbedingungen verändert (Stauhaltungen, Grundschwellen), so ändert sich auch der Selbstdichtungsgrad.

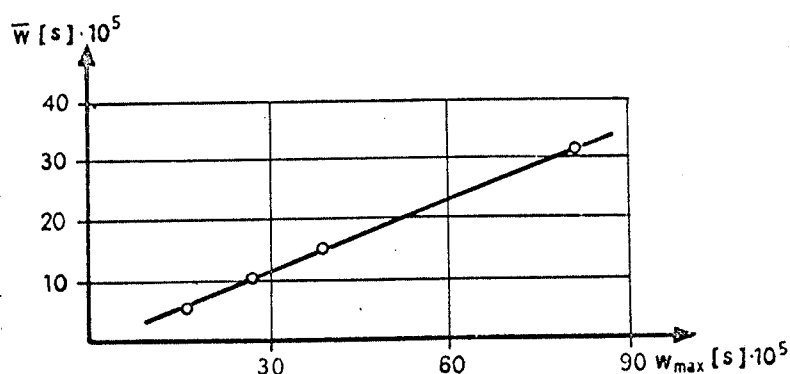


Bild 38: Zusammenhang des maximalen und mittleren Kolmationskoeffizienten in den Wasserwerken I und II

6.6. Einfluß des Abflußregimes im Fluß auf die Kolmation

Von praktischer Bedeutung ist die detaillierte Auswertung und Interpretation der zeitlichen Schwankungen der Kolmation. Unter diesem Aspekt erfolgt in Abschnitt 6.6.1. - 6.6.3. die Untersuchung der Teilvorgänge unter der Bildungsbedingung von Hoch-, Mittel- und Niedrigwasser. Für Mittel- und Niedrigwasserverhältnisse wird die Selbstdichtung als korrelative Beziehung zwischen der Uferfiltratmenge und dem w -Wert erfaßt. Die Transformationsfunktionen, die im verwendeten stochastischen Black-Box-Modell die Uferfiltratbelastung in die Kolmationskoeffizienten transformieren, bilden die Grundlage zur quantitativen Bestimmung der partiellen Infiltrationswiderstände und letztlich für ein Verfahren zur Prognose des w -wertes, welches in Kapitel 8 beschrieben wird.

6.6.1. Kolmationsabbau durch Hochwasser

Abbauvorgang bei Hochwasser

Die Auswertungen basieren auf 43 quantitativ belegten Veränderungen der Selbstdichtung durch Hochwasser (Zeitraum 1922 - 1969). Es werden sämtliche Ereignisse mit einem Wasserstand $\geq 110,36$ m NN entsprechend einem Durchfluß von >1000 m³/s am repräsentativen Elbpegel einbezogen.

In Bild 39 sind die absoluten Veränderungen des w-Wertes dargestellt. Hieraus wird deutlich, daß nach einem Hochwasser grundsätzlich ein geringerer Verdichtungsgrad besteht, als vordem. Der Kolmationsabbau geschieht in wenigen Tagen bis Wochen und selbst bei Erhöhung der Versickerungsrate. Die prozentuale Reduzierung geht aus Tabelle 16 hervor.

Tabelle 16: Relative Veränderung des Kolmationskoeffizienten durch Hochwassereinwirkung $\frac{w_e}{w_a} \cdot 100$ %/

Wasserwerk	Profil Nr.	Anzahl der ausgewerteten Hochwasserereignisse	prozentualer Abbau des w-Wertes		
			Mittel [%]	Maximum [%]	Minimum [%]
Werk I	1	32	54	14	95
Werk II	1	28	47	17	86
	2	19	62	39	91
	4	25	61	37	88

Besonders markant sind die Reaktionen in den Jahren 1939 (Januar) bis 1942 (April), in denen 18 Hochwasserereignissen mit teilweise extremen Durchflüssen - z. B. März 1940 und März/April 1941 mit einem Wiederkehrintervall von 28 bzw. 20 Jahren - eine starke Sohlenausräumung bewirkten. Das führte im Wasserwerk I zu einer Verringerung des w-Wertes um 96 %, was praktisch einer vollkommene Beseitigung der Selbstdichtung gleichkommt ($w = 9 \cdot 10^4$ s im Juli 1942). Ähnliches ist aus dem Wasserwerk II bekannt (Reduzierung um 60 - 70 %).

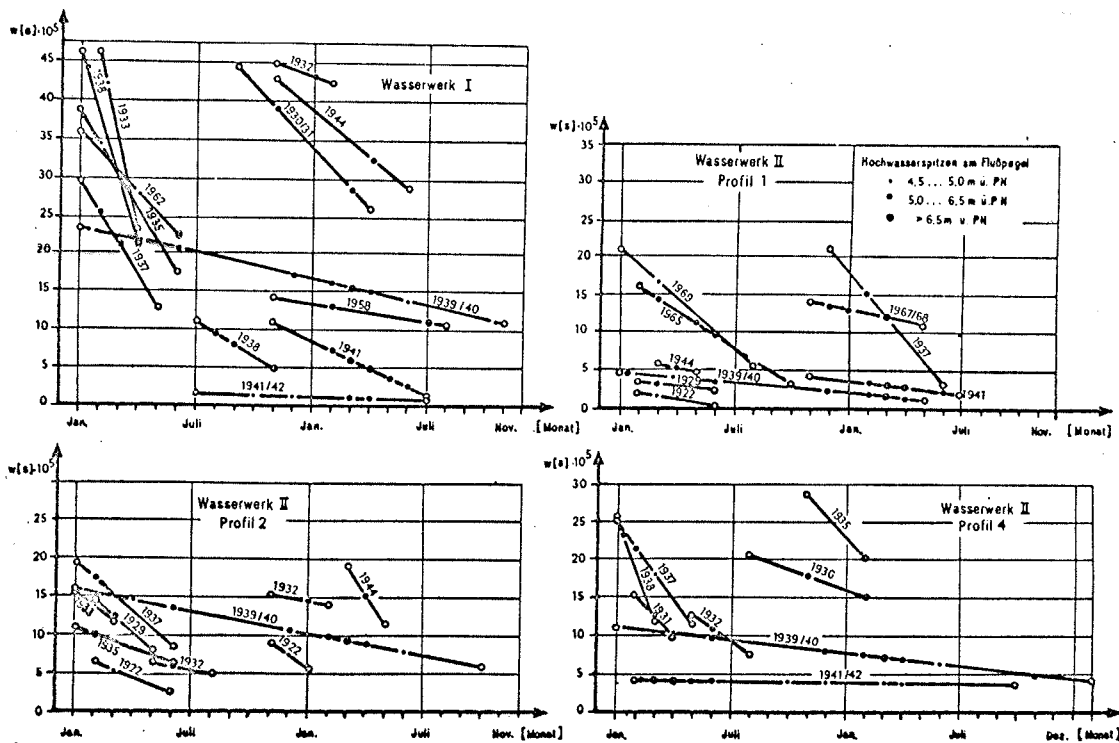


Bild 39: Absolute Reduzierung des Kolmationskoeffizienten durch Hochwassereinwirkung

Zur quantitativen Bewertung dieses Vorganges wird die "Hochwasserpotenz $P/m \cdot d$ " als Produkt aus der Anzahl der Hochwassertage und dem zugehörigen Wasserstand eingeführt. Die Auswertung erfolgt auf der Grundlage der relativen Veränderungen der Selbstdichtung, da gemäß Abschnitt 6.5.2. die absoluten Änderungen von den örtlichen Bildungsbedingungen bestimmt und in den untersuchten Wasserwerken durch nichtvergleichbare Werte repräsentiert werden. Die Synthese aller Reaktionen wird durch eine Blockbildung erreicht- Berechnung der prozentualen Rate $\frac{w_e}{w_a} \cdot 100 \text{ \%/}$ in 3 Blöcken, und zwar:

im Block 1 für einen Abbau um $<40 \%$ des Ausgangswertes w_a , im Block 2 um $40 - 60 \%$, im Block 3 um $>60 \%$.

Die Mittelwerte $\frac{w_e}{w_a} \cdot 100 \text{ \%/}$ jedes Blockes sind in Abhängigkeit von der zugehörigen mittleren Hochwasserpotenz grafisch aufgetragen. Bei Vernachlässigung weniger Ausreißer, die sich den Ausgleichskurven nicht anpassen, gelingt im Bild 40 und 41 eine instruktive Darstellung, aus der sich nachstehende Erkenntnisse gewinnen lassen:

- Die Reduzierung der Kolmation genügt einer Potenzfunktion der allgemeinen Form

$$\frac{w_e}{w_a} = a_0 \cdot P^{a_1} \text{ mit } -1 < a_1 < 0 \quad (15)$$

Eine Senkung des w-Wertes auf rund 50 % des Ausgangswertes findet bereits bei relativ kleiner Hochwasserpotenz ($P \sim 100 \text{ m}\cdot\text{d}$) statt. Das entspricht einem Hochwasser mit einem Wiederkehrintervall von 1 - 2 Jahren. Abminderungen um mehr als 50 % erfordern dann jedoch sehr große Potenzen, die starke Hochwässer voraussetzen.

- Bis zur Abbaurate von 50 % ist die nachgewiesene Beziehung für alle Stromabschnitte der Elbe allgemeingültig. Beim seltenen Extremabbau auf <40 % des Ausgangswortes weicht allerdings das Verhalten in den Wasserwerken voneinander ab. Das zeigt sich mit dem Wert ($\frac{w_e}{w_a} = 14 \%$, $P = 751 \text{ m}\cdot\text{d}$) in Bild 41, der den Zustand im Wasserwerk I nach den extremen Frühjahrshochwässern 1941 angibt. Die prozentuale Veränderung ist im Wasserwerk II bei gleicher Hochwasserpotenz geringer.

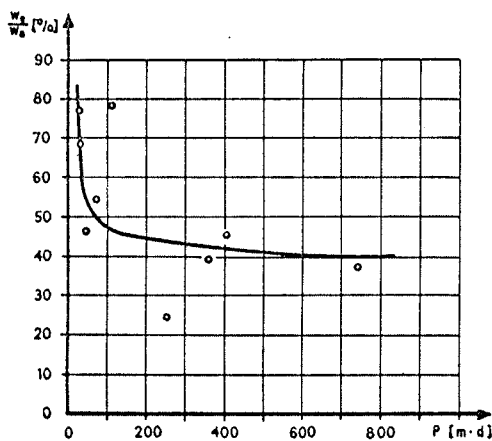


Bild 40: Relativer Abbau des Kolmationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Hochwasserpotenz der Elbe im Wasserwerk II

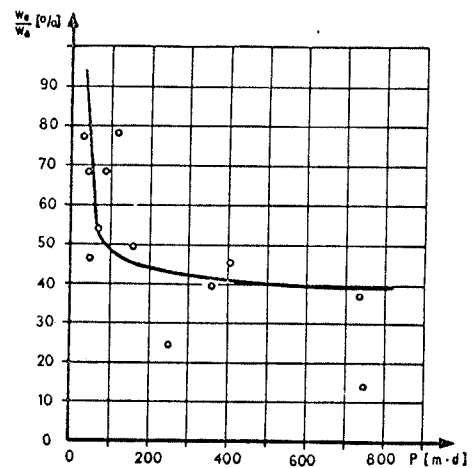


Bild 41: Relativer Abbau des Kolmationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Hochwasserpotenz der Elbe, Synthese der Reaktionen im Wasserwerk I und II

Wiederaufbau der Kolmation nach Hochwasser

Verfolgt man die Entwicklung in den Monaten nach einem Hochwasser, so offenbart sich eine zügige Wiederverdichtung der Gewässersohle. Der besondere Ablauf ist mit den Angaben in Tabelle 17 und 18 charakterisiert. Hieraus können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Die Kolmation setzt sofort nach Abklingen des Hochwassers ein. Dabei entsteht bei Mittelwasser ein der Infiltrationsbelastung adäquater w-Wert. Bei Niedrigwasser setzt sich dieser Prozeß entsprechend den spezifischen Bildungsgesetzen fort (vgl. Abschnitt 6.6.3.).
- Die Entwicklungszeit beträgt durchschnittlich 3 - 6 Monate, vorwiegend aber 4 Monate. Ein weiteres Mal ist damit die Kurzfristigkeit des Kolmationsvorganges bewiesen.
- Nur nach einem Hochwasser mit extrem starker Verminderung des Verdichtungsgrades beträgt die Neubildungszeit bis zu maximal einem Jahr.

Tabelle 17: Kolmationsaufbau nach einem Hochwasser in Abhängigkeit von der Infiltrationsbelastung der Flußsohle

Wasserwerk	Profil Nr.	Ausgewertete Nachhochwasserperioden Anzahl	Wasserspiegel am Elbepegel, Mittelwert der ausgewerteten Perioden [m ü. PN]	Zeitspanne nach Hochwasser, innerhalb der der w-Wert eine der Infiltrationsbelastung adäquate Größe erreicht	
				von . . . bis [Monat]	Mittelwert [Monat]
Werk I	1	9	2,10	2 - 11 meistens 2 - 4	4,2 meistens 3,1
Werk II	1	3	2,20	4 - 7	5,7

Tabelle 18: Kolmationsaufbau nach einem Hochwasser- Zeitraum bis zum Wiedererreichen des Verdichtungsgrades, der vor dem Hochwasser bestand

Wasserwerk	Profil Nr.	Ausgewertete Nachhochwasserperioden Anzahl	Wasserspiegel am Elbepegel, Mittelwert der ausgewerteten Perioden [m ü. PN]	Zeitspanne nach Hochwasser, innerhalb der der w-Wert die Größe annimmt, die vor dem Hochwasser bestand	
				von . . . bis [Monat]	Mittelwert [Monat]
Werk II	1	7	2,30	3 - 8	5,6
	2	7	2,0	2 - 11	6,7
	4	6	2,0	4 - 8	6,2

Einen detaillierten Einblick in die Zusammenhänge des Wiederaufbaues gestattet der Neubildungsvorgang 1942/43 im Wasserwerk I. Gemäß Bild 42 besteht eine klare Abhängigkeit des w -Wertes von der Summe der in der Aufbauzeit infiltrierten Uferfiltratmenge, ausgedrückt als Uferbelastung \bar{Q}_{Ufer} . Das gilt sowohl für Mittelwasserverhältnisse, unter denen dieser Prozeß von März 1942 bis April 1943 abläuft, als auch für die Niedrigwasserperiode der nachfolgenden Monate.

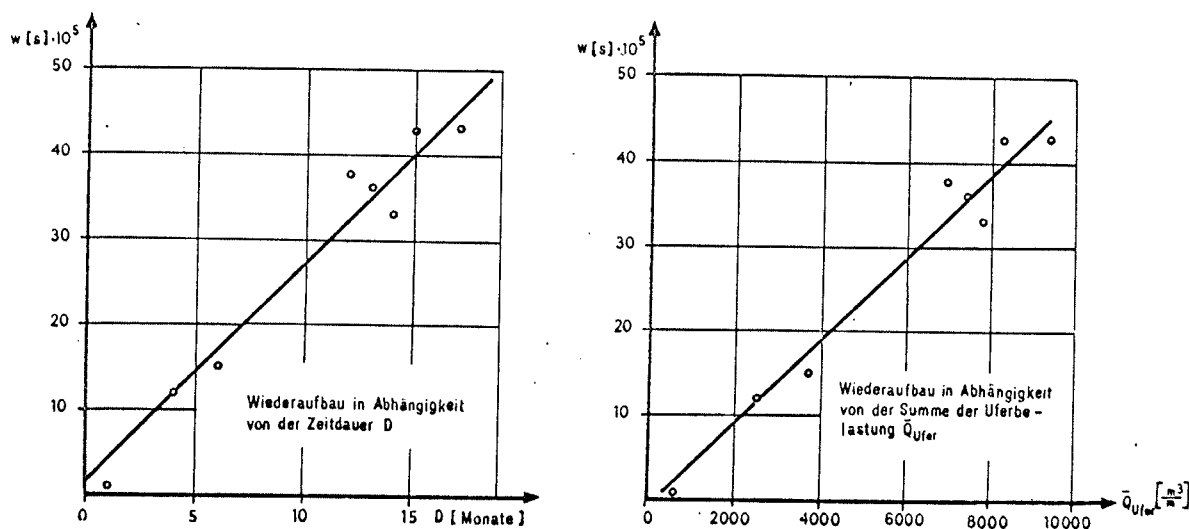


Bild 42: Wiederaufbau der Kolmation im Wasserwerk I von Juli 1942 - November 1943

Die Bedeutung der Hochwässer für die Kolmation kann wie folgt zusammengefaßt werden:

1. Hochwasser hat maßgebenden Einfluß auf die Selbstdichtung, da es innerhalb weniger Tage bis Wochen die Kolmation reduziert. Die Abbaureaktionen sind von der Größe der Hochwasserpotenz abhängig. Es besteht ein Zusammenhang nach einer Potenzfunktion.
2. Abbauraten von i. M. 50 % werden bereits durch die jährlichen bis zweijährlichen Hochwässer bewirkt. Extremhochwässer führen zu einer praktisch vollkommenen Beseitigung der Kolmation.
3. Nach jedem Hochwasser setzt in Abhängigkeit von der Summe der infiltrierten Wassermenge eine schnelle Neubildung der Selbstdichtung ein, die innerhalb eines halben Jahres, maximal nach einem Jahr abgeschlossen ist.

Mit diesen Resultaten wird die in der Literatur vertretene Hypothese von der Kolmationshemmenden Relevanz der Hochwässer untermauert.

6.6.2. Kolmationsbildung bei Mittelwasser

Allgemeine Zusammenhänge

Wie bereits im Abschnitt 6.5.1. beschrieben, besteht eine kausale Beziehung zwischen der Infiltrationsrate (Ursache) und dem Kolmationskoeffizienten (Wirkung). Da nach den Taucherbefunden die Flußsohle nicht über die gesamte Strombreite verdichtet ist, kann die Versickerungsmenge keiner eindeutig definierten Kolmationsfläche zugeordnet werden. Für die Untersuchung der partiellen Mittelwasservorgänge wird deshalb die Uferrate $q_{\text{Ufer}} / \text{m}^3 / \text{m} \cdot \text{d} /$ verwendet, indem die Uferfiltratmenge auf die infiltrationsbelastete Uferlänge L_{Ufer} des Flusses bezogen wird:

$$q_{\text{Ufer}} = \frac{Q_{\text{Ufer}}}{L_{\text{Ufer}}} \quad (16)$$

Eine für die Auswertung notwendige Vereinfachung wird durch Verwendung der "Länge der ufernahen Wasserfassung" als Äquivalent für L_{Ufer} getroffen. Das ist bei den untersuchten langgestreckten Brunnonreihen gerechtfertigt.

Die Mittelwasserkolmation bildet den Basiszustand der Flußbettverdichtung ("Basiskolmation"), da auf ihrer Größe die Kolmation bei Niedrigwasser aufbaut - vgl. Bild 53 in Kapitel 8. Nachfolgende Besonderheiten kennzeichnen das Mittelwasserverhalten:

- Der Kolmationskoeffizient ist der Uferrate q_{Ufer} direkt proportional.
- Jede Änderung der Uferrate führt innerhalb von 1 - 2 Monaten zu einer Veränderung des Kolmationswiderstandes.

Partieller Mittelwasseranteil der Kolmation

Die Korrelation der w-Werte, die frei von Hoch- und Niedrigwasser einflüsse sind, mit der zugehörigen Uferrate wird durch die Ausgleichskurven eines begrenzten Streubereiches in Bild 43 und 44 ausgewiesen. Die Regressionsfunktionen sind der Tabelle 19 zu entnehmen.

Tabelle 19: Funktionen mit Gültigkeitskriterium für die Regression zwischen dem Kolmationskoeffizienten und der Uferrate bei Mittelwasser

	Wasserwerk I	Wasserwerk II
Regressionsfunktion	$w = -35,94 \cdot 10^5 + 3,07 \cdot 10^5 q_{Ufer} [s] (17)$	$w = -10,14 \cdot 10^5 + 0,91 \cdot 10^5 q_{Ufer} [s] (18)$
Gültigkeitskriterium der Funktion: Variationsbreite q_{Ufer}	14,6 - 25,6 m ³ /m·d	12,7 - 26,4 m ³ /m·d

Beide Variable sind miteinander durch eine enge lineare Korrelation $r = 0,87 - 0,93$ verbunden. Die positiven Regressionen widerspiegeln prinzipiell gleichartige Vorgänge in beiden Wasserwerken. Die Funktionen verdeutlichen aber auch, daß bei unterschiedlichen lokalen Bildungsbedingungen aus der gleichen Uferrate verschieden große Kolmationswiderstände resultieren, womit die in Abschnitt 6.5.2. gezogenen Schlußfolgerungen gestützt werden.

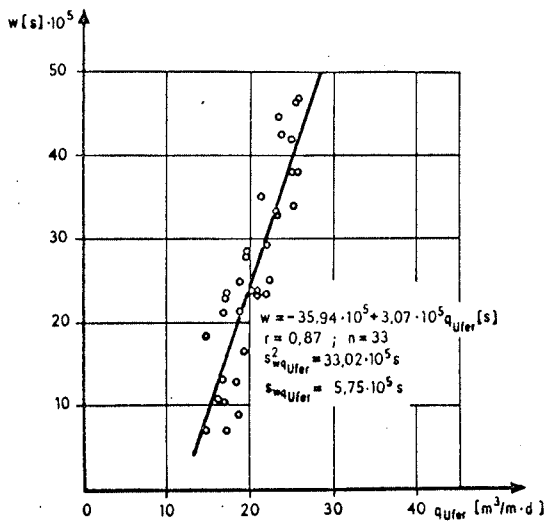


Bild 43: Beziehung zwischen dem Kolmationskoeffizienten und der Uferrate bei Mittelwasser für das Wasserwerk I

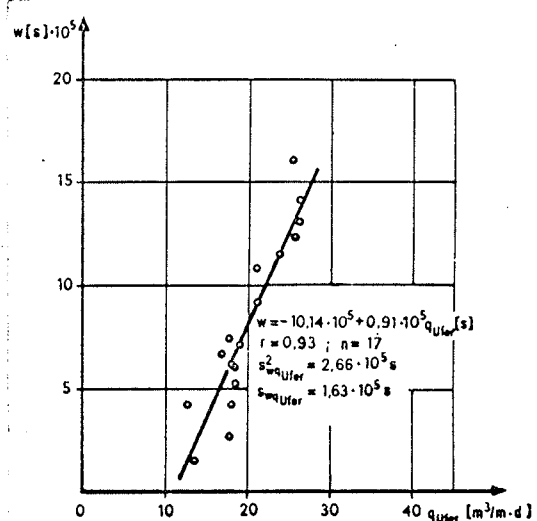


Bild 44: Beziehung zwischen dem Kolmationskoeffizienten und der Uferrate bei Mittelwasser für das Wasserwerk II

Die Untersuchungsergebnisse lassen sich zusammenfassen:

1. Bei Mittelwasser entsteht die Basiskolmation.
2. Der Kolmationskoeffizient hängt unmittelbar von der Uferate Q_{Ufer} ab. Jede Veränderung der Uferate führt in 1 - 2 Monaten zu einer Änderung des Infiltrationswiderstandes.
3. Der korrelative Zusammenhang zwischen dem w-Wert und der Uferate wird durch eine lineare Regressionsfunktion beschrieben.

6.6.3. Kolmationsbildung bei Niedrigwasser

Allgemeine Zusammenhänge

Unter Niedrigwasserverhältnissen entstehen die größten Verdichtungen des Gewässerbettes, wie beispielsweise im Wasserwerk I mit $w = 81,5 \cdot 10^5 \text{ s}$ im Juni 1964. Die identifizierten Widerstandswerte stimmen nicht mehr mit der praktizierten Uferate überein; sie sind bedeutend größer, als es nach der in Abschnitt 6.6.2. angegebenen Regressionsfunktion für Mittelwasser zu erwarten ist. Damit offenbart sich eine Eigendynamik der Entwicklung, die für den Wasserwerksbetrieb von großer Wichtigkeit ist. Den einzelnen Aspekten dieser Problematik wird mit den folgenden Untersuchungen nachgegangen.

Es werden 23 Niedrigwasserperioden mit einer Dauer von 6 - 15 Monaten ausgewertet - Wasserstände am repräsentativen Elbpegel $< 107,36 \text{ m NN}$, Durchfluß $< 160 - 200 \text{ m}^3/\text{s}$. Geringe Schwankungen des Flußwasserspiegels mit unveränderlicher Schleppspannung und Stoffbelastung und praktisch gleichbleibende Uferfiltratförderung in den Wasserwerken bilden hierfür konstante Randbedingungen. Der Kolmationsprozeß kommt damit den aus den Laborversuchen bekannten Gesetzmäßigkeiten (BEYER/BANSCHER /9/) nahe und läßt sich in Abhängigkeit

- von der Zeitdauer des Niedrigwassereinflusses D ,
- von der Flächenbelastung des Uferfiltrates innerhalb der Niedrigwasserzeit

$$\bar{Q} = \frac{\sum Q_{\text{Ufer}}}{F} \text{ /m}^3/\text{m}^2/ \quad (19)$$

verfolgen.

Aus den in Abschnitt 6.6.2. dargelegten Gründen wird die Flächenbelastung \bar{Q} modifiziert verwendet, indem die Summe des Uferfiltratzuflusses ΣQ_{Ufer} auf die infiltrierende Uferlänge bezogen und als Uferbelastung \bar{Q}_{Ufer} umgerechnet wird:

$$\bar{Q}_{\text{Ufer}} = \frac{\Sigma Q_{\text{Ufer}}}{L_{\text{Ufer}}} \quad /m^3/m/ \quad (20)$$

Als belastete Uferlänge L_{Ufer} gilt wie in Abschnitt 6.6.2. die Länge der ufernahen Brunnenreihe.

Der Entwicklungsverlauf soll am Beispiel des Wasserwerkes I mit den Diagrammen der Bilder 45 - 48 verdeutlicht werden. Bild 45 und 46 beinhaltet die Veränderungen in jeder einzelnen Niedrigwasserperiode. Die Kurven im Bild 47 und 48 integrieren durch die Darstellung des maximalen w -Wertes jeder Periode in Abhängigkeit von der Zeitdauer bzw. der Uferbelastung, die für das Entstehen dieses Maximalwertes notwendig ist, bereits die Abläufe einer größeren Zahl von Niedrigwasserereignissen. Zum partiellen Kolmationsverhalten können hieraus nachstehende Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Die Selbstdichtung steht in kausalem Zusammenhang mit der Niedrigwasserdauer oder der Summe der dabei uferfiltrierten Wassermenge pro Flächeneinheit des Flußbettes (Flächenbelastung) bzw. pro infiltrationsaktiver Uferlänge (Uferbelastung). Die Kolmationsentwicklung erfolgt in deren Abhängigkeit, so daß im Unterschied zu den Mittelwasservorgängen auch bei einer Verringerung der Uferrate eine weiterführende Verdichtung stattfindet. Der Faktor "Zeit" bekommt maßgebende Bedeutung.
- Relevante Veränderungen setzen längere Niedrigwasserperioden von mindestens 4 - 6 Monaten voraus. Einzelmonate haben keinen Einfluß.
- Die Selbstdichtung baut auf dem Verdichtungsgrad auf, der zu Beginn des Niedrigwassers existiert (Basiskolmation). Der partielle Niedrigwasseranteil vergrößert diesen additiv.
- Der Bildungsprozeß wird bereits bei Mittelwasserdurchflüssen abgebrochen. Selbst bei hohen Uferraten erfolgt dann ein sofortiger Kolmationsabbau in Monatsfrist und eine Rückführung auf einen der Uferrate adäquaten w -Wert. Das läßt auf eine labile

Konsistenz der Niedrigwasserkolmation schließen, die einer temporären Verdichtung mit zeitlich begrenzten starken Auswirkungen auf den Wasserwerksbetrieb gleichkommt.

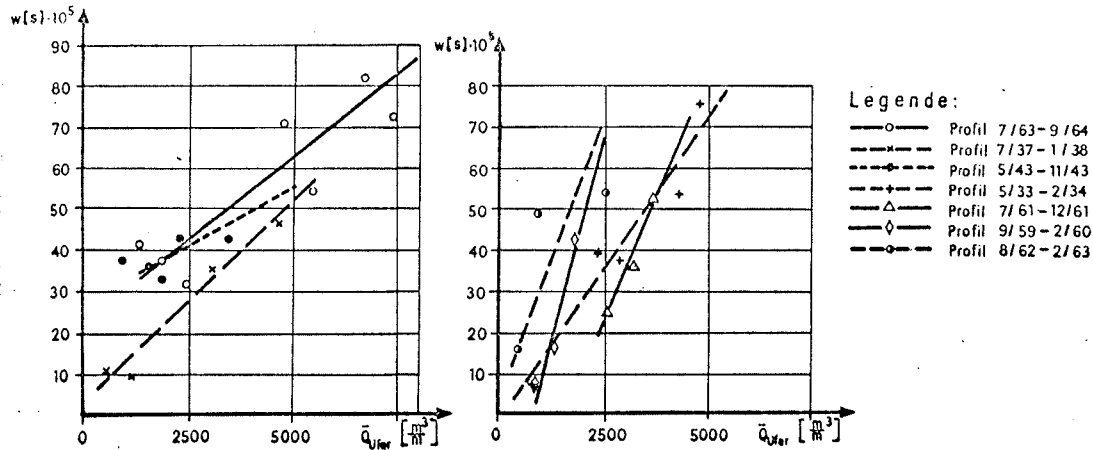


Bild 45: Abhängigkeit des Kolmationskoeffizienten von der Uferbelastung bei Niedrigwasser im Wasserwerk I

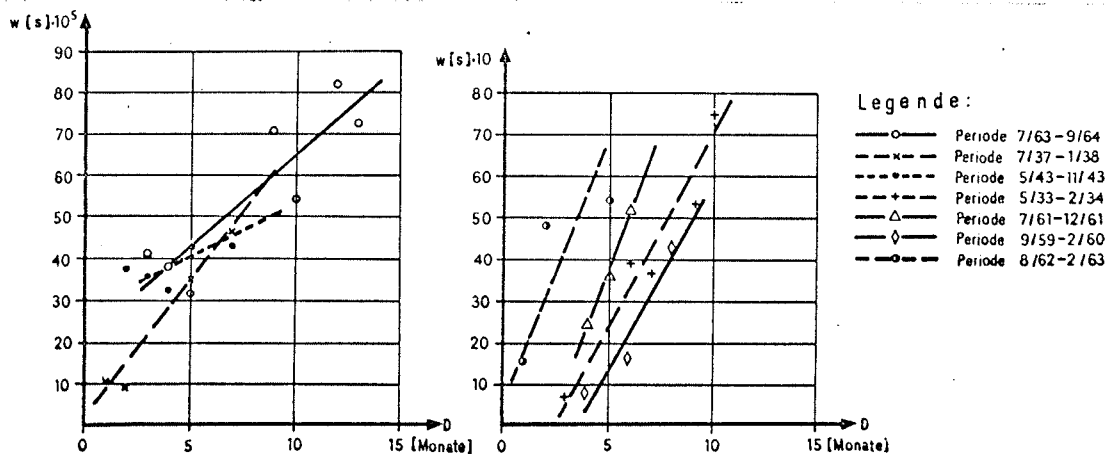


Bild 46: Abhängigkeit des Kolmationskoeffizienten von der Dauer des Niedrigwassereinflusses im Wasserwerk I

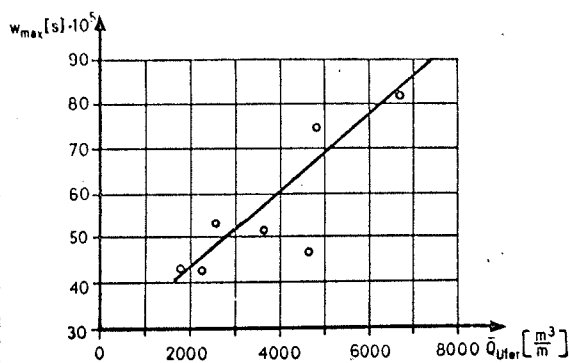


Bild 47: Abhängigkeit des maximalen Kolmationskoeffizienten je Niedrigwasserperiode von der Uferbelastung im Wasserwerk I

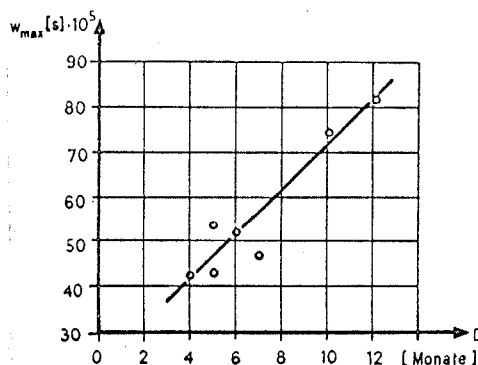


Bild 48: Abhängigkeit des maximalen Kolmationskoeffizienten je Niedrigwasserperiode von der Dauer des Niedrigwassereinflusses im Wasserwerk I

Partieller Niedrigwasseranteil der Kolmation

Durch die Synthese der Einzelveränderungen wird eine Beziehung zwischen dem partiellen Kolmationsanteil bei Niedrigwasser $\Delta w/s$ und der Uferbelastung \bar{Q}_{Ufer} geschaffen. Der Δw -Wert drückt als Differenz der Einzelzustände zur Anfangskolmation w_a dieses Zeitraumes die spezifische Kolmationszunahme aus und ist unter methodischem Aspekt auch als Niedrigwasserzuschlag des Infiltrationswiderstandes zu verstehen (vgl. Kapitel 8).

Das Streudiagramm in Bild 49 enthält für das Wasserwerk I die Korrelation zwischen dem Niedrigwasseranteil und der Uferbelastung, die mit $r = 0,91$ eng ist. Die Anpassung an die empirischen Datenpaare wird nach einem auf der Reststreuung beruhenden Entscheidungskriterium am besten durch ein Polynom 3. Grades erreicht:

$$\Delta w = 21,62 \cdot 10^5 + 4,51 \cdot 10^3 \bar{Q}_{Ufer} - 1,22 \bar{Q}_{Ufer}^2 + 1,23 \cdot 10^{-4} \bar{Q}_{Ufer}^3 / s \quad (21)$$

Gültigkeitsbereich der Regressionsfunktion:

$$300 < \bar{q}_{\text{Ufer}} < 4800 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{d}$$

$$\text{bei } q_{\text{Ufer}} = 14,4 - 21,7 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{d}.$$

Mit \bar{q}_{Ufer} fließt in die Gleichung 21 die Summe der Monatsmenge des Uferfiltrates ab dem ersten Niedrigwassermonat ein.

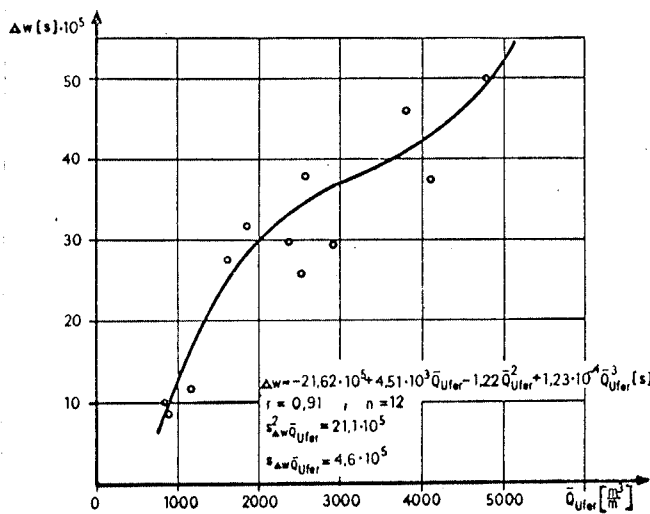


Bild 49: Beziehung zwischen dem partiellen Niedrigwasseranteil der Kolmation und der Uferbelastung für das Wasserwerk I

Wegen unvollständiger Förderdaten ist eine analoge Betrachtung für das Wasserwerk II nicht möglich. Zur Abrundung der Ergebnisse wird mit den Kurven in Bild 50 und 51 eine ergänzende Auswertung auf der Grundlage der Niedrigwasserdauer D vorgenommen. Sie hat allerdings nur vergleichende Bedeutung, da das praxisrelevante Kriterium die Uferbelastung ist. Der annähernd gleichartige Kurvenverlauf im Bild 50 und 51 unterstreicht die in Abschnitt 6.5.2. getroffene Feststellung, daß die relative Kolmationsentwicklung in beiden Wasserwerken weitgehend übereinstimmt. So verdoppelt sich beispielsweise nach den Diagrammen der w -Wert - bezogen auf den langjährigen Mittelwert, der im Werk I $\bar{w} = 31 \cdot 10^5 \text{ s}$, im Werk II als Durchschnittswert der Profile 1, 2, 4 $\bar{w} = 10,3 \cdot 10^5 \text{ s}$ beträgt - in beiden Uferfiltratwerken nach jeweils 5 Niedrigwassermonaten.

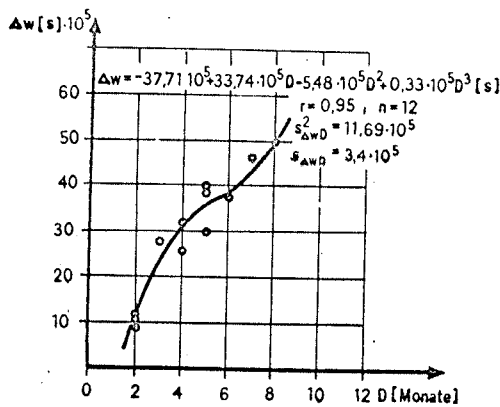


Bild 50: Beziehung zwischen dem partiellen Niedrigwasseranteil der Kolmation und der Zeitdauer des Niedrigwassereinflusses für das Wasserwerk I

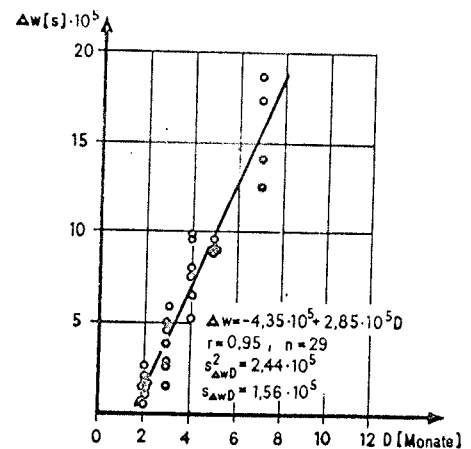


Bild 51: Beziehung zwischen dem partiellen Niedrigwasseranteil der Kolmation und der Zeitdauer des Niedrigwassereinflusses für das Wasserwerk II

Als Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse ist zu konstatieren:

1. Niedrigwasserhältnisse sind für die Selbstdichtung von zentraler Bedeutung, da hier die größten Verdichtungen entstehen.
2. Es findet eine ständig fortschreitende Kolmation in Abhängigkeit von der Summe der in dieser Zeit infiltrierten Wassermenge statt. Relevante Veränderungen setzen Perioden von mindestens 4 - 6 Monaten Dauer voraus.
3. Ausdruck der spezifischen Niedrigwasserquote ist der Wert $\Delta w / s$. Die partielle Kolmation Δw baut auf der Basiskolmation auf und vergrößert diese additiv. Der stochastische Zusammenhang zwischen dem Δw -Wert und der Uferbelastung Q_{Ufer} wird durch eine Regressionsfunktion gemäß einem Polynom 3. Grades beschrieben.
4. Die Niedrigwasserkolmation ist zeitlich begrenzt, da sie bereits durch Mittelwasserdurchflüsse in Monatsfrist wieder beseitigt wird. Es erfolgt eine Rückführung auf die Basiskolmation.

7. Uferfiltratabgabe der Elbe

Für Vorratseinschätzungen ist die Kenntnis der Uferferrate q_{Ufer} von Interesse, die sich problemlos unter Berücksichtigung der Selbstdichtung des Flußbettes gewinnen läßt. Als Ergänzung der Kolmationsforschung wird durch den nachfolgenden Vergleich der im langjährigen Förderbetrieb praktizierten Uferferrate mit dem dabei erreichten Kolmationsgrad das Gewässerleistungsvermögen der Elbe beurteilt.

Am Beispiel des Wasserwerkes I sind in Tabelle 20 von den Förderreihen mehrerer Jahrzehnte die Mittelwerte q_{Ufer} zusammengestellt. Die Uferferrate ist auf die Länge der Brunnenreihe bezogen (vgl. Abschnitt 6.6.2.).

In Bild 52 wird die Uferfiltratentnahme dem Kolmationskoeffizienten gegenübergestellt. Die Kurven machen deutlich, daß das Gewässerleistungsvermögen bei einem $q_{\text{Ufer}} = 21,8 \text{ m}^3/\text{d}$ noch nicht überfordert ist. Es entstehen keine dauerhaften Verdichtungen, die Selbstdichtung unterliegt den in Kapitel 6 nachgewiesenen Gesetzmäßigkeiten. Selbst bei Einbeziehung der über die Fassungstrasse hinausreichenden Uferfiltratentzugsstrecke in die Berechnung des q_{Ufer} -Wertes, deren Leistungsanteil rund 10 - 15 % der Gesamtmenge des Infiltrates beträgt, ist noch eine effektive Rate von 18 - 19 $\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{d}$ gewährleistet. Sie übertrifft die für die Elbe bislang gebräuchliche Grenzbelastung von 10 $\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{d}$ beträchtlich.

Schlußfolgernd können aus diesen Ergebnissen mit $q_{\text{Ufer}} = 15 - 20 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{d}$ verbesserte Belastungswerte für die Elbe abgeleitet werden.

Das hat Bedeutung für die Prognose der Uferfiltratmenge, die im Gegensatz zur bisherigen Verfahrensweise um mindestens 50 % größer einzuschätzen ist.

Tabelle 20: Praktizierte Uferrate im Förderbetrieb des Wasserwerkes I, bezogen auf die Länge der Fassungstrasse

Jahresreihe	Mittelwert q_{Ufer} [m ³ /m·d]	Maximalwert q_{Ufer} [m ³ /m·d]	Minimalwert q_{Ufer} [m ³ /m·d]
1927-1945	23,6		
1957-1978	20,9		
1928-1965	21,8		
1927-1978	21,9	34 ^{x)}	13,8 ^{x)}

Anmerkung: x) Mittelwert eines Betriebsjahres

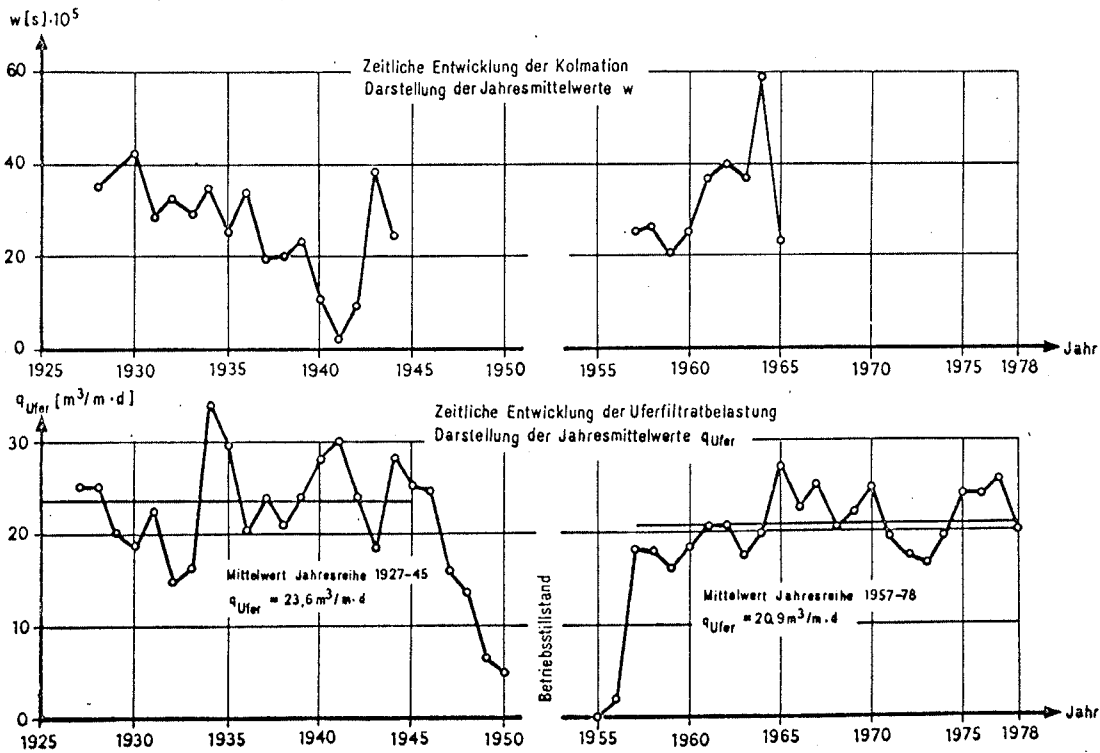


Bild 52: Gegenüberstellung von Uferfiltratbelastung und Kolmationsentwicklung im Elbett für das Wasserwerk I

8. Einsatz der Forschungsergebnisse für den Uferfiltratvorratsnachweis

Die konkrete Vorhersage des Kolmationskoeffizienten, wie er sich beim Dauerbetrieb der Wassergewinnung und unter den vielfältigen natürlichen Einflüssen im Gewässer herausbildet, ist Voraussetzung für den hydrogeologischen Vorratsnachweis. Diesem Anliegen wird durch die Ableitung eines Verfahrens zur Prognose des Infiltrationswiderstandes der inneren Kolmation auf der Grundlage der im Kapitel 6 empirisch gefundenen Korrelationen entsprochen.

8.1. Verfahren zur Prognose des Kolmationskoeffizienten

8.1.1. Bemessungsverfahren

Das Verfahren gründet sich auf den Zusammenhängen zwischen Mittel- und Niedrigwasserkolmation, die in Bild 53 schematisch wiedergegeben sind.

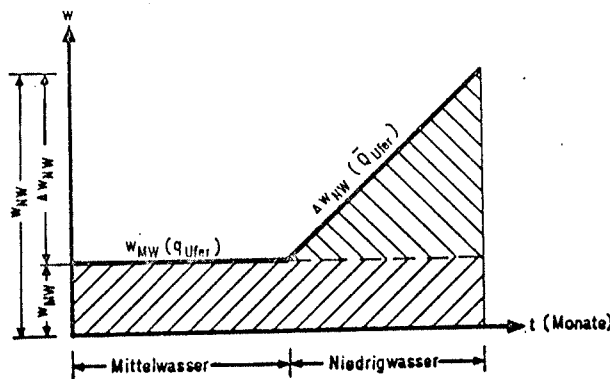


Bild 53: Zusammenhang von Mittel- und Niedrigwasserkolmation

Für die Bemessung des Kolmationskoeffizienten ergibt sich hieraus folgende Formel:

$$w = w_{MW}(q_{Ufer}) + \Delta w_{NW}(\bar{Q}_{Ufer}) / s/ \quad (22)$$

Damit eröffnet sich die Möglichkeit, die Größe der inneren Kolmation separat für Mittel- und Niedrigwasserverhältnisse jeweils in Abhängigkeit vom Uferfiltratzufluß zu bestimmen:

- Mittelwasserkolmation als Basiszustand $w = w_{MW} (q_{Ufer})$ (23)
- Niedrigwasserkolmation durch Addition des partiellen Mittelwasseranteiles und des spezifischen Niedrigwasserzuschlages

$$w = w_{MW} (q_{Ufer}) + \Delta w_{NW} (\bar{Q}_{Ufer}) \quad (24)$$

Die praktische Anwendung der Formel (22) erfolgt mit Hilfe der Kolmationsfunktionen - Transformationsfunktionen für partielle Mittel- und Niedrigwasseranteile-, die der unmittelbaren Berechnung des w -Wertes dienen. Sie sind in Abschnitt 8.1.2. zusammengestellt.

Mit dem Verfahren lassen sich sowohl Forderungen des Wasserbedarfes durch Vorgaben zur Uferfiltratbelastung des Flußbettes (q_{Ufer}), als auch solche der Versorgungssicherheit durch Vorgaben zur Dauer des Niedrigwassereinflusses berücksichtigen. Je größer letztere gewählt wird, um so sicherer wird der berechnete Vorrat.

8.1.2. Methodische Empfehlungen zur Anwendung des Bemessungsverfahrens

Kriterien des Vorratsnachweises

Das Bemessungsverfahren wird den Anforderungen der Vorratsberechnung durch Verifikation folgender Kriterien gerecht:

1. Nachweis der garantierten Mindestuferfiltratmenge bei Niedrigwasser unter der Bedingung starker Kolmation.

Für die Vorhersage des w -Wertes ist als Kondition die "adäquate Niedrigwasserdauer als "Anzahl der Niedrigwasser m o n a t e" vorzugeben, wobei von der volkswirtschaftlichen Bedeutung des Vorrates und einem vertretbaren Sicherheitsrisiko auszugehen ist. Ihre Festlegung geschieht auf der Grundlage der Monats-

mittelwerte der Flußwasserstände durch statistische Auswertung des langjährigen Durchflußgeschehens. Als Begrenzung des Niedrigwasserbereiches gilt der mittlere Wasserstand zwischen Mittel- und Mittlerem Niedrigwasser.

2. Nachweis der Vorratsfunktion für das Spektrum Mittel-Niedrigwasser; Leistungsfunktionen ufernaher Brunnonfassungen. Die Prognose des w-Wertes erfolgt für Mittelwasserverhältnisse und verschiedene Zeitpunkte der Niedrigwasserperiode. Als Kondition ist für die Punkte der Vorratsfunktion im Niedrigwasserbereich die adäquate Niedrigwasserdauer vorzugeben.

Kolmationsfunktionen

Mittelwasseranteil w_{MW} :

$$w_{MW} = - 36 \cdot 10^5 + 3,1 \cdot 10^5 q_{Ufer} /s/ \quad (25)$$

$$\text{Streuung } s_{wq_{Ufer}} = 5,75 \cdot 10^5 s$$

Niedrigwasserzuschlag Δw_{NW} :

$$\Delta w_{NW} = -21,6 \cdot 10^5 + 4,5 \cdot 10^3 \bar{Q}_{Ufer} - 1,2 \bar{Q}_{Ufer}^2 + 1,2 \cdot 10^{-4} \bar{Q}_{Ufer}^3 /s/ \quad (26)$$

$$\text{Streuung } s_{\Delta w \bar{Q}_{Ufer}} = 4,6 \cdot 10^5 s$$

Der w-Wert kann mit den Funktionen berechnet oder auf einfache Weise direkt aus den Kurven des Diagrammes im Bild 54 abgelesen werden.

Anwendungshinweise

- Die Kolmationsfunktionen gelten für einseitige Uferbeanspruchung (Regelfall der Uferfiltratgewinnung).

Ihre Anwendungsgrenzen sind mit der Variationsbreite der empirischen Werte fixiert. Sie schließen die praktisch relevanten Uferfraten von 15 - 20 m³/m·d mit ein (vgl. Kapitel 7).

Tabelle 21: Anwendungsgrenzen der Kolmationsfunktion

Parameter	Mittelwasserkolmation w_{MW}	Niedrigwasserzuschlag Δw_{NW}	Bemerkung
q_{Ufer} /m ³ /m·d/	14 - 26	14 - 22	
\bar{Q}_{Ufer} /m ³ /m/		800 - 4800	
τ /N/m ² /	>2 - 12 >5 - 15	≤ 2 ≤ 5	Uferbereich Stromtrieb
b /m/	>100	>100	bei Bühnenausbau zwischen Bühnenköpfen

Maßgebendes Kriterium der Schleppspannung ist das für den Uferbereich.

- Den Funktionen liegt die Idealisierung einer über die gesamte Flußbreite gleichmäßig ausgebildeten Kolmation zu Grunde, so daß der prognostizierte w -Wert für den gesamten Stromquerschnitt gilt (vgl. Punkt 6.2.2.1.). Das Verfahren zur Simulation der Uferfiltratströmung muß diesem Umstand entsprechen.
- Der w -Wert gilt für den Gewässerbettabschnitt, der mit der Fassungslänge übereinstimmt. Die Eingangswerte der Kolmationsfunktion q_{Ufer} und \bar{Q}_{Ufer} sind auf die Länge der ufernahen Brunnenreihe zu beziehen. \bar{Q}_{Ufer} wird als die Summe der uferfiltrierten Monatsmenge ab dem 1. Monat der Niedrigwasserperiode bestimmt.

8.1.3. Anwendungsbeispiele

Die Anwendung des Bemessungsverfahrens wird nachstehend an zwei Beispielen demonstriert.

Beispiel 1 - Nachweis des garantierten Mindestuferfiltratvorrates bei Niedrigwasser im Fluß.

Aufgabenstellung: Mit einer 1200 m langen Brunnenreihe an einer Uferseite des Flusses soll auch nach einer 6-monatigen Niedrigwasserperiode noch eine Uferfiltratmenge von 20 T m³/d sicher gewonnen werden. Für diesen Belastungsfall ist der w -Wert vorherzusagen.

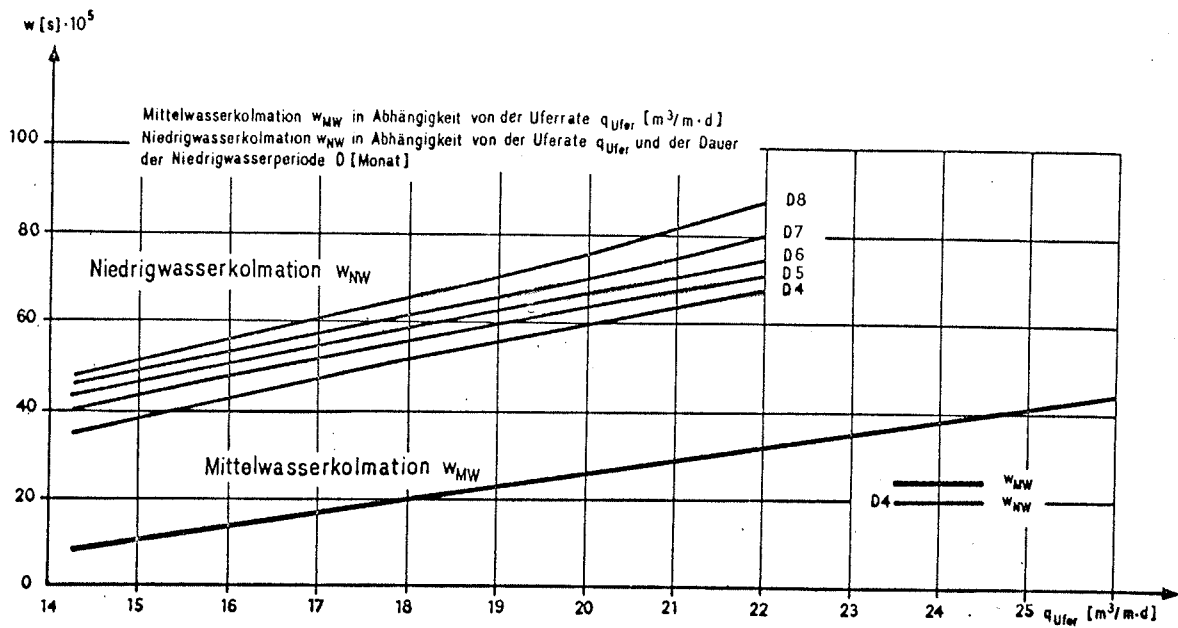


Bild 54: Grafik zur Bemessung des Kolmationskoeffizienten

Arbeitsschritte zur Bemessung des w -Wertes:

1. Bestimmung von $q_{Ufer} = \frac{20000 \text{ m}^3/d}{1200 \text{ m}} = 16,7 \text{ m}^3/m \cdot d$

Wie der Vergleich mit der in Kapitel 7 begründeten Grenzbelastung ergibt, ist diese Uferate praktikabel.

2. Für $q_{Ufer} = 16,7 \text{ m}^3/m \cdot d$ wird mit Gleichung (25) und (26) der partielle Mittelwasserkoeffizient w_{MW} und der Niedrigwasserzuschlag Δw_{NW} berechnet. In Gleichung (26) fließt die in 6 Niedrigwassermonaten infiltrierte Uferfiltratmenge als Uferbelastung \bar{Q}_{Ufer} ein:

$$\bar{Q}_{Ufer} = 180 \text{ d} \cdot 16,7 \text{ m}^3/m \cdot d = 3006 \text{ m}^3/m$$

Berechnung von w_{MW} nach Gl. (25) - $w_{MW} = 15,8 \cdot 10^5 \text{ s}$

Berechnung von Δw_{NW} nach Gl. (26) - $w_{NW} = 37,8 \cdot 10^5 \text{ s}$

Berechnung des Bemessungswertes für Niedrigwasser nach Formel (22):

$$w = 53,6 \cdot 10^5 \text{ s}$$

=====

Dieser Bemessungswert kann auch unmittelbar aus der Grafik in Bild 54 abgegriffen werden.

Beispiel 2 - Nachweis der Vorratsfunktion des Uferfiltrates für den Mittel- und Niedrigwasserzustand im Fluß.

Aufgabenstellung: Mit der in Beispiel 1 genannten Brunnenreihe sollen bei Mittel- und Niedrigwasser jeweils $20 \text{ T m}^3/\text{d}$ Uferfiltrat gewonnen werden. Der w -Wert ist für die Vorratsfunktion mit den Nachweisfällen "Mittelwasser und Niedrigwasser bei Einflußdauer $D = 4,5$ und 6 Monate" vorherzusagen.

Arbeitsschritte zur Bemessung des w -Wertes:

1. Bestimmung von $q_{\text{Ufer}} = 16,7 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{d}$ wie in Beispiel 1
2. Für $q_{\text{Ufer}} = 16,7 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{d}$ wird mit Gleichung (25) w_{MW} berechnet. Die Berechnung von Δw_{NW} für eine Niedrigwasserdauer von $4, 5$ und 6 Monaten erfolgt mit Gleichung (26). Aus o. g. q_{Ufer} -Wert wird hierfür die adäquate Uferbelastung ermittelt:

$$\begin{aligned} \text{für } D = 4 \text{ Monate} \quad \bar{Q}_{\text{Ufer}} &= 120 \text{ d} \cdot 16,7 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{d} = 2004 \text{ m}^3/\text{m} \\ \text{für } D = 5 \text{ Monate} \quad \bar{Q}_{\text{Ufer}} &= 150 \text{ d} \cdot 16,7 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{d} = 2505 \text{ m}^3/\text{m} \\ \text{für } D = 6 \text{ Monate} \quad \bar{Q}_{\text{Ufer}} &= 180 \text{ d} \cdot 16,7 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{d} = 3006 \text{ m}^3/\text{m} \end{aligned}$$

3. Bemessungswert w nach tabellarischer Berechnung u. Gl. (23/24):

Nachweis der Vorratsfunktion	w_{MW}	Δw_{NW}	w
MW	$15,8 \cdot 10^5 \text{ s}$		$15,8 \cdot 10^5 \text{ s}$
NW ($D = 4$)	$15,8 \cdot 10^5 \text{ s}$	$30 \cdot 10^5 \text{ s}$	$45,8 \cdot 10^5 \text{ s}$
NW ($D = 5$)	$15,8 \cdot 10^5 \text{ s}$	$34,7 \cdot 10^5 \text{ s}$	$50,5 \cdot 10^5 \text{ s}$
NW ($D = 6$)	$15,8 \cdot 10^5 \text{ s}$	$37,8 \cdot 10^5 \text{ s}$	$53,6 \cdot 10^5 \text{ s}$

Die w -Werte können auch aus der Grafik in Bild 54 bezogen werden.

Mit dem Bemessungswert w ist im Rahmen der Vorratsberechnung der hydraulische Nachweis des Zuflusses von $20 \text{ T m}^3/\text{d}$ Uferfiltrat sowie die Brunnen- und Strömungsfeldberechnung durchzuführen (vgl. Abschnitt 3.4.1.). Gestatten die Transmissibilitätsverhältnisse des Grundwasserleiters eine derartige Belastung nicht (horizontales Abführungsvermögen eingeschränkt), dann muß die Vorhersage des w -Wertes und die Vorratsberechnung mit einer verminderten Uferrate wiederholt werden.

8.2. Verallgemeinerung und Einsatzgrenzen der Forschungsergebnisse

Die nachgewiesene Abhängigkeit der Selbstdichtung von den auf- und abbauenden Vorgängen ist für die Flüsse mit Erosionsprofil universell gültig: Ober- und Mittelläufe der großen Ströme wie Elbe, Oder, Rhein, Donau. Das trifft gleichermaßen für die aus diesen Beziehungen abgeleitete Bemessungsformel des Kolmationskoeffizienten zu. Lediglich die konkreten quantitativen Zusammenhänge, die in den empirisch gefundenen Korrelationen (Transformationsfunktionen) ihren Ausdruck finden, sind auf Grund der Spezifika der kolmationsbildenden und -hemmenden Faktoren gewässer- und ortsabhängig. Das bedeutet, daß theoretisch für jeden Ort im Gewässer veränderte, individuelle Kolmationsfunktionen gelten, die Selbstdichtung für jeden Standort individuell zu bestimmen ist.

In unseren Flüssen wird sich die Größe der Kolmation zwischen den Grenzzuständen

- Gebirgsfluß mit sehr hoher Schleppspannung und praktisch Nullkolmation,
 - Unterlauf des Flachlandflusses mit vermutlich größter Verdichtung
- einstellen.

Mit den Kolmationsfunktionen der untersuchten Wasserwerke existieren vorerst für 2 Präzedenzfälle der lokalen Bildungsbedingungen in der Elbe Korrelationen zwischen der Uferfiltratmenge und dem w-Wert. Die Anwendung in der Erkundungspraxis setzt eine vertretbare Verallgemeinerung ihres territorialen Gültigkeitsbereiches unter vorrangiger Beachtung ungünstiger Grenzverhältnisse voraus. Unter diesem Aspekt werden in das Bemessungsverfahren die Funktionen des Wasserwerkes I einbezogen, die für kolmationsfördernde Bildungsbedingungen repräsentativ sind. Entsprechend der gewässerkundlichen Charakteristik der Elbe wird ihre Verwendung für die Obere und Mittlere Elbe bis zur Mündung der Schwarzen Elster empfohlen. Sowohl die Schleppspannungen und Strombreiten, als

auch das Korngrößenspektrum der Flußsohle weichen in diesem Stromabschnitt nur unbedeutend voneinander ab.

Damit steht für das wichtigste Uferfiltratgewässer unseres Landes künftig ein repräsentativer Algorithmus zur Prognose des Kolmationskoeffizienten zur Verfügung.

9. Nutzen der Forschungsergebnisse

9.1. Methodische Ergebnisse

Mit der vorliegenden Arbeit werden national und international erstmals die Gesetzmäßigkeiten der Kolmationsentwicklung in Fließgewässern unter den komplex wirkenden natürlichen Einflußfaktoren gesichert nachgewiesen. Von zentraler Bedeutung ist die Erkenntnis, daß die Selbstdichtung im Gegensatz zur bisher verbreiteten Ansicht vorrangig durch das Strömungsgeschehen im Fluß geprägt wird und sich kein quasistabiler, irreversibler Zustand der inneren Kolmation einstellt. Für unterschiedliche Durchflußbedingungen wird das Selbstdichtungsverhalten durch statistisch gesicherte, empirische Funktionen bestimmt. Hierauf baut ein Algorithmus zur Prognose des Kolmationskoeffizienten auf, dessen praktische Bedeutung in folgenden Punkten zusammengefaßt werden kann:

1. Im Unterschied zu den bislang angewendeten Methoden, mit denen der Kolmationskoeffizient nur ungenau ermittelt bzw.. abgeschätzt werden konnte, wird das neue Verfahren den tatsächlichen Vorgängen in Fließgewässern gerecht. Es gestattet eine objektive Vorhersage des w -Wertes unter Berücksichtigung der relevanten Einflußfaktoren Infiltrationsrate und Schleppspannung im Fluß.
2. Die Möglichkeit, den Kolmationskoeffizienten mittel- und niedrigwasserbezogen und unter Beachtung der Randbedingungen des Wasserbedarfs und der Versorgungssicherheit zu bemessen, macht den Vorratsnachweis flexibel, entspricht den Interessen der wasserwirtschaftlichen Nutzer. Die Berechnung der Wassermenge muß sich nicht mehr ausschließlich am ungünstigsten Kol-

mationszustand bei extremen Niedrigwasser orientieren. (z. B. $NQ_{30/10}$), der in der Praxis selten vorkommt. Sie kann jetzt als Vorratsfunktion für die unterschiedlichsten Belastungs- (Infiltrations-) fälle und Gewässerbedingungen erfolgen, was mit einer Intensivierung der Wassergewinnung verbunden ist (z. B. Nutzung der vorteilhaften Mittelwasservorräte, vgl. Abschnitt 9.2.). Das ist auch für Versorgungskonzeptionen bedeutsam, bei denen aus Gründen der Wasserbeschaffenheit die Brunnenfassungen bei Niedrigwasser außer Betrieb genommen werden müssen.

3. Die Diskrepanz, die derzeit noch zwischen den hochentwickeltesten Simulationsverfahren des Mengennachweises und der Güte der hydrogeologischen Parameter besteht, wird verringert. Bekanntlich hängt von der Qualität der Modelleingabedaten wesentlich die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse ab.

Die methodischen Ergebnisse sind ein Beitrag zur Beurteilung der Kolmationserscheinung in Fließgewässern, zum wissenschaftlich begründeten Mengennachweis und zur optimalen Erkundung des Uferfiltratdargebotes insbesondere an der Elbe. Sie sind ein wesentlicher Schritt beim Aufbau kombinierter Mengen-Güte-Modelle für ufernahe Fassungsanlagen. Aus den Untersuchungen kann geschlossen werden, daß trotz der starken Verschmutzung der Flüsse die zukünftige Bedeutung der Uferfiltration in quantitativer Hinsicht nicht in Frage gestellt ist. Allerdings ist der in der vorliegenden Arbeit begründete Weg zur Erhöhung der Wassermenge nicht in jedem Fall gleichbedeutend mit einer Verbesserung der Bedarfsdeckung, da hierfür sowohl die Quantität als auch die Qualität des Vorrates ausschlaggebend ist. Letztere ist durch die Migration von organischen Inhaltsstoffen und anderen Wasserschadstoffen jedoch oft beeinträchtigt, was zu einem steigenden Aufbereitungsaufwand führt. Es muß daher in jedem Einzelfall einer Optimierung unter Berücksichtigung von Menge, Beschaffenheit und Standortfaktoren überlassen bleiben, ob anstelle der Uferfiltration der künstlichen Grundwasseranreicherung, bei der

die Möglichkeit der Vorreinigung und auch der Regenerierung des Filterbettes besteht, der Vorzug gegeben wird.

Die neuen Erkenntnisse bilden die Grundlage für weiterführende Arbeiten. Aufgaben von aktueller Dringlichkeit sind:

- Fortführung der begonnenen Untersuchungen an Fließgewässern mit dem Ziel der Vergrößerung der Palette empirischer Kolmationsfunktionen unter dem Aspekt einer territorialen Erweiterung der Anwendungsgrenzen des Prognosealgorithmus. Die Einbeziehung kolmationsspezifischer Gewässer wie der Mittelgebirgsflüsse (z. B. Mulde, Oder, Neiße, Spree), der Flachlandflüsse (z. B. Havel) und der Kanäle wird empfohlen.
- Untersuchungen der Kolmation in stehenden Gewässern.
- Vertiefte Erforschung ursächlicher Zusammenhänge des natürlichen Selbstdichtungsverhaltens.
- Erforschung des Einflusses der Kolmation auf die Beschaffenheitsänderung des Uferfiltrates.

9.2. Nutzen für die Erkundung und Bewirtschaftung von Uferfiltrat

Die Forschungsergebnisse sind für sämtliche technisch manipulierbaren Grundwasserströmungsvorgänge in Gewässernähe relevant und interdisziplinär, multivalent nutzbar:

- Uferfiltratgewinnung für Wasserversorgung von Bevölkerung, Industrie und Landwirtschaft;
- Wasserhaltungen im Braunkohlentagebau und in Baugruben (Bauwesen);
- Meliorationsmaßnahmen in Flußtälern.

Ihr praktischer Nutzen speziell für die Erkundung und Bewirtschaftung des Uferfiltrates resultiert aus nachstehenden Gesichtspunkten:

1. Intensivierung des Vorratsnachweises. Vergrößerung der Vorratsmenge pro Meter infiltrierender Uferlänge bzw. Reduzierung des Erkundungsaufwandes pro Mengeneinheit des Uferfiltrates.

Gemessen an der bislang gebräuchlichen Grenzbelastung von $q_{\text{Ufer}} = 10 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{d}$ ist die spezifische Uferfiltratmenge ohne

zusätzlichen Untersuchungsaufwand um mindestens 50 % erhöhbar. Die Einsparung von Erkundungskosten pro Mengeneinheit Uferfiltrat wird mit 30 % eingeschätzt.

2. Optimierung des Erkundungsaufwandes. Einsparung technischer und wissenschaftlicher Leistungen zur Ermittlung des Kolmationskoeffizienten durch den Verzicht auf die nach dem Standard WAPRO 1.52 /68/ geforderten kostenintensiven Versuche und die in der Praxis gebräuchlichen Methoden:
 - Gerinneversuche am Erkundungsort, Versickerungsmessungen im Flußbett, Pumpversuche im Uferbereich.
 - Analogien zu repräsentativen Wasserwerken und damit verbundene Bohrarbeiten und Pumpversuche.
3. Erhöhung der Sicherheit der Vorratsberechnung, Senkung des Erkundungsrisikos; infolge der oft großen Wassermenge von ökonomischem Wert.

Vorratsverluste und volkswirtschaftliche Schäden (Bau überdimensionierter Wasserwerke) durch falsch eingeschätzte w-Werte werden minimiert.
4. Intensivierung bestehender Wasserwerke durch Erhöhung ihrer Förderleistung, womit sich u. U. extensive Erweiterungen vermeiden lassen. Der Schwerpunkt liegt im Mittelelbegebiet, wo die größten Intensivierungsreserven in einigen Wasserwerken mit einer geschätzten Steigerungsrate von 300 - 350 T m³/d bestehen (DIETRICH /17/).

Im Vordergrund steht die Neubewertung der Vorräte auf der Grundlage der flexiblen Bewirtschaftung: Keine Beschränkung auf den ungünstigsten Betriebsfall bei Niedrigwasser, sondern Einbeziehung der erheblich größeren Uferfiltratmenge bei Mittelwasser in die Versorgungskonzeption (MW/NW-Vorratsfunktion der Fassung). Damit verbunden ist die Verwendung der neuen Erkenntnisse für großräumige Bewirtschaftungsmodelle (z. B. Modell Oberes Elbtal, siehe nachstehende Bemerkungen).

Die Forschungsergebnisse sind in der hydrogeologischen Erkundung bereits praxiswirksam. Sie bilden den Inhalt der "Richtlinie zur Bestimmung des Koeffizienten der Kolmationsentwicklung in Fließgewässern" (HEEGER /33/), die seit 1986 verbindlich ist. Von aktueller Bedeutung sind die Ergebnisse der Dissertation für die Realisierung des Beschlusses des Präsidiums des Ministerrates der DDR vom 20.10.1983 zur extensiven und intensiven Uferfiltratgewinnung an der Oberen Elbe. In diesem Zusammenhang ist die Komplettierung des Grundwassermengenmodells durch die regional-repräsentativen Kolmationskoeffizienten von besonderem volkswirtschaftlichen Interesse, da allein für die Trinkwasserversorgung im Ballungsgebiet Dresden in den nächsten Jahren 350 T m³/d Ufer- bzw. Infiltrat bereitzustellen sind (REINHOLD /57/).

Zusammenfassung

Die Selbstdichtung der Gewässersohle ist die wichtigste Randbedingung des hydrogeologischen Nachweises von Uferfiltrat und zugleich ein entscheidender Unsicherheitsfaktor der Wassergewinnung. Da der Vorrat auf Jahre hinaus uneingeschränkt nutzbar sein muß, sind Leistungsprognosen erforderlich, die die Kenntnis der langfristigen Kolmationsentwicklung voraussetzen. Allerdings waren die Möglichkeiten der Vorhersage des Kolmationskoeffizienten bisher unbefriedigend. Es besteht ein praktisches und wissenschaftliches Bedürfnis nach näherer Erforschung des Kolmationsverhaltens unter Naturbedingungen. Die zunehmende Bedeutung der Uferfiltration für die Wasserversorgung unseres Landes gibt dieser Aufgabe eine besondere volkswirtschaftliche Dringlichkeit.

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zur Klärung der Größe und Entwicklung der Selbstdichtung unter fluviatilen Bildungsbedingungen. Es wird ein Verfahren abgeleitet, das die quantitative Bestimmung des Kolmationskoeffizienten erlaubt. Damit verbunden ist eine grundlegende Verbesserung der Methodik zur Erkundung von Uferfiltratvorräten (wissenschaftlich begründeter Mengennachweis).

Einführend in die Problematik der Dissertation werden die Erscheinungsformen und Ursachen der Kolmation, ihre geohydraulische Wirkung sowie der Kolmationskoeffizient w als Ausdruck zur Quantifizierung der Selbstdichtung beschrieben. Aufmerksamkeit finden die speziellen Vorgänge an der Flußsohle beim Betrieb ufernaher Brunnenfassungen, ebenso die Faktoren, die im Fluß entweder die Selbstdichtung fördern oder ihr entgegenstehen. Besondere Beachtung erfahren hierbei die Hemmungsfaktoren, insbesondere die Schleppspannung des fließenden Wassers. Unter erkundungsmethodischem Aspekt wird die Berücksichtigung der Kolmation bei der Vorratsberechnung dargelegt.

Die Gesetzmäßigkeiten der Kolmationsentwicklung werden am Beispiel der Elbe erforscht. Mit Hilfe eines Taucherschachtes wurde die Erscheinungsform, tatsächliche Verbreitung und Mächtigkeit der Selbstdichtung im Strombett großräumig über eine Strecke von 200 km untersucht. Es erfolgte die Bestimmung des Kornspektrums der Sohle und der Nachweis, daß das Elbbett praktisch nur durch eine 3 - 30 cm mächtige innere Kolmation in der fassungsseitigen Uferzone verdichtet ist, die selten bis zur Strommitte ausgebreitet ist. Die Kolmationsmasse umfaßt 1 % des Bodengewichtes der Filterzone und rekrutiert sich zu 90 % aus anorganischer Materie. Erstmals werden damit räumlich weitreichende Ergebnisse zum Vorkommen der Selbstdichtung in großen Strömen vorgelegt.

Den Untersuchungen des zeitlichen Kolmationsverhaltens lag ein empirisches Lösungsverfahren zu Grunde, mit dem sich objektive Aussagen über die natürlichen Abläufe gewinnen lassen. Es fußt auf der Auswertung aufgemessener unterirdischer Strömungszustände im Uferbereich von Wasserwerken und gestattet den komplexen Entwicklungsprozeß unter dem wechselnden Einfluß von Hochwasserwellen und Niedrigwasserzeiten zu erfassen. Als Betriebsdaten standen die Wasserstände von Grundwasserbeobachtungsrohren, von Brunnen und Fluß zur Verfügung. Auf der Grundlage der eindimensionalen stationären Grabenströmung (Fragmentmethode) wurden für zwei Wasserwerke 558 Koeffizienten der inneren Kolmation

berechnet. Sie repräsentieren einen Zeitraum von mehr als 50 Betriebsjahren. Jeder Wert widerspiegelt einen bestimmten, für den Meßzeitpunkt charakteristischen Verdichtungsgrad.

Die Analyse der langjährigen Entwicklung unter Beachtung des Zeitfaktors, der Infiltrationsrate und des Durchflußgeschehens im Fluß offenbart die Abhängigkeiten des Kolmationsvorganges. Die wichtigsten Ergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

1. Die Kolmation ist ein kurzfristiger, instationärer Prozeß. Veränderungen erfolgen innerhalb weniger Monate.
2. Die Kolmation unterliegt einem jahreszeitlichen Rhythmus. Der Verdichtungsgrad ist im Winterhalbjahr größer als im Sommerhalbjahr, was mit jahreszeitlich bedingten biologischen und biochemischen Vorgängen in der Kolmationsschicht gedeutet wird.
3. Die langjährige Entwicklung läuft als eine Folge von Auf- und Abbauphasen ab, die einen Mittelwert überlagern. Starke Schwankunganteile des Infiltrationswiderstandes als kurzzeitige und große Streuungen um den Mittelwert sind charakteristisch. Dauerhafte, irreversible Verdichtungen der Gewässersohle entstehen nicht. Entgegen der bisher verbreiteten Ansicht bildet sich kein quasistabiler Endzustand als Grenzwert der Entwicklung heraus.
4. Die wichtigsten Einflußgrößen sind die kolmationsfördernde Infiltrationsrate und die kolmationshemmende Schleppspannung im Fluß. Ihre Wechselwirkungen bedingen i. w. den Verdichtungsgrad. Im Widerstandswert bei Mittelwasser drückt sich ein Gleichgewichtszustand beider Faktoren aus. Er wird bei Niedrig- und Hochwasser durch die Einschränkung bzw. Verstärkung der Schleppspannung zerstört, wobei die auf- bzw. abbauenden Prozesse - Akkumulation und Suffosion von Kolmationsmasse - überwiegen.

5. Die Kolmation ist sowohl zeit- als auch ortsabhängig. Ursachen des zeitvariablen Verhaltens sind Durchflußschwankungen im Fluß. Hieraus leiten sich zeitliche Bildungsbedingungen der Selbstdichtung ab, die ihren Ausdruck finden
- in den Mittel- und Niedrigwasserverhältnissen, bei denen die Infiltrationsrate relevant ist,
 - in den Hochwasserverhältnissen, bei denen die Schleppspannung des fließenden Wassers Priorität besitzt.

Ursachen der Ortsabhängigkeit sind lokale Bildungsbedingungen, die auf das örtliche Strömungsgefälle zurückzuführen sind. Sie bewirken bei gleichen Durchflüssen an verschiedenen Standorten unterschiedlich große Schleppspannungen, wodurch sich trotz gleichartiger Entstehungsbedingungen (Durchfluß, Infiltrationsrate, Filterkörper) verschieden starke Verdichtungen herausbilden. Werden die lokalen Bedingungen durch anthropogene Eingriffe verändert (z. B. Stauhaltungen), so ändert sich die Größe der Selbstdichtung.

6. Hochwässer haben maßgebenden Einfluß auf den Verdichtungsgrad, da sie innerhalb weniger Tage bis Wochen und unabhängig von der Größe der Infiltrationsrate die Selbstdichtung reduzieren. Abbauraten von im Mittel 50 % werden bereits durch die jährlichen bis zweijährlichen Hochwässer bewirkt. Extreme Hochwässer beseitigen die Kolmation praktisch vollkommen. Nach jedem Hochwasserereignis erfolgt ein beschleunigter Wiederaufbau der Kolmation in Abhängigkeit von der Summe der infiltrierten Wassermenge, der bei Mittelwasser durchschnittlich nach 4 Monaten mit einer der Infiltrationsrate adäquaten Größe abgeschlossen ist. Bei Niedrigwasser setzt sich die Neubildung ohne Einschränkung fort.
7. Bei Mittelwasserverhältnissen bildet sich die Basiskolmation w_{MW} , deren Koeffizient proportional der Infiltrationsrate ist. Ihre Veränderung führt in Monatsfrist zur Änderung des Kolmationswiderstandes.

8. Unter Niedrigwasserverhältnissen entstehen die größten Verdichtungen. Es findet eine zeitlich fortschreitende, ungehemmte Selbstdichtung in Abhängigkeit von der Summe der versickernden Wassermenge statt, so daß im Unterschied zum Mittelwasser auch bei einer Verringerung der Uferate eine weiterführende Verdichtung stattfindet. Die partielle Niedrigwasserkolmation Δw_{NW} baut auf der Basiskolmation auf und vergrößert diese additiv. Sie ist zeitlich begrenzt und wird bereits bei Mittelwasser wieder abgebaut und auf die Basiskolmation zurückgeführt.

Auf der Grundlage eines stochastischen Black-Box-Modells werden für Mittel- und Niedrigwasserbedingungen korrelative Beziehungen zwischen der Infiltration (INPUT) und dem Kolmationseffekt (OUTPUT) bestimmt. Die Transformationsfunktionen für w_{MW} und Δw_{NW} finden Eingang in ein Verfahren zur quantitativen Vorhersage des Kolmationswiderstandes, das auf folgender, für Flüsse mit Erosionsprofil gültigen Formel basiert:

$$w = w_{MW}(q_{Ufer}) + \Delta w_{NW}(\bar{Q}_{Ufer})$$

Für die Elbe als dem wichtigsten Uferfiltratgewässer unseres Landes steht damit ein repräsentativer Algorithmus zur Verfügung, der durch ein Diagramm verifiziert wird. Es eröffnet sich die Möglichkeit, den w-Wert mittel- und niedrigwasserbezogen vorauszusagen und den Vorrat als Mindestuferfiltratmenge bei Niedrigwasser und als Vorratsfunktion für das Mittel-Niedrigwasser-Spektrum zu berechnen. Die Anwendung wird an Beispielen demonstriert.

Der Nutzen der Forschungsergebnisse resultiert aus der Erhöhung der Effektivität der hydrogeologischen Erkundung und der Qualität (Sicherheit) des Vorratsnachweises sowie aus der Intensivierung der Uferfiltratförderung in neu zu errichtenden und bestehenden Wasserwerken. Die Einsparung von Erkundungskosten wird mit 30 %, die Erhöhung des Vorrates mit 50 % eingeschätzt.

Die Forschungsergebnisse sind bereits praxiswirksam. Vorschläge für weiterführende Arbeiten werden unterbreitet.

Literaturverzeichnis

- /1/ ALBIKER, B.
Kolmation eines Korngerüsts: Ein quasi-thermodynamischer Vorgang
Diss. A, Univ. Karlsruhe, 1972
- /2/ AUTORENKOLLEKTIV
Spravočnoe rukowodstvo gidrogeologa - Tom 1
(Handbuch der Hydrogeologie - Band 1)
Verlag Nedra Leningrad, 1967
- /3/ AUTORENKOLLEKTIV
Uferfiltration
Bericht d. BMI-Fachausschusses Wasserversorgung und Uferfiltrat, Bonn, 1975
- /4/ BAMBERG, H.-F.; GARLING, F.
Zur Bestimmung des erforderlichen Aufwandes für die hydrogeologische Erkundung von Grundwasserlagerstättentypen
Diss. A, Bergakad. Freiberg, 1. 1977
- /5/ BANSCHER, E.
Beitrag zur Beurteilung von Kolmationserscheinungen an fließenden Gewässern.
Diss. A, Techn. Univ. Dresden, 1975
- /6/ BETTAQUE, R.
Studie zur künstlichen Grundwasseranreicherung
Diss. A, Techn. Hochsch. Hannover, 1958
- /7/ BEYER, W.; BANSCHER, E.
Zur Erkundungsmethodik der Uferfiltratgewinnung
Ztschr. f. angew. Geol. 22 (1976) 4, 149-154
- /8/ BEYER, W.; BANSCHER, E.
Zur Kolmation der Gewässerbetten bei der Uferfiltration
Ztschr. f. angew. Geol. 21 (1975) 12, 565-570
- /9/ BEYER, W.; BANSCHER, E.
Kolmation von Gewässerbetten
Forschungsbericht Techn. Univ. Dresden, 3. 1975 (unveröff.)
- /10/ BINDEMANN, N.N.; JASWIN, L.S.
Ozenka ekspluatazionnich sapasov podsemnich wod
(Erkundung gewinnbarer Grundwasservorräte)
Verlag Nedra Moskau, 1970

- /11/ BORELI, M.; JOVASEVIC, D.
Clogging of the porous media (Verstopfung poröser Medien)
Association Internationale de Recherches Hydrauliques:
9. Assemblée Generale, Dubrovnik 1961 (Jugoslavien)
- /12/ BOREWSKIJ, B.B.; SAMSONOW, B.G.; JASWIN, L.S.
Metodika opredelenija parametrov wodonosnich
gorizontov po dannim otkaček
(Methoden zur Parameterbestimmung wasserführender Horizonte
mit Hilfe von Pumpversuchen)
Verlag Nedra Moskau, 1979
- /13/ BOTSCHEWER, F.M.
Teorija i praktičeskije metodi gidrogeologičeskich
rasčetov ekspluatazionnich sapasov podsemnich wod
(Theorie und praktische Methoden der hydrogeologischen
Erkundung gewinnbarer Grundwasservorräte)
Verlag Nedra Moskau, 1968
- /14/ BUSCH, K.F.; LUCKNER, L.
Geohydraulik
VEB Deutscher Verlag f. Grundstoffindustrie Leipzig, 1972
- /15/ CHARDABELLAS, P.; HERRMANN, L.
Methodische Untersuchungen zur Hydraulik der Uferfiltration
Forschungsbericht, Inst. f. Wasserwirtschaft Berlin,
10. 1972 (unveröff.)
- /16/ DEMWSKI, R.
Proba porownania skutkow procesow erozji i kolmatacji na
wybranych odcinku wisly gornej
(Versuch des Vergleiches der Erosions- und Kolmationspro-
zesse an einem ausgewählten Abschnitt der oberen Wisla)
Gosp. Wodna Warszawa 41 (1981) 8, 147-149
- /17/ DIETRICH, A.
Korreferat zum Abschlußbericht "Kolmation von Gewässerbetten"
VEB Hydrogeologie Nordhausen, 1. 1986 (unveröff.)
- /18/ EDLICKA, B.
Issledovanie procesa kolmatirovanija i ego vlijanie na
ispolzovanie prirechnych podzemnych wod
(Untersuchung des Kolmationsprozesses und seinen Einfluß
auf das Grundwasser unterhalb eines Flusses)
Wiss. Forschungsinstit. d. Wasserwirtschaft, Prag (1975)
- /19/ ESCHWEILER, W.
Die Wasserspiegel- und Sohlensenkung am Niederrhein
Bes. Mitt. z. Dt. Gewk. Jahrb. 7 (1952), Koblenz

- /20/ EYRICH, A.
Gesetzmäßigkeiten der Sedimentation in Gewässern und ihre
Bedeutung für die Uferfiltration
Ztschr. f. angew. Geol. 22 (1976) 10, 471-474
- /21/ FRENETTE, M.
Colmatage naturel d'un milieu alluvionnaire
(Natürliche Kolmation eines Anschwemmungsmediums).
15. Kongr. d. Intern. Gesellsch. f. hydraulische Forschung
Berichte Istanbul 3 (1973), 193-202
- /22/ FRISCHHERZ, H.
Probleme der Uferfiltration und Grundwasseranreicherung mit
besonderer Berücksichtigung des Wiener Raumes
Wiener Mitt. Wasser, Abwasser, Gewässer 1979, Bd. 29
- /23/ FÜGNER, D.; SCHIRPKE, H.
Neue Ergebnisse der Hochwasserberechnung für den Elbstrom
in Dresden
WWT 34 (1984) 8, 189-191
- /24/ GELDNER, P.
Deterministische und stochastische Methoden zur Bestimmung
der Selbstdichtung von Gewässern
Diss. A, Univ. Karlsruhe, 1980
- /25/ GLAZIK, G.
Veränderungen der Wasserspiegel und Sohlenlage der Elbe
WWT 14 (1964) 11, 332-337
- /26/ GONSOWSKI, P.
Selbstdichtung von Gewässern
Wasser und Boden 35 (1983) 9, 404-409
- /27/ GRABS, W.
Beitrag zur Beschreibung von Kolmationserscheinungen in
einem organisch belasteten Kleingewässer
Beitr. z. Hydrologie (1981), Sonderheft 2, 293-312
- /28/ GRIGORJEW, W.M.
Teoretičeskie osnovy rasčeta infiltracionnich vodozaborow c
učetom zailenija rečnych rusel
(Die theoretischen Grundlagen der Berechnung von Brunnen-
galerien unter Berücksichtigung der Verschlämmung von
Flußbetten)
Vodosnabzenie i sanitarnaja tehnika, Moskau (1960) 6, 18 ff.
- /29/ HANSEL, N.
Über die natürliche Selbstdichtung von Gewässern mit porösem
Untergrund und ihre hydrologisch-wasserwirtschaftlichen Aus-
wirkungen
Wiss. Ztschr. Hochsch. f. Bauwesen Leipzig 4 (1967), 29-41

- /30/ HANSEL, N.
Über die natürliche Selbstdichtung von Vorflutern mit porösem Untergrund unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse im mittleren Spreengebiet
Diss. A, Hochsch. f. Bauwesen Leipzig, 1967
- /31/ HEEGER, D.
Methodik der Erkundung von Uferfiltratvorräten
VEB Hydrogeologie Nordhausen, 12. 1973 (unveröff.)
- /32/ HEEGER, D.; KRUG, O.; EMSHOFF, B.
Arbeitsrichtlinie Erkundung Uferfiltratvorräte
VEB Hydrogeologie Nordhausen, 12. 1974
- /33/ HEEGER, D.
Richtlinie Bestimmung des Koeffizienten der Kolmationsentwicklung in Fließgewässern
VEB Hydrogeologie Nordhausen, 2. 1986 (unveröff.)
- /34/ HELLMANN, H.; BRUNS, F.J.
Die chemische Zusammensetzung der ungelösten Stoffe des Rheins
Deutsch. Gewk. Mitt. 12 (1968) 6
- /35/ HERRMANN, L.; BEYER, W.
Einfluß der Kolmation auf die Uferfiltratgewinnung
Forschungsbericht, Inst. f. Wasserwirtschaft Berlin, 11. 1973. (unveröff.)
- /36/ HOLLUTA, J.; BAUER, L.; KÖLLE, W.
Über die Einwirkung steigender Flußwasserverschmutzung auf die Wasserqualität und die Kapazität der Uferfiltrate
GWF-Wasser/Abwasser 109 (1968), 1406-1409
- /37/ HULMAN, R.
Zmenšovanie priпустonosti zemin kolmatcion
(Verringerung der Bodendurchlässigkeit durch Kolmation)
Vodni hospodarstvi, Prag (1965) 12, 14-18
- /38/ HUPPMANN, O.; KOHM, J.
Naturversuche zum Austausch zwischen Oberflächen- und Grundwasser
Ztschr. d. Deutsch. Geol. Ges. 131 (1980)
- /39/ KAUTZ, K.
Analyse der Wechselbeziehungen von Abflußverhalten und Bettbildung der Elbe von der Staatsgrenze zur CSSR bis Riesa
Dipl.-Arbeit, Techn. Univ. Dresden, 1. 1985

- /40/ KAZMIEROWICZ, E.; PRUSSAK, W.; SZCZUREK, J.
Badania hydrogeologiczne w dolinie Bialej Przemszy
(Hydrogeologische Untersuchungen im Tal der Biala Przemsza)
Preglad Geol. Warszawa (1979), 8, 452-457
- /41/ KLUDIG, K.H.
Die Gewinnung von uferfiltriertem Grundwasser und der Einfluß
der Rheinverschmutzung
GWF-Wasser/Abwasser 109 (1968), 1401-1405
- /42/ KONTUR, J.
Apartizuresü vizbeszerzes nehany stochasztikus modellje
(Einige stochastische Modelle der uferfiltrierten Wasser-
gewinnung)
Konferenzmaterial, Budapest (1970), 1-14
- /43/ KUSTERMANN, H.
Der Einfluß der Organismen in Kiesschotterböden der Flüsse
auf die Wasserversickerung
Gas, Wasser, Abwasser (1962), 25-34 (früher Schweizer
Monatsbulletin)
- /44/ LÖFFLER, H.
Stand und Entwicklungstendenzen bei der Anwendung von Infil-
trations- und Uferfiltratanlagen
WWT 35 (1985) 4, 78-81
- /45/ LUCKNER, L.; SCHESTAKOW, W.M.
Migrationsprozesse im Boden- und Grundwasserbereich
Verlag Nedra Moskau, 1986
VEB Deutscher Verlag f. Grundstoffindustrie Leipzig, 1986
- /46/ LUCKNER, L.; BEYER, W.; SCHREIBER, G.
Konzeptionelles Blockmodell für die Prognose der Rohwasser-
temperatur einer Uferfiltratanlage
Beitr. z. wiss. Konferenz "Simulation gekoppelter Trans-
port-Austausch- und Umwandlungsprozesse im Boden- und Grund-
wasser",
Techn. Univ. Dresden, 11. 1979
- /47/ MINKIN, E.L.
Vsaimosvjas podsemnich i povernostnich wod i ee suačenie pri
rečenij nekotorig hidrogeologie českich i wodočosaistvennich
sadač.
(Die Wechselbeziehungen zwischen Grund- und Oberflächenwasser)
Adad. d. Wissensch. d. UdSSR, Inst. f. Wasserprobleme,
Moskau, 1973
- /48/ MITCHEL
Sandfiltration
Water Resaerch 1 (1967), 231 ff.

- /49/ MÜLLER, G.; REIFERT, J.
Ausführungen über die Erosionsbeständigkeit von Lockergesteinen von Wasserlaufbetten
WWT 23 (1973), 3 und 4, 90-93, 137-143
- /50/ NAGY, J.
Csatorna altalajok kolmataciojanak szamitasen
(Berechnung der Kolmation von Kanalböden)
Hidrologiai Közlöny Budapest (1965) 11, 503-510
- /51/ NEMECEK, E.P.
Beeinflussung der Grundwasserqualität durch Flußinfiltration
Wiener Mitt. Wasser, Abwasser Gewässer 1981, Bd 40, G1-G28
- /52/ NESTLER, W.
Erfahrungen und Entwicklungstendenzen bei der Bewirtschaftung von Grundwasserfassungen
WWT 35 (1985) 4, 88-89
- /53/ OFFERHAUS, P.
Horizontale Fassungsbrunnen in Theorie und Praxis
Diss. A, Univ. Karlsruhe, 1961
- /54/ ÖLLÖS, G.
A partiszuresü vizszerzés problémái
(Probleme der uferfiltrierten Wassergewinnung)
Bericht II. Kongreß Wassergüte u. Wassertechnologie, Budapest (1970), 1-22
- /55/ PERLINA, A.M.
Jamnenie kačestva vody pri es infiltracij
(Änderung der Wassergüte bei Versickerung)
Vodosnabzenie i sanitarnaja tehnika, Moskau (1971), 8, 1-4
- /56/ PLOTNIKOW, N.I.; PLOTNIKOW, N.A.; SÜTSCHEW, K.I.
Gidrogeologičeskiye osnovi iskusstvennogo wospolnenija sapasov podsemnich wod (Hydrogeologische Grundlagen für die künstliche Grundwasseranreicherung)
Verlag Nedra, Moskau, 1978
- /57/ REINHOLD, D.
Korreferat zum F/E-Abschlußbericht "Untersuchung der Kolmation von Gewässerbetten an bestehenden Uferfiltratfassungen zur Ermittlung objektiver Kennwerte für die Bemessung neuer Uferfiltratfassungen - Teilthema Fließgewässer"
WWD Obere Elbe-Neiße Dresden, 1. 1986 (unveröff.)
- /58/ VAN RIESEN, S.
Uferfiltratverminderung durch Selbstdichtung an Gewässersohlen
Diss. A, Univ. Karlsruhe, 1975

- /59/ ROLKE, D.
Vergleichende Untersuchungen an Trocken- und Überstaufiltern zum Mechanismus der Partikelablagerung in Kiesbettfiltern
Diss. A, Univ. Karlsruhe, 1973
- /60/ SONTHEIMER, H.
Experience with Riverbank Filtration along the Rhine River
(Versuche mit Uferfiltration entlang des Rheins)
Amer. Water Works Assoc. Washington 72 (1980) 7, 386-390
- /61) SOSINSKIJ, M.I.; ŮŠAKOW, J.M.; ŠABALIN, A.F.
Opyt poverchnostonogo obvognenija infiltracionnogo vodozabora
(Versuche der künstlichen Grundwasseranreicherung bei einer Uferfiltratgewinnungsanlage)
UdSSR, keine näheren Angaben
- /62/ TIPPNER, M.
Über den Einfluß der Sohlenerosion
Deutsch. Gewk. Mitt. 17 (1973)
- /63/ WERNER, I.
Ein Beitrag zur hydraulischen Bemessung von Uferfiltratfassungen unter besonderer Berücksichtigung des Schwebstoffgehaltes der Oberflächengewässer
Diss. B, Techn. Univ. Dresden, 1970
- /64/ ZELEZNIJAKOW, G.V.
O rasket, proposknojo sposobnosti rušl pri izmenenij gidravličeskich soproti leninij po sirine potoka
(Über die Berechnung der Durchlaßfähigkeit von Flußbetten bei Änderung der Strömungswiderstände in der Stromweite)
Gidrotechničeskoe stroitelstvo, Moskau 41 (1971) 8, 27-29
- /65/ ZIPFEL, K.
Grundwassergewinnung im Bereich von Flüssen mit selbstgedichteter Sohle
Diss. A, Univ. Karlsruhe, 1973
- /66/ TGL 23989
Unterirdisches Wasser, Terminologie, Formelzeichen und Einheiten (Ausg. 1983)
- /67/ WAPRO, 1.42 / 0.1 bis 0,4
Bemessungsgrundlagen für Brunnen von Grundwassergewinnungsanlagen (Ausgabe 2. 1971)
Werkstand. d. VEB K. Wassert. u. Proj. Wawi Halle
- /68/ WAPRO 1.52 / 0.1 bis 0.3
Wassergewinnung, Uferfiltratfassungen (Ausgabe 3. 1978)
Werkstand. d. VEB K. Wassert. u. Proj. Wawi Halle

Ein ausführliches Literaturverzeichnis mit 178 Titeln, davon 97 internationale Titel, liegt beim Verfasser zur Einsichtnahme vor.

Verzeichnis der verwendeten Symbole

<u>Symbol</u>	<u>Maßeinheit</u>	<u>Bedeutung</u>
B	m	Speisungsfaktor
C _s	-	Schiefheitsmaß d. Häufigkeitsverteilung von Meßwerten nach JOHANNSSON
D	Monat	Zeitdauer
F (w)	-	Funktion d. empirischen Wahrscheinlichkeitsverteilung des Kolmationskoeffizienten
H	m	Grundwassermächtigkeit, hydraulische Druckhöhe
HHW	m, m NN	Höchster Hochwasserstand im Fluß
I	-	Gefälle
I _w	%	Index z. Kennzeichnung der relativen Veränderung des Kolmationskoeffizienten
L'	m	Länge des Grundwasserleiterabschnittes am Gewässerrand mit gekrümmtem Stromlinienverlauf
L ₁	m	Abstand zweier GWBR auf einer Stromlinie zwischen Gewässer und Brunnenfassungen
L _{Ufer}	m	Länge des infiltrierenden Gewässerufers
ΔL	m	Fiktive Zusatzlänge infolge hydraulischer Widerstände an der Gewässerkontur
ΔL ₁	m	Fiktive Zusatzlänge infolge hydraulischer Unvollkommenheit der Gewässerberandung
ΔL ₂	m	Fiktive Zusatzlänge infolge Kolmation des Gewässerbettes
M	m	Grundwasserleitermächtigkeit
MW	m, m NN	Mittelwasserstand im Fluß
MHW	m, m NN	Mittlerer Hochwasserstand im Fluß
MNW	m, m NN	Mittlerer Niedrigwasserstand im Fluß
MQ	m ³ /s	Mittelwasserdurchfluß im Fluß
MHQ	m ³ /s	Mittlerer Hochwasserdurchfluß im Fluß
MNQ	m ³ /s	Mittlerer Niedrigwasserdurchfluß im Fluß
NNW	m, m NN	Niedrigster Niedrigwasserstand im Fluß
NQ _{30/10}	m ³ /s	Niedrigwasserdurchfluß im Fluß mit einer Dauer von 30 aufeinanderfolgenden Tagen, der i. Mittel aller 10 Jahre erreicht oder unterschritten wird
P	m · d	Hochwasserpotenz im Fluß; Produkt aus Anzahl d. Hochwassertage und dem zugehörigen Wasserstand

<u>Symbol</u>	<u>Maßeinheit</u>	<u>Bedeutung</u>
Q	m ³ /s	Durchfluß
Q _E	m ³ /s	Fördermenge eines Brunnens oder einer Brunnengruppe
\bar{Q}	m ³ /s·m ²	Flächenbelastung. Summe der uferfiltrierten Wassermenge pro Quadratmeter infiltrierender Gewässerbettfläche innerhalb eines bestimmten Zeitabschnittes
Q _{Ufer}	m ³ /d	Uferfiltratmenge
\bar{Q}_{Ufer}	m ³ /m	Uferbelastung. Summe der uferfiltrierten Wassermenge innerhalb eines bestimmten Zeitabschnittes (Monat) bezogen auf eine Länge von einem Meter des infiltrierenden Gewässerufers
S	%	Speicherkoeffizient des Grundwasserleiters
T	m ² /s	Transmissibilität des Grundwasserleiters
U	m	Benetzter Umfang des Flußquerschnittes
W	m, cm	Wasserstand im Fluß, Höhe Wasserspiegel über Pegel-Null
b	m	Flußbreite
c _T	g/s·m ²	Transportkonzentration, Transportrate; Produkt aus Infiltrationsgeschwindigkeit v _i und Feststoffkonzentration c _o
c _o	g/m ³	Feststoffkonzentration im Wasser
d		Variationsbreite bzw. Spannweite einer Anzahl von Meßwerten
d _f	mm	Filterkorndurchmesser
d _k	mm	Korngröße des Kolmatanten
h	m	Standrohrspiegelhöhe, Grundwasserpotential über Grundwassersohle
Δh	m	Differenz zweier Standrohrspiegelhöhen
h _m	-	Absolute Häufigkeit einer empirischen Verteilung von Meßwerten
h _s	m	Schlammhöhe der äußeren Kolmation
k _f	m/s	Filtrationskoeffizient des Grundwasserleiters
k' _f	m/s	Filtrationskoeffizient der kolmatierten Schicht
l _f	m	Tiefe eines Versuchsfilters
m _k , Δm _k	m	Mächtigkeit der kolmatierten Schicht
n	-	Anzahl (z. B. von Meßwerten)
q _{Ufer}	m ³ /m·d	Uferrate. Uferfiltrierte Wassermenge pro Tag bezogen auf eine Länge von einem Meter des infiltrierenden Gewässerufers

<u>Symbol</u>	<u>Maßeinheit</u>	<u>Bedeutung</u>
q_i	$m^3/m^2 \cdot d, m/d$	Infiltrationsrate. Uferfiltrierte Wassermenge pro Tag und Quadratmeter infiltrierender Gewässersohlfäche
r	-	Korrelationskoeffizient
s	-	Standardabweichung, Streuung
s^2	-	Varianz
t	a, Monat, d	Zeit
v	%	Variationskoeffizient
$v_{\text{Fluß}}$	m/s	Fließgeschwindigkeit im Fluß
v_i	m/s, m/d	Infiltrationsgeschwindigkeit
v_N	m/s, mm/d	Grundwasserneubildungsrate
v_s	m/s	Fließgeschwindigkeit an der Sohle des Flusses
w	s	Kolmationskoeffizient. Infiltrationswiderstand. Kolmationswiderstand
$w_{\text{max}}, w_{\text{min}}$	s	Maximaler bzw. minimaler Kolmationskoeffizient
\bar{w}	s	Arithmetischer Mittelwert einer Anzahl von Werten des Kolmationskoeffizienten
\tilde{w}	s	Statistischer Zentralwert einer Anzahl von Werten des Kolmationskoeffizienten
w_a, w_e	s	Kolmationskoeffizient am Anfang/ am Ende einer Entwicklungsphase
Δw	s	Differenz des Kolmationskoeffizienten zwischen dem Anfangs- und Endwert einer Entwicklungsphase
$w_{\text{MW}}, w_{\text{NW}}$	s	Kolmationskoeffizient bei Mittel-/Niedrigwasserverhältnissen im Fluß
Δw_{NW}	s	Partieller Niedrigwasseranteil der Kolmation
x, y	m	Koordinaten
ϕ	m^2	GIRINSKIJ - Potential
τ	N/m^2	Schleppspannung im Fluß

Häufig verwendete Abkürzungen

Br	Brunnen
GWBR	Grundwasserbeobachtungsrohr
GWL	Grundwasserleiter
LP	Lattenpegel
NN	Normal-Null
PN	Pegel-Nullpunkt beim Lattenpegel
WW	Wasserwerk