Abteilung I
Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen
(für gewerbliche und Freizeitschiffahrt)

zu Thema 5:

Thema des zweiten deutschen Berichts

Staustufe Hessigheim: Untergrundverbesserung und -sicherung in fließendem Grundwasser

Berichterstatter:

Baudirektor Dipl.-Ing. Karl-Heinz Rätzke, Wasser- und Schiffahrtsdirektion Südwest, Mainz

Prof. Dr.-Ing. Walter Wittke, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen

Dr. rer.nat. Heinrich Woszidlo, Wasser- und Schiffahrtsdirektion Südwest, Mainz

Zusammenfassung

Die Neckarstaustufe Hessigheim wurde in den Jahren 1949 bis 1952 über dem gipshaltigen mittleren Muschelkalk errichtet. Durch strömendes Grundwasser wurde im Laufe der Jahre ein Teil des Gipses gelöst und forttransportiert. Die dadurch entstandenen Hohlräume im tiefen Untergrund und das Nachbrechen darüberliegenden lockeren Gesteins hat zur Gefährdung der Bauwerke durch Senkungen in Höhe der Gründungssohle bzw. plötzliche Einbrüche geführt. Zur Sanierung waren die Hohlräume unter dem Bauwerk und im tiefen Untergrund zu verfüllen und zur Erhaltung des sanierten Zustandes der Grundwasserstrom unter den Bauwerken zu unterbrechen. Das letztgenannte Ziel wurde durch einen Dichtungsschleier erreicht. Zur Verfüllung der Hohlräume wurde eine erosionstabile Zementpaste entwickelt, die während der Einbringung nicht durch das strömende Grundwasser ausgewaschen wird. Der Betrieb der Anlage war während der Sanierung nicht unterbrochen.

Inhalt

1 Beschreibung der Staustufe
2 Anlaß der Maßnahme
3 Erkundung des Untergrundes
4 Durchführung der Maßnahme
5 Erfolg der Maßnahme
6 Ausblick

Literatur

1. Beschreibung der Staustufe

Der Neckar ist ein rechter Nebenfluß des Rheins. Er entspringt im Schwarzwald und mündet nach einer Lauflänge von 367 km bei Mannheim in den Rhein. Dabei überwindet er einen Höhenunterschied von 611 m.

Schon seit der Römerzeit wird der Fluß für die Schiffahrt genutzt. Nach Aufkommen maschineller Antriebe in der Schiffahrt entwickelte sich zunächst eine Kettenschleppschiffahrt auf dem Neckar. In den Jahren 1921 bis 1968 wurde die untere 203 km lange Neckarstrecke zwischen Mannheim und Plochingen staugeregelt.

In den Jahren 1949 bis 1952 wurde 143 km oberhalb der Mündung, als 16. von 27 Staustufen, die Staustufe Hessigheim errichtet. Die Hubhöhe beträgt 6,20 m.

In der Mitte des Flusses befindet sich die Wehranlage mit drei Feldern von je 22,60 m lichter Weite. Als Verschlußkörper dienen in den beiden Seitenöffnungen

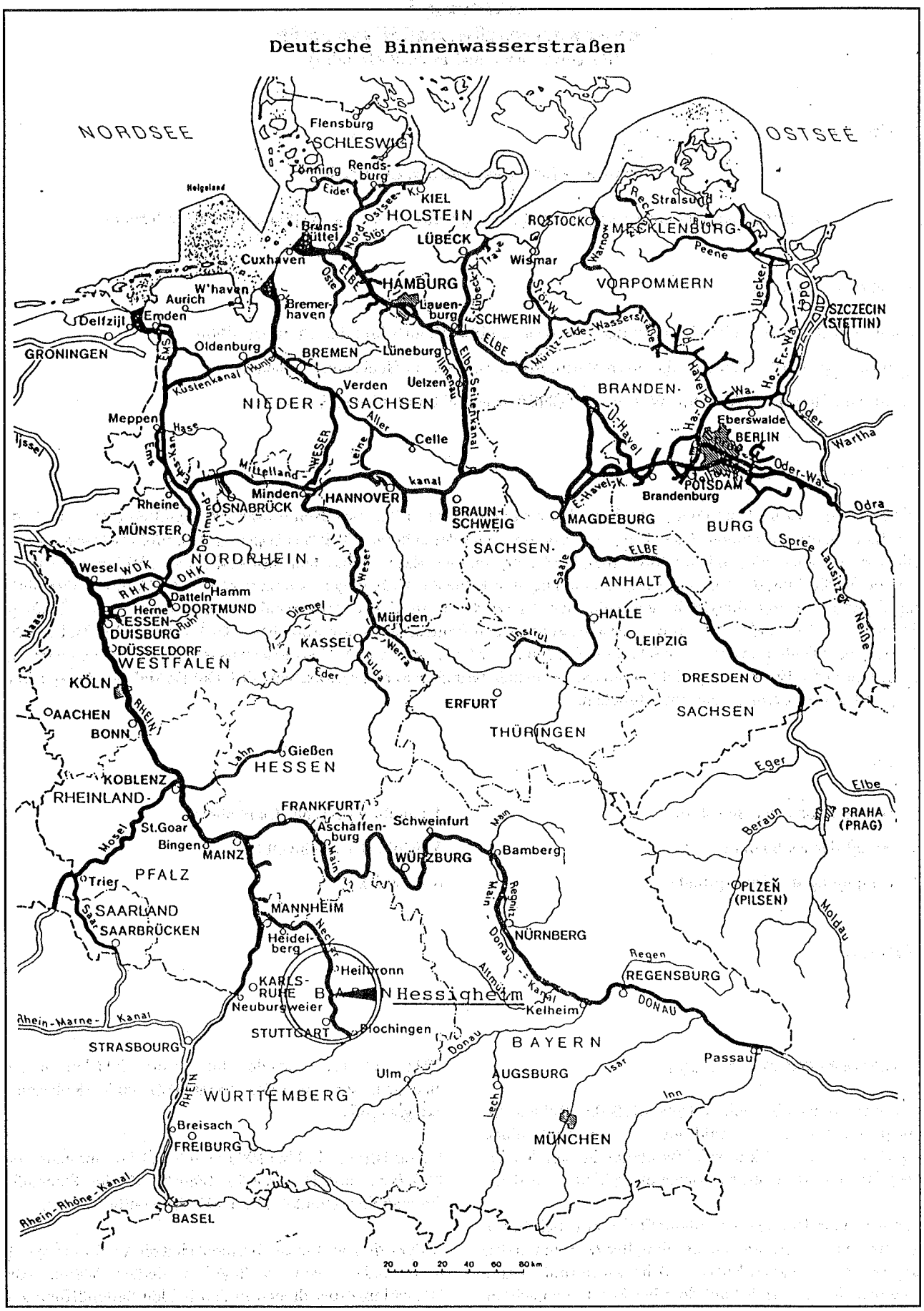

Bild 1: Lage des Bauwerkes

6,30 m hohe Rollschütze und in der Mittelöffnung ein 4,60 m hohes Rollschütz mit einer Aufsatzklappe.

An das Wehr schließt sich zum rechten Ufer hin die Schleusenanlage mit zwei Kammern von 110 m Länge und 12 m Breite an. Die linke Kammer wurde in Massivbauweise errichtet, während bei der rechten ein Jahrzehnt später ausgeführten Kammer die rechte Kammerwand wegen der nachstehend beschriebenen Untergrundprobleme in Spundwandbauweise ausgeführt wurde. Als Verschlußorgane dienen an beiden Ober- und Unterhäuptern stählerne Stemmtore. Die Füllung und Entleerung der Kammern erfolgt über Schütze in den Toren.

Am linken Ufer schließt sich an das Wehr das Kraftwerk an, das mit zwei Kaplanturbinen ausgestattet ist.

Unterhalb von Kraftwerk und Wehr und über das Unterhaupt der Schleusen verläuft eine Straßenbrücke, die gleichzeitig Bedienungssteg der Wehranlage ist.

Schleusenkammern, Wehr und Kraftwerk wurden flach im Terrassenkies gegründet. Lediglich die besonders empfindlichen Schleusenhäupter erhielten eine von Spundwänden umschlossene Pfahlgründung. Insgesamt waren zunächst zur Umschließung der Flachgründungen nur kurze Spundwandsporne ausgeführt worden, die den Sickerweg verlängern sollten. Nachdem bereits während der Bauarbeiten Senkungen eingetreten und Hohlräume im Untergrund festgestellt worden waren, wurde oberhalb des Kraftwerkes und der Wehranlage sowie um die Schleuse herum eine bis in den Felshorizont einbindende tiefe Spundwand gerammt. Schon während der Bauausführung setzte sich das Kraftwerk über die Diagonale um 16 cm nach Unterstrom und mußte nach Umspundung durch Zementinjektionen wieder angehoben werden.

2. Anlaß der Maßnahme

Bereits während der Errichtung der Staustufe traten Erdfälle in und an der Baugrube auf und wurden Hohlräume im Untergrund festgestellt. Zu Bedenken gab auch die vorbeschriebene Setzung des Kraftwerksfundamentes Anlaß. Als erste Reaktion darauf ist die Umschließung mit der in den Felshorizont reichenden Spundwand noch während der Bauphase zu sehen. Auch die geänderte Baukonzeption der rechten Kammerwand der landseitigen Schleusenkammer trägt den Beobachtungen Rechnung.

Die laufende Beobachtung der Bauwerke zeigte deutliche Senkungserscheinungen aller Bauwerksteile, jedoch ein unterschiedliches Senkungsmaß. So bildete sich z. B. ein Durchhang der Schleusenkammern im mittleren Bereich heraus. Dies läßt darauf schließen, daß die Häupter mit ihrer Pfahlgründung nicht so gefährdet waren wie die flach gegründeten Kammern. Auch bei den Wehrpfeilern stellte sich im Laufe der Zeit eine Schräglage ein.

Im Umfeld der Stauanlage waren seit Jahren immer wieder Dolinen beobachtet worden, die auf Hohlräume im Untergrund hinwiesen. Die Feststellung einer Doline von 8 Metern Durchmesser unter Wasser, unmittelbar im Bereich des linken Wehrfeldes, im Jahre 1982 war Anlaß, mit höchster Dringlichkeit eingehende Untersuchungen anzustellen und ein Sicherungskonzept für die Stauanlage zu erarbeiten.

3. Erkundung des Untergrundes

Die Ursachen der beschriebenen Erscheinungen waren in einem Zusammenwirken des Bauwerks mit Untergrund und Grundwasser zu suchen. Zur Klärung der Kausalität mußten zunächst die geologischen Rahmenbedingungen geklärt werden.

Aus Karten und sonstigen Unterlagen ergab sich folgendes:

Das Untersuchungsgebiet ist Teil der süddeutschen Großscholle. Sie war im Erdmittelalter von einem Flachmeer bedeckt. Seine Ablagerungen bilden heute den Festgesteinsuntergrund in der Umgebung von Hessigheim. Es handelt sich um Sedimentgesteine der Abteilung Muschelkalk in der Triasformation.

Nach geologischen Detailkarten stehen im Höhengebiet außerhalb des Neckartales Kalkbänke des oberen Muschelkalks an. Mit ihrer noch erhaltenen Mächtigkeit von etwa 40 m in der Umgebung des Ortes bilden sie auch den größeren Teil der Talhänge des Flusses. Sie werden unterlagert von einer Wechselfolge aus Dolomit, Anhydrit und Mergelsteinen, in deren unterem Teil Steinsalzflöze vorkommen. Diese Gesteine gehören dem mittleren Muschelkalk an und reichen bis etwa 55 m unter den Neckarwasserspiegel. Darunter folgen Mergelsteine des unteren Muschelkalks.

Die Gesteinspakete wurden durch tektonische Vorgänge wenig gestört und sollten deshalb etwa horizontal gelagert sein.

Die Talsohle des Neckars konnte demnach in den Schichten des mittleren Muschelkalks erwartet werden. Über ihr sollten Flußablagerungen aus Sanden und Kiesen in einigen Metern Stärke anstehen.

Wegen des Porenraumes der Kies-Sandgemische und der Ausbildung von Lagerfugen sowie des fundamentalen Kluftsystems im Festgestein war mit einer insgesamt

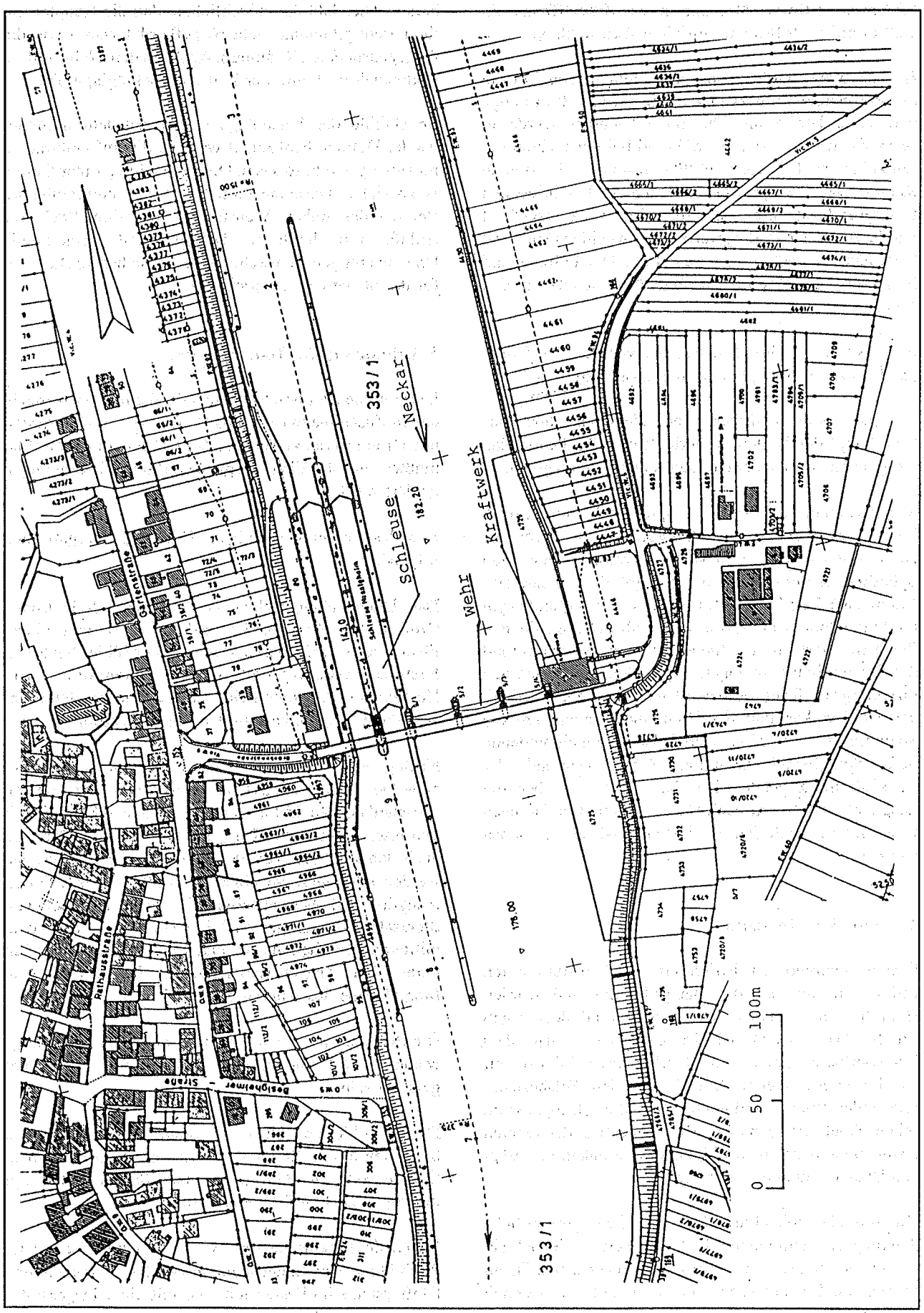

Bild 2: Lageplan

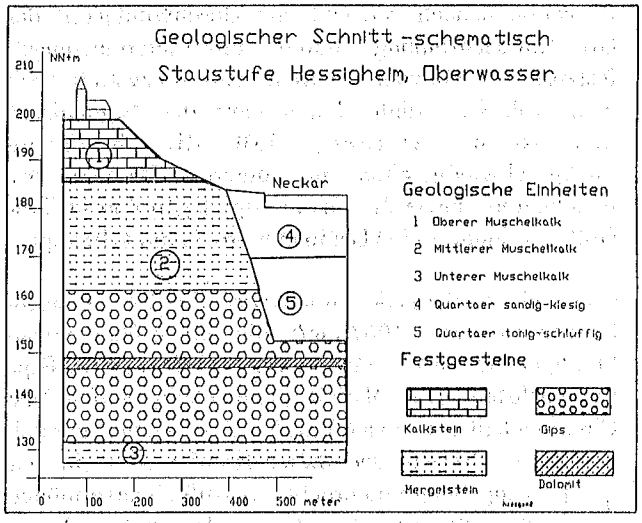

Bild 3: Geologischer Schnitt

vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit zu rechnen, welche die Ausbildung eines flußbegleitenden Grundwasserstroms erlaubte.

Aus geologischen Berichten war bekannt, daß unter diesen Verhältnissen die Salzlager, deren ursprüngliche Mächtigkeit einige Dekameter betragen hatte, mindestens zum größten Teil in den jüngsten Abschnitten der Flußgeschichte weggelöst worden waren.

Dieser nicht gleichmäßige Vorgang führte durch das differenzierte Nachgeben der darüberliegenden Schichten neben der Ausbildung neuer Klüfte zur Aufweitung bereits vorhandener.

Trotz der etwa gleichzeitig anzusetzenden Umwandlung von Anhydrit in Gips, die mit einer Volumenvermehrung verbunden ist, resultierte daraus eine erhöhte Gebirgsdurchlässigkeit, die nicht nur die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers erhöhte, sondern auch weitere dem Angriff des Wassers ausgesetzte Oberflächen schuf.

Beide Vorgänge zusammen führten zum vermehrten Weglösen dagegen empfindlicher Gesteine, also vor allem des ursprünglich etwa 35 m starken Gipses, aber auch von Teilen der Kalk- und Dolomitschichten.

Es handelt sich also um einen sich selbst verstärkenden Vorgang, dessen Intensität nach Errichten der Staustufe Hessigheim durch die sperrstellenbedingte Erhöhung des Fließgefälles im Grundwasser noch wesentlich erhöht worden ist.

Danach war es wahrscheinlich, daß der Baugrund unter der Staustufe größere Lösungshohlräume enthielt. Eine Schwächung seiner Tragfähigkeit durch das Einstürzen solcher Räume mußte angenommen werden.

Intensive weitere Untersuchungen waren dringend erforderlich.

Wegen der durch die oben geschilderten Vorgänge erworbenen ungleichmäßigen Schichtenlagerung hatten sie im ersten Schritt aus einem engmaschigen Netz von Kernbohrungen zu bestehen. Neben dem Untergrundaufbau war dabei auch die Wasserwegigkeit des Gebirges und - nach Möglichkeit - die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers zu bestimmen. Die Verfüllung der Bohrlöcher mußte so ausgeführt werden, daß nicht nur keine zusätzlichen Schwachstellen im Untergrund verblieben, sondern eine Verbesserung erzielt werden konnte. Daraus sollten auch Hinweise auf eine technisch und wirtschaftlich optimierte Art der Sanierung gewonnen werden.

Im Bereich der Wehrfelder wurden im ersten Schritt 17 Kernbohrungen mit Tiefen zwischen 30 und 40 m niedergebracht. Unter der Neckarsohle bzw. unter dem Bauwerksbeton standen zunächst Flußablagerungen in 3 bis 6 m Stärke aus Sand-Kiesgemischen an.

Ihr Liegendes besteht aus bindigem Material, das eckige Kalk- und Dolomitsteine enthält. Die Konsistenz ist weich bis steif, örtlich breiig. Es handelt sich um Verwitterungslehme, die wohl überwiegend aus Rutschmassen bestehen und Schichtstärken zwischen 5 und 7 m aufweisen.

Darunter folgen Ton-Schluffgemische von dunkelgrauer Farbe und mit überwiegend steifer Konsistenz. Ihr Gehalt an Tonstein- und einzelnen Gipsbrocken wies sie als Lösungsrückstand (=Residualton) aus. Die Schichtstärke unterliegt örtlich starken Schwankungen zwischen 1,6 und 9,8 m.

Das Festgestein beginnt mit einer Gipsschicht (= oberer Gips) von hellgrauer Farbe und geringem Tongehalt. In der Nähe seiner Obergrenze liegt das Gestein oft brockig vor, Kluftwandungen tragen Lösungsspuren (Karren). Die Schichtstärke beträgt im Oberwasser etwa 3 m, im Unterwasser der Staustufe dagegen im Mittel 7 m.

Darunter folgt ein graubrauner Dolomit, der in der Nähe des rechten Flußufers eine etwa 1 m starke Zwischenlage aus hellem Gips enthält. Wo diese Lage fehlt, ist das Gestein meist brockig und wenig fest. Die Schichtstärken schwanken dementsprechend zwischen 1,8 und 3,0 m.

Das Liegende wird aus dunklem, stark tonhaltigem Gips mit Tonsteinlagen (= unterer Gips) gebildet. Bankungsfugen enthalten Tonbestege, örtlich kommen Linsen aus reinem Gips vor.

Die Felsoberkante ist erwartungsgemäß stark unterschiedlich ausgebildet und liegt im Unterwasser der

Staustufe mit etwa NN + 160 m um 4 - 5 m höher als im Oberwasser. Dies weist darauf hin, daß Lösungserscheinungen im Festgestein verstärkt nach dem Bau der Staustufe aufgetreten sind.

Dies wird erhärtet durch die Tatsache, daß an mehreren Stellen direkt unter den Fundamenten Hohlräume von einigen Dezimeter Stärke gefunden wurden. Fehlstellen im Gebirge selbst äußerten sich in einem Durchfallen des Bohrgestänges. Solche fanden sich überwiegend im Bereich des Residualtons, im oberen Gips und im Dolomit. Ihre mittlere Gesamthöhe betrug 1,4 m. Sie zeigt das hohe Sackungspotential des Baugrundes.

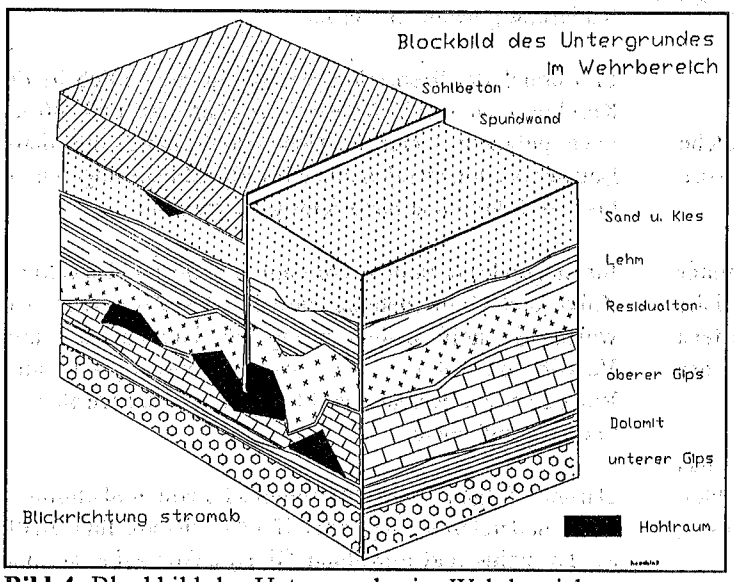

Bild 4: Blockbild des Untergrundes im Wehrbereich

Im oberen Teil des Residualtones und im Verwitterungslehm befinden sich Stellen mit außerordentlich ungünstigen weichen bis breiigen Konsistenzen. Sie werden als Hinweis dafür gewertet, daß dort Teile des Hangenden bereits in Hohlräume eingedrungen waren.

Es stellte sich heraus, daß die Unterkante des Dolomits etwa eine Ebene bildet. Daraus ist abzuleiten, daß die ungleichmäßigen und deshalb für das Bauwerk besonders gefährlichen Lösungserscheinungen hauptsächlich in Schichten über dem unteren Gips auftreten.

Diese Annahme wird durch die Ergebnisse von Durchlässigkeitsuntersuchungen bestätigt. Sie wurden als Wasserabpreß- und Schluckversuche in den Bohrungen durchgeführt. Für den unteren Gips errechnete sich ein mittlerer k_f-Wert von 5 $\cdot 10^{-6}$ m/s, während sich im Dolomit mit 24 $\cdot 10^{-6}$ und im oberen Gips mit 14 $\cdot 10^{-6}$ m/s deutlich höhere Werte ergaben.

Es wurde danach versucht, die Geschwindigkeit der Grundwasserströmung durch Flowmetermessungen festzustellen. Obwohl die Meß- und Auswertetechnik nicht voll befriedigte, konnte aus den Ergebnissen geschlossen werden, daß die höchsten Fließgeschwindigkeiten im unteren Bereich des Residualtons sowie im oberen Gips lagen und in ihrer Größenordnung einige Dezimeter pro Sekunde betrugen.

Chemische Analysen des Grundwassers zeigten mit einem Spitzenwert von 1067 mg/l die erwarteten hohen Sulfatgehalte. Im allgemeinen waren sie im unteren Gips am höchsten. Der überall gleichmäßig vorhandene Chloridgehalt von etwa 60 mg/l stammt wahrscheinlich aus Resten der Steinsalzvorkommen in der Umgebung und erhöht das Aufnahmevermögen des Wassers für Gips, das unter diesen Verhältnissen bei 2000 mg/l liegt. Die Grundwässer haben also noch ein beträchtliches Lösungspotential.

Die während der Bohrarbeiten durchgeführten Grundwassermessungen ergaben, daß im Kies ein oberes Grundwasserstockwerk vorhanden ist, das sich mit dem Flußwasserstand ausspiegelt. Darunter folgt im Festgestein Kluftgrundwasser mit einem Spiegel bei NN + 179 m und damit im Oberwasser etwa 3 m unter, im Unterwasser aber 3 m über der jeweiligen Höhe des Neckarspiegels. Ob die schwerdurchlässigen Trennschichten aus Verwitterungslehm und dem oberen Teil des Residualtons in der Umgebung des abgebohrten Geländes Fehlstellen aufwiesen, konnte nicht geklärt werden.

Die Verfüllungs- und Injektionsversuche in den Bohrungen mit verschiedenen Materialien schließlich zeigten, daß wegen der relativ hohen Grundwasserfließgeschwindigkeit nur Stoffe verwendet werden konnten, deren Binder während der Verfestigungszeit nicht auswaschbar war. Sie mußten zur Füllung der unregelmäßigen Hohlräume pumpfähig sein und ohne Volumenverlust aushärten. Es kam für diesen Zweck deshalb und auch aus Kostengründen nur eine Verpressung mit sedimentationsstabilen Zementpasten in Frage.

Neben der Verfüllung der Grobhohlräume, welche die unmittelbare Gefahr für die Standsicherheit der Staustufe beseitigen sollte, war noch Vorsorge gegen weitere, schnell verlaufende Lösungsvorgänge im Festgestein zu treffen. Dies war am besten durch Abdichtung des Untergrundes mit einem Injektionsschleier zu erreichen.

Wegen der Verzahnung beider Ziele waren sie als gemeinsame Maßnahme zu planen und auszuführen.

4 Durchführung der Maßnahme

4.1 Sanierungskonzept

Auf der Grundlage der genannten Überlegungen wurde folgende Konzeption für den Ablauf der Sanierungen vorgesehen:

Akut gefährdet war vor allem die Wehranlage. Nach Abschluß der Aufschluß- und Erkundungsbohrungen waren die Hohlräume unter der Sohle der Wehranlage zu verfüllen und im Anschluß daran ein Dichtungsschleier einzubauen. Dieser Schleier verlängert quasi die tiefe Spundwand oberhalb der Wehranlage bis in ungefährdete Bereiche. Im Schutze des Schleiers wurden dann die tiefen Hohlräume unter der Wehranlage verpreßt.

Bei der anschließenden Sanierung der Schleusenkammern wurden zunächst die Hohlräume unmittelbar unter der Bauwerkssohle der Kammern, anschließend sämtliche Hohlräume unter den Häuptern verfüllt. Nach Verpressung der tiefen Hohlräume unter den Schleusenkammern wurde der Dichtungsschleier im Bereich der Schleusen oberhalb der Unterhäupter fortgesetzt und in das rechte Ufer eingebunden. Die Fortsetzung des Dichtungsschleiers um das Kraftwerk herum und die anschließende Verfüllung der Hohlräume unter dem Kraftwerk wird die Maßnahmen abschließen.

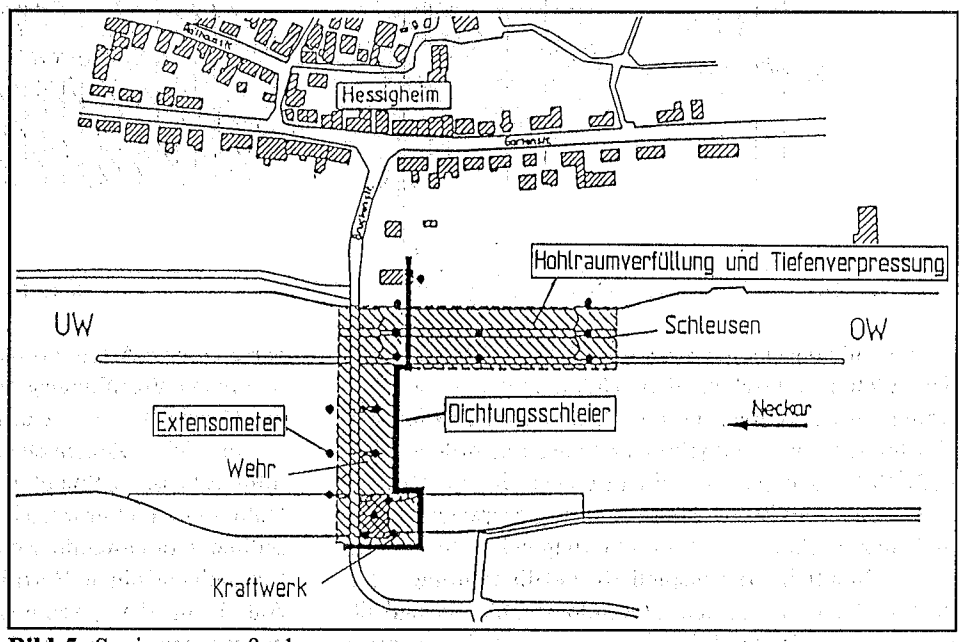

Bild 5: Sanierungsmaßnahmen

Ein Netz von Grundwasserpegeln und Extensometern dient der ständigen Beobachtung der Bewegungen des Bauwerkes und des Untergrundes während der Arbeiten und danach und der Veränderung der Grundwasserströme. Die Verpressungen erfolgen gestaffelt in mehreren Reihen. Die 2. und 3. Staffel kann gleichzeitig zur Kontrolle des Erfolges vorhergehender Verpressungen herangezogen werden.

Ein ursprünglicher Plan, unter den Bauwerken einen Tunnel hindurch zu ziehen und von diesem aus die Verpressungen vorzunehmen, wurde wieder verworfen. Ein solcher Tunnel hätte den Vorteil kürzerer Bohrungen für den Dichtungsschleier und einer behinderungsfreien Ausführung späterer evtl. erforderlicher Nachinjektionen. Dies wog jedoch die Gefahr der Störung des labilen Gleichgewichtes der Bauwerke durch die Errichtung des Tunnels nicht auf.

4.2 Ausführung

Grundlage für die Planung der Sanierungsmaßnahme waren die oben erwähnten 66 Erkundungsbohrungen, die im Bereich der Bauwerke und an den Ufern im Staustufenbereich als Kernbohrungen abgeteuft wurden. Ein großer Teil dieser Bohrungen wurde als Grundwasserbeobachtungspegel ausgebaut. In einigen im Bereich der Bauwerke liegenden Kernbohrungen wurden Extensometer zur Überwachung eingebaut (Bild 5). Die in den Bohrungen, während der Bohrarbeiten durchgeführten WD-Tests gaben Auskunft über die Wasserdurchlässigkeit des Untergrundes.

Zur Sanierung wurden bzw. werden alle unterhalb der Gründungssohle liegenden, durch Sackungen entstandenen Hohlräume im Bereich der Schleusen, des Wehrs und des Krafthauses über kurze die Gründungsplatten durchdringende Bohrungen verfüllt (Hohlraumverfüllung, Bilder 5 - 7). Tiefe, mit einem gegenseitigen Abstand von ca. 4 m rasterförmig angeordnete Vollbohrungen dienten der Verfüllung der Hohlräume im Bereich des Auslaugungshorizonts (Tiefenverpressung, Bild 5). Beispielhaft ist die Anordnung dieser Bohrungen in den Bildern 6a und 7 dargestellt. Sie sind überwiegend senkrecht und nur dort geneigt, wo der für eine senkrechte Bohrung notwendige Ansatzpunkt nicht zugänglich war. Da die Tiefenlage eventueller Hohlräume nicht bekannt war, wurden die

Bohrungen auch bis unter den Dolomithorizont geführt (Bild 6a). Die Tiefenverpressungen sollten weitere Senkungen in Höhe der Gründungssohlen vermeiden helfen und den Auslaugungsprozeß verlangsamen.

bzw. werden größtenteils von schwimmenden Pontons aus ausgeführt.

Die inhomogenen Baugrundverhältnisse erforderten

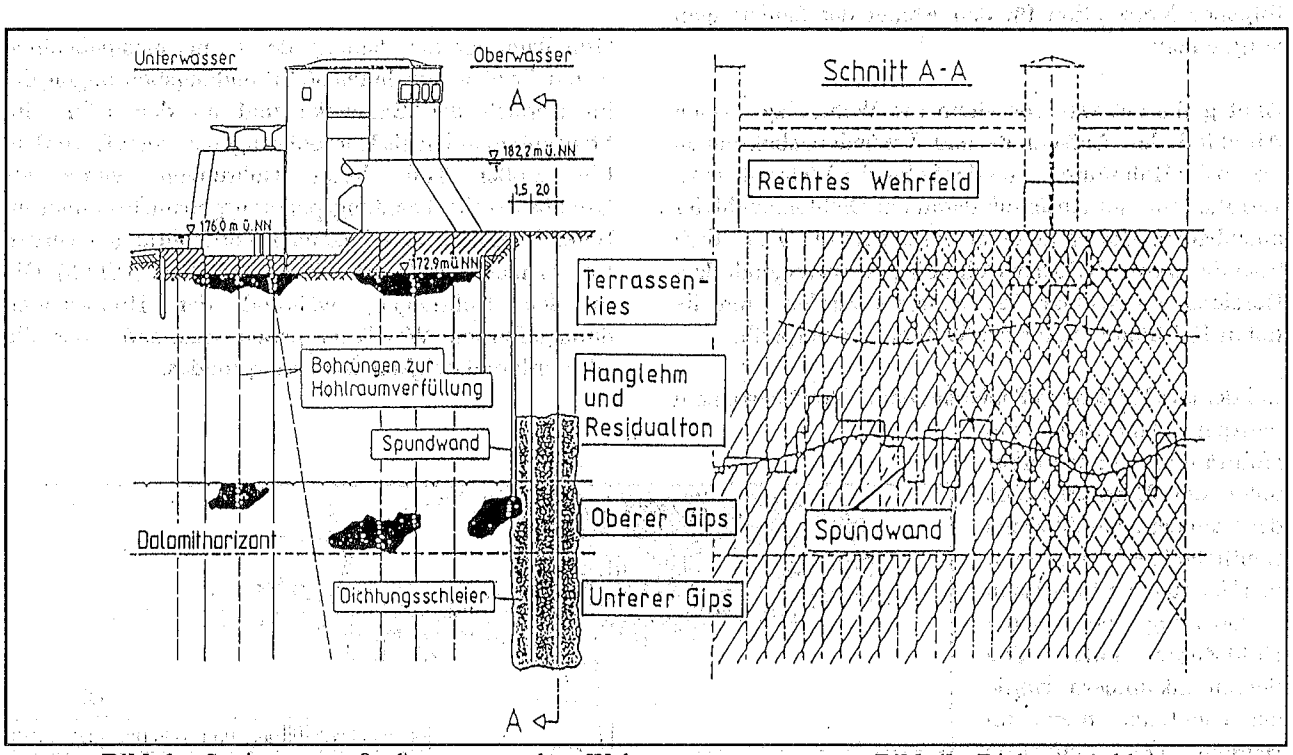

Bild 6a: Sanierungsmaßnahmen unter dem Wehr

Bild 6b: Dichtungsschleier

Darüber hinaus wurde bzw. wird auf der Oberwasserseite des Wehrs, zwischen den Unterhäuptern und den Kammern der Schleusen, am rechten Ufer und um das Krafthaus herum ein Injektionsschleier angeordnet. Über tiefe Vollbohrungen mit einem gegenseitigen Abstand von ca. 1 m wurden die hohlraumreiche Auslaugungszone und der darüber- und darunterliegende Untergrund abgedichtet (Bild 5). Beispielhaft sind die Bohrungen für den Schleier im rechten Wehrfeld in Bild 6a und 6b dargestellt. Als Injektionsbohrungen wurden sowohl senkrechte als auch geneigte Bohrungen ausgeführt, um damit die Hohlräume und die überwiegend steilstehenden Klüfte möglichst häufig anschneiden und optimal abdichten zu können. Nach oben wurde der Schleier so weit geführt, daß eine ausreichende Anbindung bzw. Überlappung mit der oberwasserseitigen Spundwand erreicht werden konnte (Bild 6a).

Zur Kontrolle des Verpreßerfolges wurden bzw. werden in allen Bereichen Kontrollkernbohrungen ausgeführt, in denen Wasserabpreßversuche durchgeführt wurden. Die Wehranlage wurde in den Jahren 1986 bis 88 saniert. Daran anschließend wurden die Arbeiten im Bereich der Schleusenanlage und am rechten Ufer ausgeführt. Diese Arbeiten wurden im Jahre 1992 vorläufig abgeschlossen. Die Sanierung des Krafthausbereichs beginnt im Frühsommer des Jahres 1993. Die Bohrungen wurden

verschiedene Arten von Injektionsgut, das jeweils einen optimalen Verfüllungsgrad mit möglichst hoher Dichte gewährleistet. So wurde für feine Klüfte eine wasserreiche Zementsuspension verwendet. Für die infolge der tiefen Spundwand nicht durchströmten oberen Hohlräume und gröbere Klüfte wurde eine wasserarme, sedimentationsstabile Zementpaste unter Zugabe von Bentonit und einem Verflüssiger verwendet. Den größten Anteil an der gesamten Verpreßmenge hatte eine wasserarme, erosionsstabile Zementpaste mit einem Stabilisierer Addiment, mit der die größeren durchströmten Hohlräume verpreßt bzw. verfüllt wurden. Die quantitative Zusammensetzung der Suspensionen bzw. Pasten in Gewichtsanteilen ist in Bild 8 angegeben.

Die Verpressung des Injektionsgutes erfolgte in Verpreßabschnitten von ca. 4 m Länge jeweils vom Bohrlochtiefsten aus aufsteigend. Für die Abdichtung der Abschnitte am oberen Ende wurden Druckluftpacker mit Gummimanschetten verwendet. Aus den in diesen Abschnitten zuvor durchgeführten WD-Tests ergab sich je nach Durchlässigkeit des Untergrundes die Art des jeweils zu verwendenden Injektionsgutes. Da sich die Zusammensetzung der Suspensionen und der Ablauf der Verpressungen bewährt haben, werden die Arbeiten im Bereich des Krafthauses in der gleichen Weise ausgeführt.

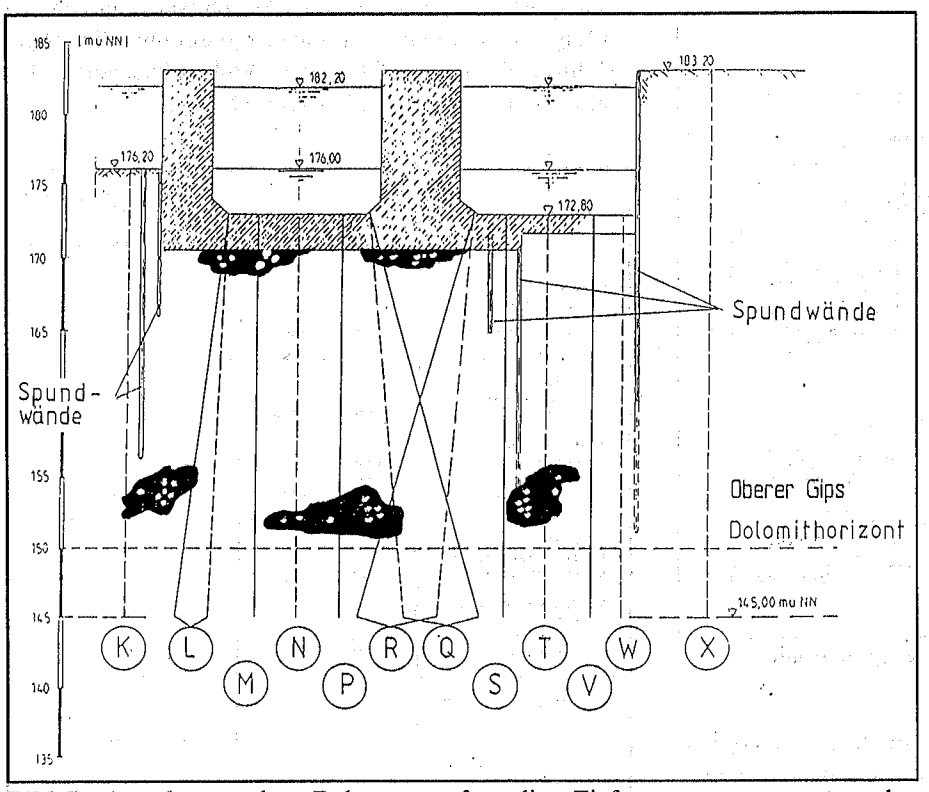

Bild 7: Anordnung der Bohrungen für die Tiefenverpressung unter den Schleusenkammern

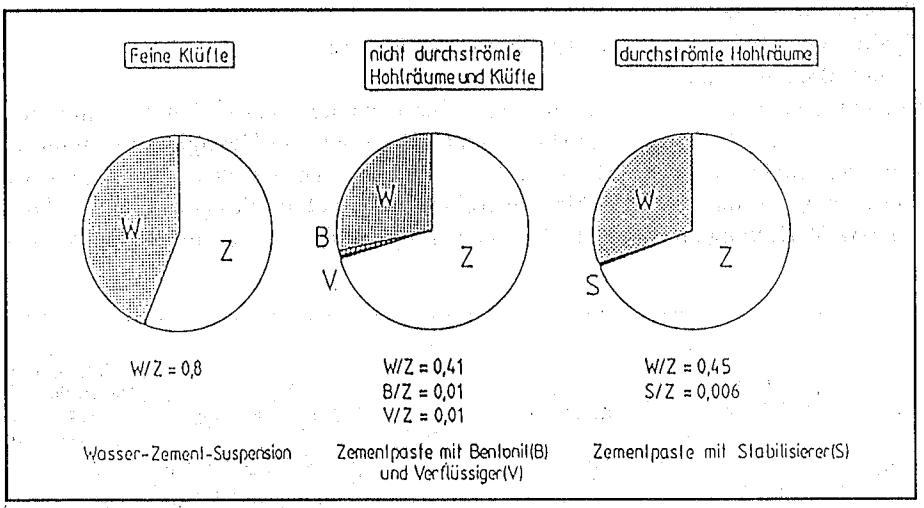

Bild 8: Zusammensetzung des Verpreßgutes

4.3 Überwachung und Ergebnisse

Ein wesentlicher Anteil der Überwachung der Injektionsarbeiten bestand in der Kontrolle der Pasteneigenschaften in einem Baustellenlabor. Mit Hilfe eines Viskosimeters wurden die Fließgrenze τ_0 und die Viskosität ^{n} ermittelt. Sie dürfen die Grenzwerte $\tau_0 \leq 40$ N/m^2 sowie $^n \leq 0{,}4$ Ns/m^2 nicht überschreiten, um die Förderung von Addimentpasten über längere Rohrleitungen und eine günstige Ausbreitung auch in enger werdenden Hohlräumen mit gut regelbaren Kolbenpumpen zu ermöglichen. Die Auswertung eines Viskosimeterversuches ist in Bild 9a dargestellt.

Mit Hilfe des Injektionsflusses (Verpreßmenge je Zeit) und des Verpreßdruckes kann die ordnungsgemäße Verfüllung eines Verpreßabschnittes auf der Verpreßstation überwacht werden. Beide fortlaufend grafisch aufgetragen zeigen das Ende der Verfüllung an, wenn mit steigendem Druck der Injektionsfluß gegen Null geht. Bleibt der Druck bei unterbrochenem Injektionsfluß über eine Zeit von 5 bis 7 Minuten konstant, kann der Abschnitt als verfüllt angesehen werden (Bild 9b).

Am Beispiel der Schleusenkammern sollen nachfolgend die Verteilung der Verpreßmengen, die für die Hohlraumverfüllung und die Tiefenverpressung erforderlich waren, angegeben werden. Im Bild 10 sind die über die einzelnen Bohrungen verpreßten Mengen als Säulen in isometrischer Darstellung über die Grundrißfläche aufgetragen. Man erkennt deutlich die sehr unterschiedliche Hohlraumbildung. So wurden direkt unter der Bauwerkssohle der wasserseitigen Schleusenkammer wesentlich größere Hohlräume angetroffen als unter der landseitigen Schleusenkammer (s. Bild 10a). Auch bei der Tiefenverpressung stellte sich eine unregelmäßige Verteilung der Hohlräume heraus (s. Bild 10b). Insgesamt wurden hierfür nahezu 15fach größere Verpreßmengen benötigt als für die Verfüllung der oberen Hohlräume. Als Indiz für eine erfolgreiche Verpressung ist die Tatsache zu bewerten, daß die Verpreßmengen mit abnehmendem Bohrlochabstand (1. und 2. Verpreßserie) deutlich abnahmen.

Bis Juli 1992 wurden bei der Verfüllung der Hohlräume

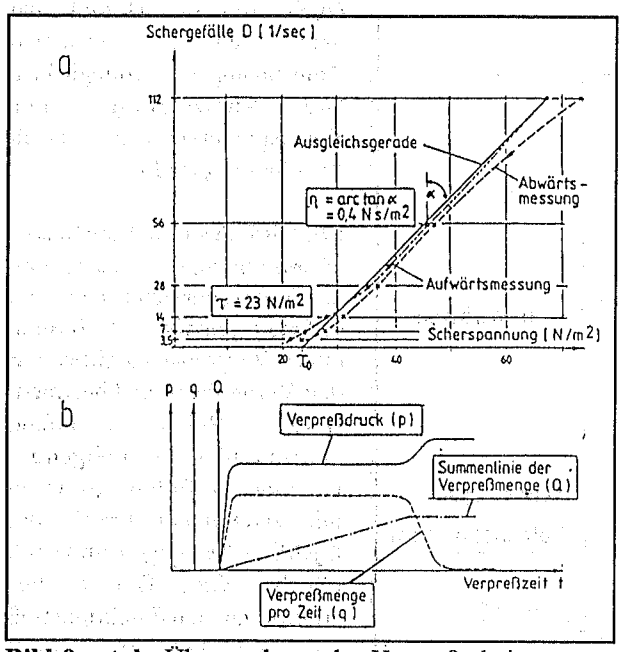

Bild 9 a + b: Überwachung der Verpreßarbeiten

unter den Bauwerkssohlen und im tiefen Untergrund sowie für die Erstellung des ca. 6 m breiten Dichtungsschleiers im Bereich der Wehranlage, der Schleusen und am rechten Neckarufer etwa 8900 t Zement verpreßt.

Rechnet man die im Bereich der Stauanlage verpreßten Mengen (Tabelle 1, 2. und 3. Spalte) mit Hilfe der Wichte der erhärteten Suspensionen in Volumen um und bezieht diese auf die Grundflächen dieser Bauwerke, so ergeben sich die in Tabelle 1 in der 4. Spalte angegebenen Höhen. Diese Höhen vermitteln einen Eindruck von der Größe der auslaugungsbedingten Hohlräume, die vor der Verpressung bzw. Verfüllung im Untergrund ausgebildet waren. Danach war offensichtlich infolge einer erhöhten Grundwasserströmung die größte Hohlraumbildung im Bereich der Wehranlage vorhanden und nahm zum rechten Ufer hin ab.

Ort der Verpressung	Verpreßmenge [t]	Verpreßmenge Summe [t]	Äquivalente durchgehende Hohlraumhöhe [m]
Wehr Wehrfelder und Wehrpfeiler	2350		
Dichtungsschleier	1650	4000	1,25
1. Schleuse, Hohlraumverfüllung unter der Sohle	126	126	
Tiefenverpessung - Kammer - Oberhaupt - Unterhaupt	1620 640 320	2580	0,75
2. Schleuse Hohlraumverfüllung unter der Sohle	16	16	
Tiefenverpressung - Kammer - Oberhaupt - Unterhaupt	925 434 140	1499	0,50
Schleier im Bereich der Schleuse	284	284	
Schleier am rechten Neckarufer	397	397	
	Summe	8902 t Zement	

Tab. 1: Verpreßmengen

5 Erfolg der Maßnahme

Die im Jahre 1983 begonnenen Arbeiten zur Sanierung des Untergrundes der Staustufe Hessigheim wurden im Herbst 1992 nach der Sanierung des Wehres und der Schleusen vorläufig beendet. Im Frühjahr 1993 wird mit den Maßnahmen am Kraftwerk begonnen. Die bei der

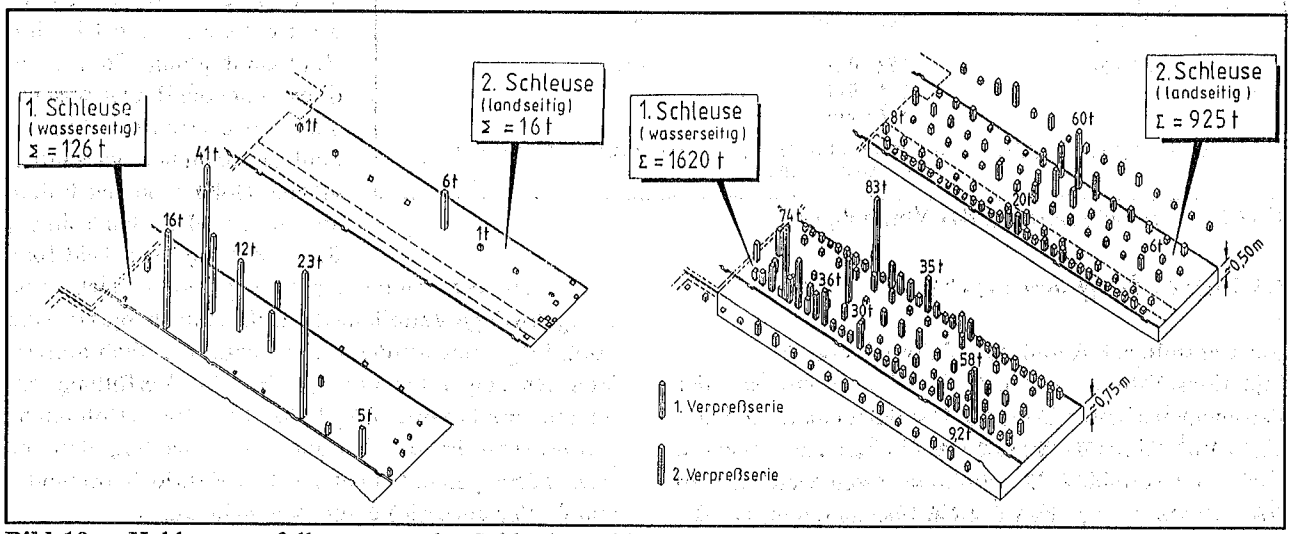

Bild 10a: Hohlraumverfüllung unter der Sohle der Schleuse

Bild 10b: Tiefenverpressung unter den Schleusenkammern

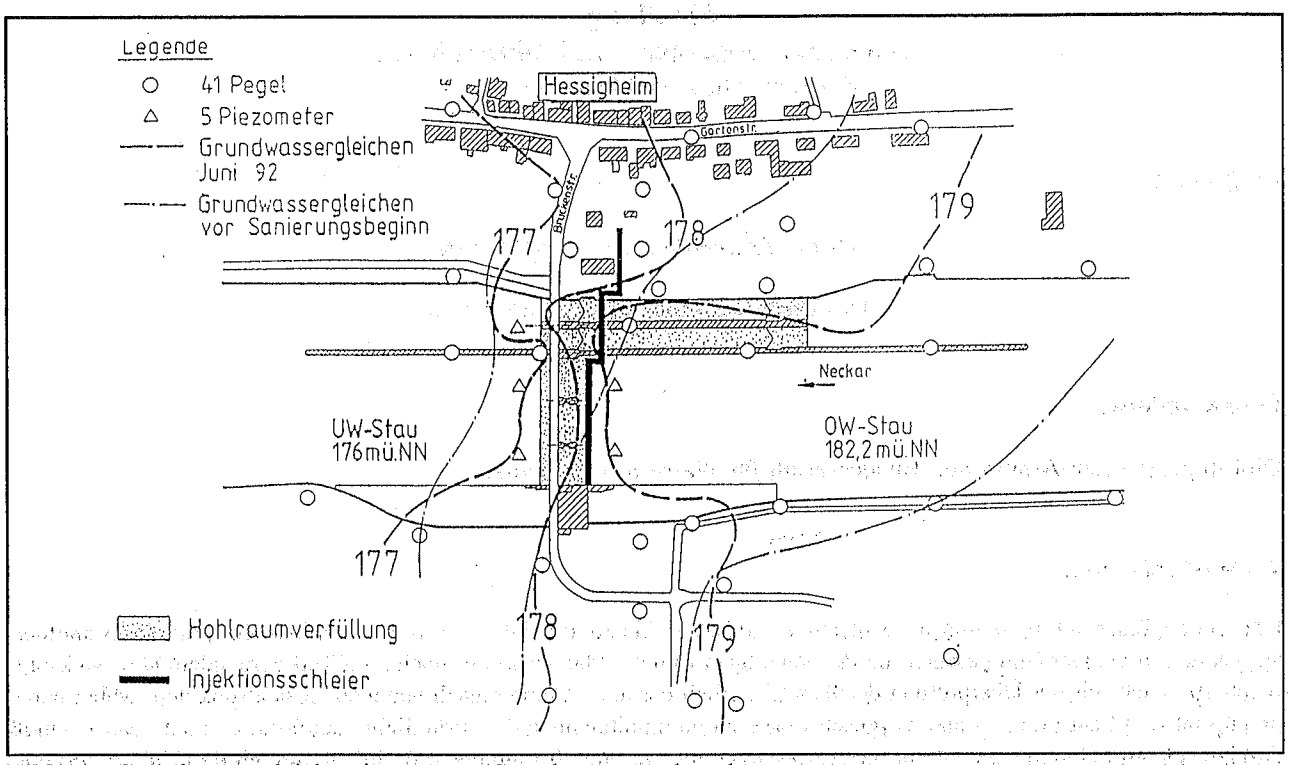

Bild 11: Grundwassergleichen im unteren Grundwasserstockwerk

Sanierung verbrauchten Injektionsmengen zeigen, in welchem Umfang im Untergrund Hohlräume vorhanden waren, wie stark also das Bauwerk bereits gefährdet war. Mit der lückenlosen Erfassung des gesamten Untergrundes unter den Bauwerken ist sichergestellt, daß derzeit praktisch keine Hohlräume mehr vorhanden sind.

Aus den Pegelbeobachtungen und den daraus konstruierten Grundwassergleichen ist erkennbar, daß der Grundwasserstrom durch den vorhandenen Dichtungsschleier um die Bauwerksteile, die bereits saniert sind, herumgelenkt wird (Bild 11). Erst nach Abschluß der Arbeiten am Kraftwerk ist die ganze Staustufe wieder in einen stabilen Zustand versetzt.

Es hat sich jedoch auch gezeigt, daß offensichtlich die Einbindung des Dichtungsschleiers in das rechte Ufer nicht vollständig gelungen ist. Hier wird gegebenenfalls nach genauerer Überprüfung eine Verlängerung des Dichtungsschleiers noch erforderlich sein.

6 Ausblick

Die Sanierung des Untergrundes der Staustufe Hessigheim hat gezeigt, daß es mit modernen Techniken und Materialien möglich ist, auch schwierigste Untergrundverhältnisse so zu verbessern und zu stabilisieren, daß unter Erhaltung der Funktionsfähigkeit einer Stauanlage und Fortführung des Betriebes deren Nutzungsdauer erheblich verlängert werden kann. Für den eingebauten Dichtungsschleier wird zunächst mit einer Wirksamkeit für die Dauer von 30 bis 40 Jahren gerechnet. Das gesamte Bauwerk und die Grundwasserverhältnisse werden intensiv beobachtet werden, so daß daraus für die Zukunft weitere Erkenntnisse für die Durchführung ähnlicher Maßnahmen gewonnen werden können.

Literatur

[1] Franzius, Dr. Ing. Ludwig, Verpressung durch Gipsauslaugung bedingter Hohlräume im Untergrund der Wehranlage Hessigheim/Neckar, Zeitschrift für Binnenschiffahrt Nr. 24, Dezember 1991

[2] Franzius, Dr.-Ing., Ludwig: Verpressung durch Gipsauslaugung bedingter Hohlräume im Untergrund der Staustufe Hessigheim /Neckar, Baugrundtagung 1990, Karlsruhe

[3] Wasser- und Schiffahrtsdirektion Südwest: Akten und Bauunterlagen