

Grundwasserinduzierte Veränderungen im lösungsempfindlichen Baugrund unterhalb der Schleusenanlage Hessigheim am Neckar

Dipl.-Ing. Katharina Bergholz, Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe, Abteilung Geotechnik
Dipl.-Ing. Regina Kauther, Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe, Abteilung Geotechnik
Dipl.-Geol. Daniel Straßer, Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe, Abteilung Geotechnik
Dr.-Ing. Héctor Montenegro, Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe, Abteilung Geotechnik

1 Einleitung

Die Schiffsgröße auf dem Neckar ist bedingt durch die Schleusenabmessungen zurzeit auf 105 m Länge begrenzt. Im Hinblick auf den wachsenden Anteil von Schiffen mit mehr als 110 m Länge auf dem Rhein wird die Anpassung der Wasserstraße Neckar an die künftigen Verkehrsstandards (überlange Großmotorschiffe, 135 m) gefordert. Von 27 Doppelkammerschleusen sollen die landseitige oder die wasserseitige Kammer in Richtung Ober- oder Unterwasser verlängert werden. In diesem Zuge ist vorgesehen, auch die jeweils nicht zu verlängernde Schleusenkammer instand zu setzen, um eine dem Neubau ähnliche Nutzungsdauer zu ermöglichen.



Bild 1: Luftbild von der Staustufe Hessigheim (Quelle: WSV)

Die Schleusenanlage Hessigheim wurde in den Jahren 1950/51 als 16. Staustufe in der Ortslage Hessigheim mit einem Kraftwerk, einem dreifeldrigen Wehr und einer Schleuse in Massivbauweise errichtet. Zehn Jahre später erfolgte landseitig der ersten Schleuse der Bau einer zweiten Schleusenkammer. Die landseitige Kammerwand besteht aus einer Spundwand mit vorgesetzter Betonschale. Beide Schleusenkammern sind 110 m lang, 12 m breit, besitzen eine Fallhöhe von 6,2 m und sind flach im Neckarkies gegründet. Die besonders setzungsempfindlichen Schleusenhäupter wurden in Erkenntnis der problematischen Untergrundverhältnisse auf Pfählen tief gegründet und mit Spundwänden umschlossen.

Im Rahmen der derzeit geplanten Baumaßnahme soll die rechte, landseitige Kammer in Richtung Oberwasser verlängert werden. Die Abteilung Geotechnik der Bundesanstalt für Wasserbau wurde in diesem Zusammenhang mit der Erstellung eines Baugrundgutachtens einschließlich einer Beurteilung der geohydraulischen Verhältnisse beauftragt. Diesbezüglich werden aktuell ein Konzept für die Baugrunderkundung sowie ein Grundwassermodell entwickelt.

2 Baugrund

2.1 Geologie

Das Neckarbecken ist geprägt von Gesteinen des Oberen Muschelkalks, die im Bereich von Hessigheim durch die erosive Tätigkeit von Enz und Neckar zum Großteil ausgeräumt sind, so dass die Gesteine des Mittleren Muschelkalks zu Tage treten. Im Neckartal werden diese von Lockergesteinen in Form von Flusskiesen („Neckarkies“) und nacheiszeitlichen Auensedimenten überlagert. Einen vereinfachten geologischen Schnitt durch den Baugrund von Hessigheim zeigt Bild 2.

Der Mittlere Muschelkalk wird im Bereich der Stauanlage im Wesentlichen durch die Heilbronn-Formation repräsentiert. Sie ist von evaporitischen Gesteinen wie Anhydrit bzw. Gips und Steinsalz geprägt, die im Wasser mehr oder weniger stark löslich sind. Die dominierenden oberen Sulfatschichten dieser Formation bestehen aus bereits zu Gips umgewandeltem Anhydrit mit Einschaltungen aus Ton- und Dolomitstein. Sie lassen sich durch einen markanten, wenige Meter mächtigen Horizont aus Dolomitstein in etwa 30 m Tiefe („Zwischendolomit“) in einen Oberen und Unteren Tonanhydrit („Oberer/Unterer Gips“) untergliedern. Älteren petrographischen Untersuchungen zufolge enthält der Obere Tonanhydrit zwischen 87 und 99 % Gips, der Untere Tonanhydrit im Mittel nur 67 %. Dementsprechend schreitet die Auslaugung des Gesteins durch strömendes Grundwasser oberhalb des Zwischendolomits zügig voran. Der Obere Tonanhydrit ist in weiten Bereichen stark verwittert und ausgelaugt und von zahlreichen Hohlräumen durchsetzt. Teilweise sind die Hohlräume mit eingespülten Neckarkiesen oder sonstigem umgelagerten Felsersatz gefüllt. Diese auf der Auslaugungsfront lagernden bindigen Lösungsrückstände des Oberen Tonanhydrits mit weicher bis steifer Konsistenz werden als Residualtone bezeichnet. Der Zwischendolomit, der aufgrund eines Gipsanteils von durchschnittlich nur 21 % als nicht auslaugungsgefährdet betrachtet wird, stellt eine Art natürliche Barriere dar, die die Hohlraumbildung im Unteren Tonanhydrit bisher verhindert hat. Nach heutigen Erkenntnissen wird sich ein Fortschreiten des Auslaugungsprozesses unter dem Zwischendolomit auf wesentlich größere Zeiträume erstrecken.

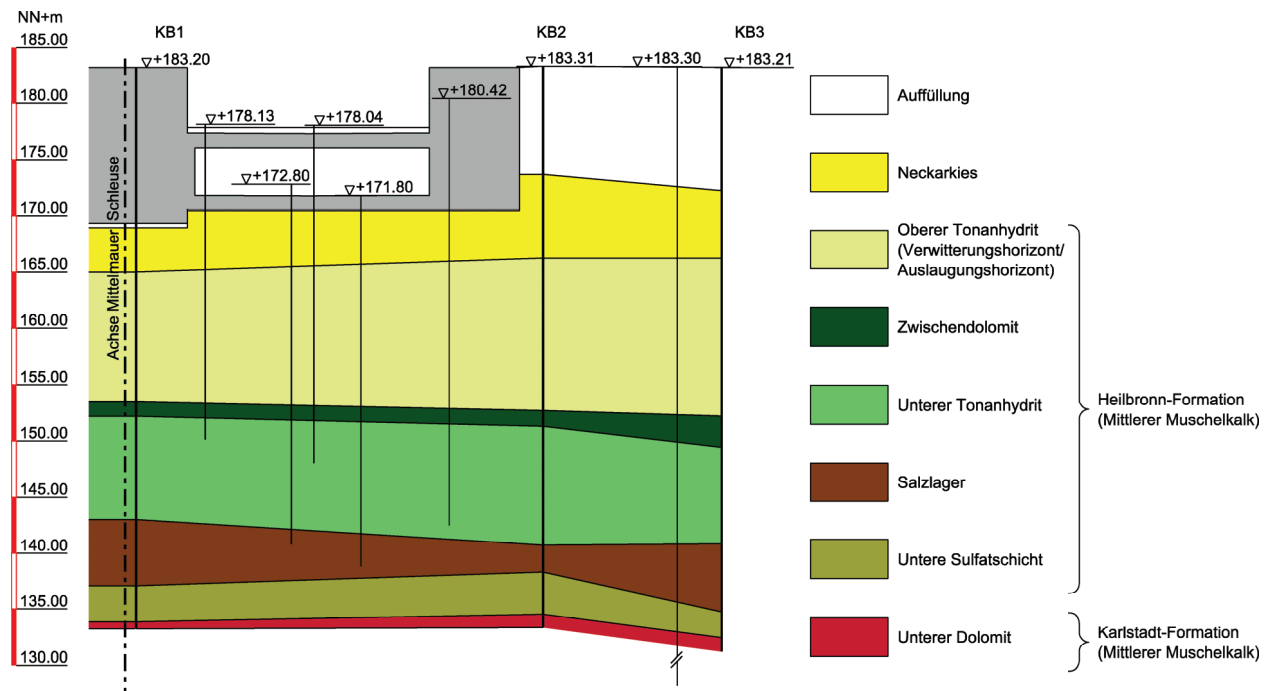


Bild 2: Geologischer Schnitt im Bereich der Staustufe Hessigheim

2.2 Chronologie der Sanierungsmaßnahmen

Bereits während des Baus der Staustufe wurden erhebliche Verschiebungen am Kraftwerk festgestellt. Auch an den Schleusenkamerwänden traten insbesondere in der Mitte stetig zunehmende Setzungen auf, während die tief gegründeten und umspundeten Häupter weniger Verformungen zeigten. Ursache für die Bauwerkssetzungen sowie für das Auftreten von Erdfällen und Dolinen im angrenzenden Gelände waren zügig fortschreitende Lösungsprozesse des Gipses im Bereich des Oberen Tonanhydrits infolge des um und unter der Staustufe strömenden Grundwassers.

Um die Standsicherheit der Staustufe zu verbessern und die latente Gefahr unkontrollierter Setzungen und Schiefstellungen einzelner Bauwerksteile abwenden zu können, wurde in den 1980er Jahren ein Sanierungskonzept aufgestellt, dessen Umsetzung sich bis zum Ende der 1990er Jahre erstreckte (siehe Bild 3). Es beinhaltete die Verfüllung sämtlicher Hohlräume unter den Bauwerkssohlen mit Zementsuspension. Um ein Fortschreiten des Auslaugungsprozesses und damit die Entstehung neuer Hohlräume eindämmen zu können, wurde zusätzlich ein Abriegeln des Grundwasserstroms in Form eines Dichtungsschleiers für erforderlich gehalten. Dieser sollte die Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Stauanlage verringern.

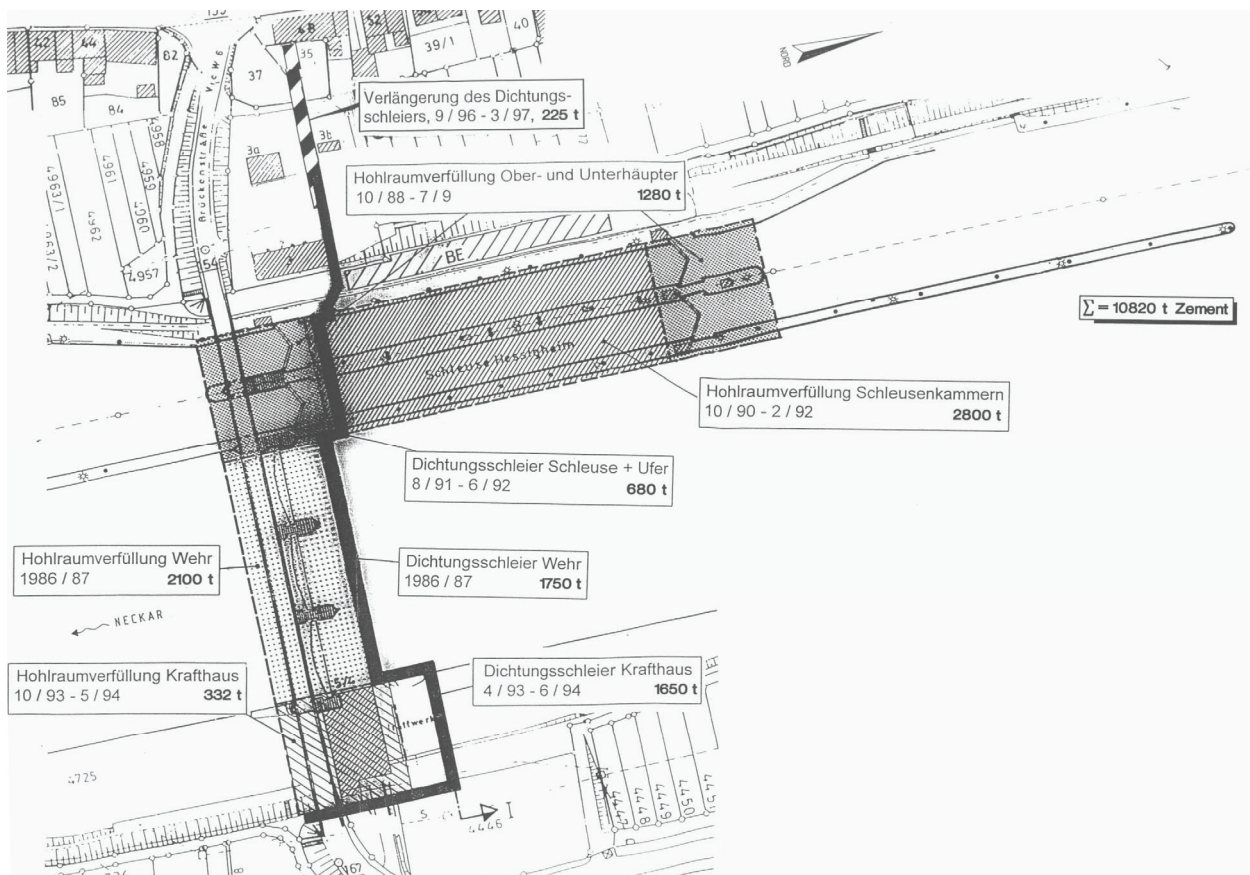


Bild 3: Sanierungsmaßnahmen mit Mengen verpresster Zementsuspension (Quelle: Ingenieurbüro Prof. Wittke)

In den Jahren 1986/87 wurden, dem Konzept folgend, die ersten Sanierungsmaßnahmen im Bereich der Wehrfelder durchgeführt (Hohlraumverfüllung, Dichtungsschleier). Bis 1992 folgten sukzessive die Verpressung der Hohlräume unter den Schleusenhäuptern und -kammern sowie die Fortführung des Dichtungsschleiers unter den Schleusenhäuptern bis zum rechten Neckarufer. In den zwei darauffolgenden Jahren wurden auch die Hohlräume unter dem Kraftwerk am linken Neckarufer verfüllt sowie der Dich-

tungsschleier um dieses herumgeführt. 1997 ist die bisher letzte Maßnahme mit der Verlängerung des Dichtungsschleiers am rechten Neckarufer abgeschlossen worden. Für die Verpressung der unterirdischen Hohlräume sowie die Herstellung des Dichtungsschleiers wurde die Zementsuspension bis weit unter den Zwischendolomit injiziert. Insgesamt sind dabei mehr als 10000 t Zement verpresst worden. Alle Sanierungsmaßnahmen wurden durch umfangreiche Bauerkundungsprogramme sowie anschließende Bohrprogramme zur Kontrolle des Sanierungserfolgs begleitet. Die Sanierungsmaßnahmen sind detailliert von L. Franzius (1991) beschrieben worden.

2.3 Aufarbeitung des Datenbestands

Der erste Schritt auf dem Weg zur Aufstellung eines Erkundungsprogramms für die geplante Schleusenverlängerung war die Aufarbeitung und Auswertung des vorhandenen Datenbestandes, der aus den Erkundungs- und Sanierungsmaßnahmen der vergangenen Jahrzehnte hervorgegangen ist. Das Ziel besteht darin, den Veränderungsprozess im Untergrund sichtbar zu machen und auf dieser Grundlage zukünftige Veränderungen prognostizieren bzw. Gründungsmaßnahmen darauf abstimmen zu können. Der Datenbestand umfasst ca. 260 Bohrungen, Bauwerksmessungen (Extensometer, Nivellements, Alignements) und Grundwasserdaten. Entsprechend der heute gültigen Normen wurden alte Bohransprachen zeichnerisch umgesetzt und digitalisiert. Die Tatsache, dass im Laufe der vielzähligen Bohrkampagnen verschiedene Ingenieure und Geologen mitgewirkt hatten, erschwerte die Identifizierung maßgebender Schichten und die Findung einer einheitlichen Darstellungsweise.

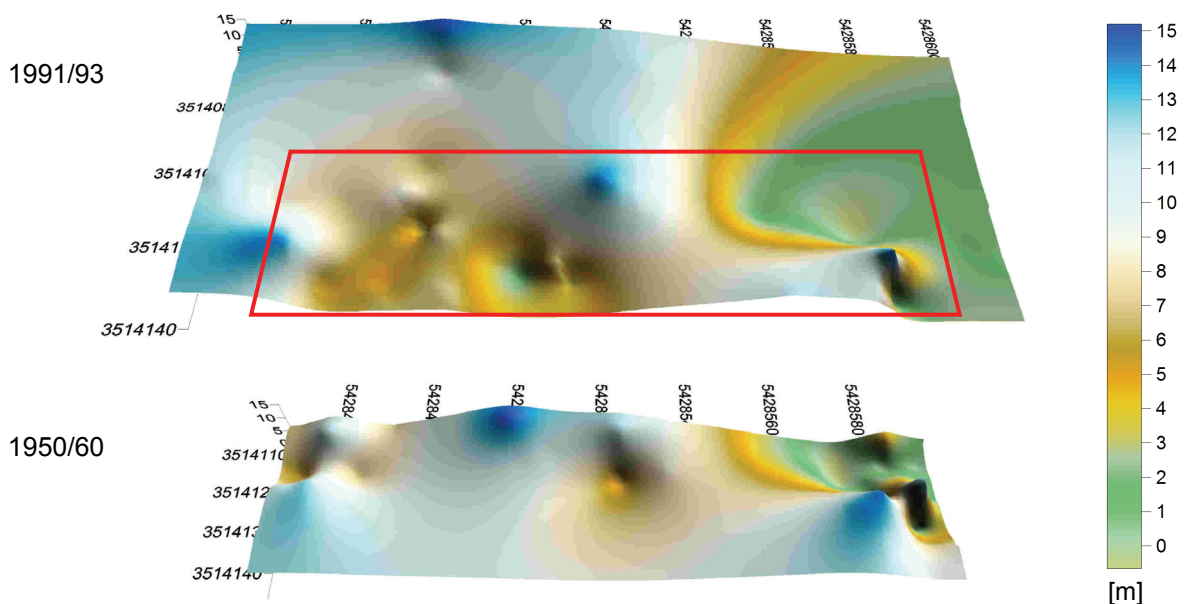


Bild 4: Schichtmächtigkeiten des Oberen Tonanhydrits im Bereich der Schleusen im Vergleich

Um den Verlauf der Schichtgrenzen im Baugrund visualisieren zu können, sollten im nächsten Schritt auf der Basis aller Altbohrungen Schnitte durch die Schleusenanlage erstellt werden. Aufgrund der in relativ kurzen Zeiträumen eintretenden Veränderungen im Baugrund, ergaben die Baugrundschnitte kein stimmiges Bild, da auch nah beieinander liegende Bohrungen aus verschiedenen Erkundungsstufen nicht zueinander passten. Um das Fortschreiten der Auslaugungsfront darzustellen, wurde deshalb mit Hilfe von Höhenlinienplänen die Lage der Verkarstungsbasis (Bild 4) bzw. die Schichtmächtigkeit des unverwitterten Oberen Tonanhydrits verschiedener Zeitpunkte einander gegenübergestellt. Daraus lässt sich eine deutliche Entwicklungstendenz seit der Errichtung der Staustufe erkennen: eine Vertiefung des Kolks im Bereich der Oberhäupter sowie eine Zunahme der Durchsenkung in Kammermitte. Diese Erkenntnisse konnten mit Auswertung der am Bauwerk gemessenen Verschiebungen bestätigt werden.

2.4 Aktuelle Untersuchungen

Für die Aufstellung einer zuverlässigen Prognose über die Entwicklungstendenzen des Baugrunds ist es von Interesse, auch die Veränderungen der vergangenen 20 Jahre seit den letzten Erkundungsbohrungen zu erfassen und diese den vorherigen gegenüberzustellen. Im Rahmen einer vorgezogenen Maßnahme wurden deshalb 2011 vier Bohrungen von 50 m Länge im Bereich des landseitigen Oberhauptes abgeteuft. Die Bohrprofile haben gezeigt, dass die bereits Anfang der 1990er Jahre weit fortgeschrittene Verwitterung des Oberen Tonanhydrits weiter zugenommen hat. Allerdings hat sich die Geschwindigkeit nach Abschluss der Sanierungsmaßnahmen im Vergleich zu den vorangegangenen 30 Jahren deutlich verringert. Der Obere Tonanhydrit wurde zwar weiter ausgelaugt, der Horizont des Zwischendolomits ist jedoch, mit Ausnahme einer Bohrung, stabil.

Die vier Bohrungen wurden des Weiteren zur Durchführung geophysikalischer Messungen sowie für den Einsatz des Crosshole-Verfahrens genutzt. Im Bereich des Oberen Tonanhydrits ist es kaum möglich charakteristische Bodenproben zu entnehmen bzw. deren Untersuchung mit Standardlaborversuchen ist nur begrenzt aussagekräftig. Ebenso ist der Einfluss größerer und kleinerer Hohlräume auf die Steifigkeitseigenschaften des Baugrundes schwer zu beurteilen. Bei dem Crosshole-Verfahren werden eine Signalquelle und ein Empfänger (Geophon) getrennt in zwei Bohrlöchern auf gleicher Höhe geführt. In verschiedenen Tiefen wird durch Anregung von Scher- oder Kompressionswellen die Matrix zwischen den Bohrungen durchschallt. Mit Hilfe der gemessenen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen können Rückschlüsse auf die Eigenschaften des Untergrunds sowie Baugrundanomalien (z. B. Hohlräume) gezogen werden. Die Crosshole-Messungen dienen dazu, Homogenbereiche auszuweisen sowie für diese integrale boden- bzw. felsmechanische Kennwerte für bestimmte Homogenbereiche zu ermitteln. Erste Auswertungen zeigen, dass mit dem Übergang zum Zwischendolomit und den darunter folgenden Schichten eine signifikante Zunahme der Steifigkeit sowie der P-Wellengeschwindigkeit einhergeht und diese insbesondere im Bereich des Zwischendolomits und des Unteren Dolomits Maximalwerte aufzeigen.

3 Hydrogeologie

Parallel zu den Untersuchungen des Baugrunds wurde zur Beurteilung der hydrogeologischen Verhältnisse und des Einflusses diverser baulicher Maßnahmen auf das Grundwasser seit Erstellung der Wehr- und Schleusenanlage Hessigheim ein großräumiges Grundwassermodell erstellt. Ausgangspunkt dieser Untersuchungen war die Sichtung sämtlicher Grundwassermessungen (Grundwasserstände und Porenwasserdrücke) in der näheren und weiteren Umgebung der Wehranlage. In Bild 5 ist die Lage der ausgewerteten Messstellen dargestellt. Die Messdaten zeigen die generelle Strömungsrichtung des Grundwassers, die in etwa dem Verlauf des Neckars folgt.

Die Auswertung der Bohrprofile sowie des Ausbaus der Grundwassermessstellen weist auf das Vorhandensein von zwei Grundwasserstockwerken, einem oberen Grundwasserleiter in den Quartärablagerungen des Neckars und einem unteren Grundwasserleiter im Oberen Tonanhydrit hin. Der Quartärgrundwasserleiter korrespondiert hydraulisch mit dem Neckarwasserstand. Die Messstellen, die im unteren Grundwasserstockwerk verfiltert sind, zeigen, dass gespannte Verhältnisse vorherrschen. Dies weist darauf hin, dass der Grundwasserleiter des Oberen Tonanhydrits durch dessen Auslaugungsrückstände (Residualton) vom Neckar und vom Quartärgrundwasserleiter hydraulisch abgeschirmt ist. Allerdings ist die Abschirmung des Residualtons nicht so ausgeprägt, wie die Beschaffenheit eines stark bindigen Bodens vermuten ließe. Dies ist zum einen in der Inhomogenität und der variierenden Mächtigkeit des Residualtons begründet. Zum anderen kommt es durch Auslaugungsprozesse infolge des im Bereich der Verkarstungsbasis des Oberen Tonanhydrits strömenden Grundwassers lokal zur Bildung von Hohlräumen, in die das darüber liegende Lockergestein (Residualton, Neckarkies) nachrutscht. Auf diese Weise entstehen zwischen den zwei Grundwasserstockwerken kleinräumige hydraulische Verbindungen. Im Großmaßstab führen diese örtlich begrenzten hydraulischen Kontakte zu einer geringeren Abschirmwirkung der potentiellen Trennschicht.

4 Grundwassermodell

Um das Modell auf die wesentlichen Auswirkungen der Baumaßnahmen auf die Grundwasserströmung zu fokussieren, wurde ein möglichst einfaches, gering parametrisiertes Modell angestrebt. Das Grundwassermodell wurde als 2D horizontal-ebenes Modell des Oberen Tonanhydrits konzipiert, bei dem lediglich die horizontale Strömung unter Vernachlässigung der vertikalen Komponenten abgebildet wird. Bewusst wurde darauf verzichtet, den eng mit dem Neckar korrespondierenden Quartärgrundwasserleiter explizit zu berücksichtigen. Der Neckareinfluss wurde lediglich durch die Vorgabe des Neckarwasserstandes als äußere Randbedingung entlang des Flusses modelliert. Auch die Absperrschicht wurde im Modell nicht explizit abgebildet. Der hydraulische Widerstand dieser Schicht und die sich hieraus ergebende (und gemessene) Potentialdifferenz zwischen dem Neckarkies und dem Oberen Tonanhydrit wurden durch einen Leakage-Ansatz berücksichtigt.

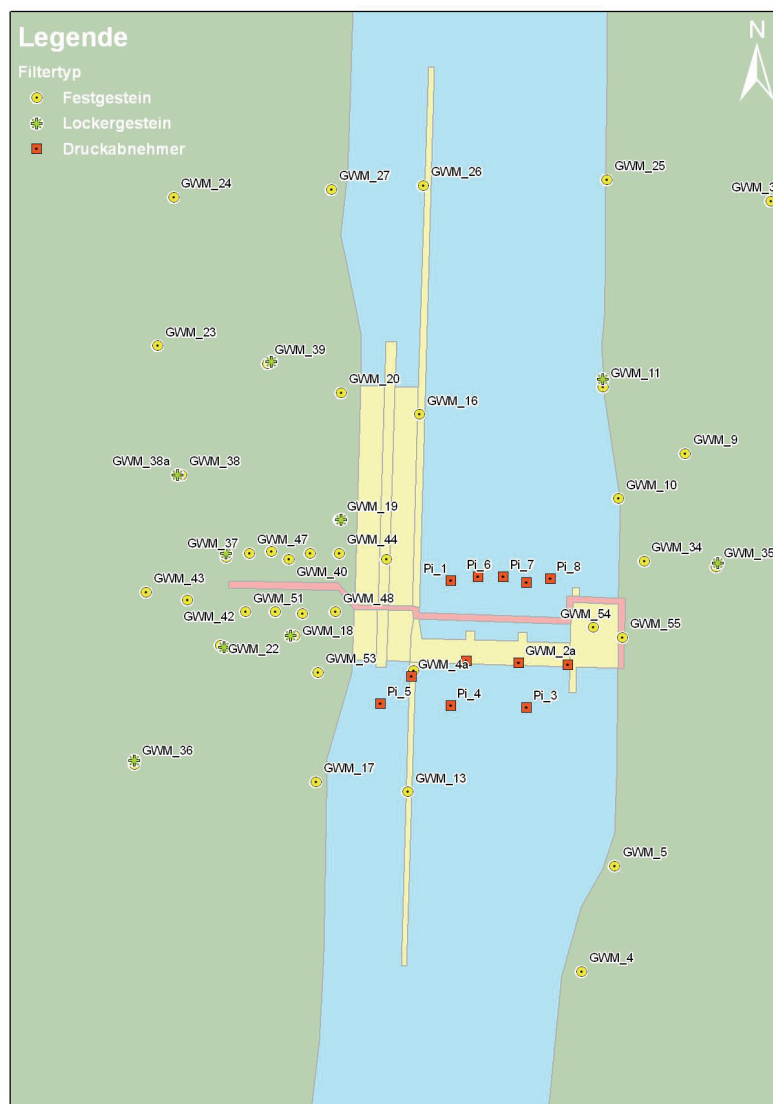


Bild 5: Lage Grundwassermessstellen im Bereich der Staustufe Hessigheim

In dem 2D-Modell werden die in den Grundwasserleiter einbindenden und die Grundwasserströmung behindernden Bauwerke über gegenüber dem Grundwasserleiter verringerte Durchlässigkeit abgebildet. Ebenso werden Bereiche behandelt, deren Durchlässigkeiten mittels Verpressungs- oder Injektionsmaßnahmen verringert werden. Hierdurch kann im 2D-Modell der lokale Potentialabbau entsprechend dem

Strömungswiderstand, der sich aus der Einbindung der Bauwerke in die Grundwasserströmung bzw. der verringerten Durchlässigkeit infolge Injektionsmaßnahmen im Untergrund ergibt, beschrieben werden.

Da die Flusswasserstände die „treibende Kraft“ für die Grundwasserströmung darstellen und diese im staugeregelten Neckar weitgehend konstant sind, wurde ein stationäres Grundwassermodell aufgestellt, mit dem sich „mittlere Strömungszustände“ auswerten lassen.

4.1 Abgrenzung des Modellgebiets

Das ca. 2 km² große Modellgebiet wurde auf Grundlage topografischer und geologischer Karten bestimmt. Das Modellgebiet wird im Westen und Osten durch die am Kamm der Prall- bzw. Gleithänge verlaufende Wasserscheide begrenzt. Im Grundwasserleiter wurde hierbei angenommen, dass senkrecht zu diesen Modellrändern lediglich ein vernachlässigbarer Randzustrom erfolgt. Nach Norden und Süden wurden die Modellgrenzen ausreichend weit entfernt gesetzt, sodass von den letztlich unbekanntem dortigen Randbedingungen kein wesentlicher Einfluss auf den eigentlich interessierenden Nahbereich der Staustufe ausgeht.

4.2 Modellstruktur und Diskretisierung

Das Modellgebiet wurde zunächst in 17 Zonen unterteilt, mit denen der Verlauf des Neckars sowie die wesentlichen baulichen Strukturen (Wehr- und Schleusenanlage, Kraftwerk, Dichtungsschleier) in ihrer räumlichen Anordnung abgebildet werden. Die Durchlässigkeitseigenschaften werden im Allgemeinen als zeitlich unveränderlich angenommen. Allerdings ergaben sich im vorliegenden Fall durch Verpressungs- und Injektionsmaßnahmen deutliche lokale Veränderungen der Durchlässigkeitseigenschaften nach der jeweiligen Sanierungsmaßnahme. Die infolge Sanierungsarbeiten veränderten Durchlässigkeiten wirkten sich wiederum auf die Grundwasserströmung aus, was anhand Grundwassermessungen deutlich nachvollzogen werden konnte.

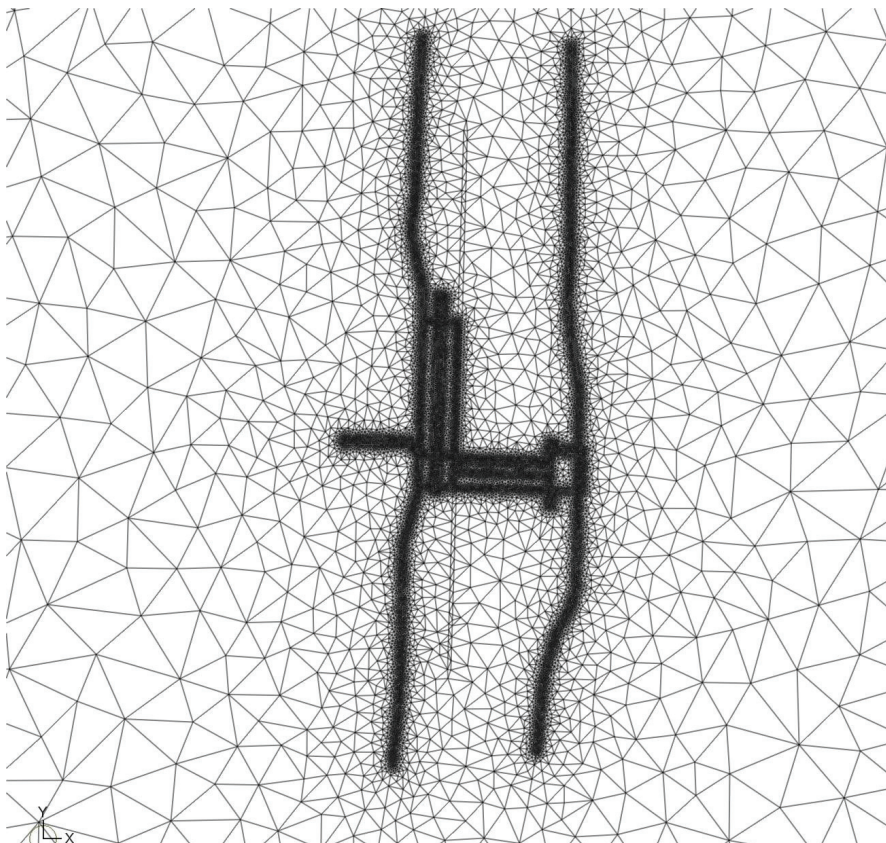


Bild 6: FE-Diskretisierung im Grundwassermodell Hessigheim (Ausschnitt)

Die räumliche Diskretisierung des Finite-Elemente-Netzes orientiert sich an der Zonierung. Im Nahbereich der baulichen Strukturen wurde das Netz verfeinert, um die hydraulischen Gradienten hinreichend fein aufzulösen, an den Randbereichen des Modellgebiets, wo kaum Informationen vorliegen, erfolgte eine erheblich gröbere räumliche Diskretisierung. So beträgt im Randbereich die Kantenlänge der insgesamt 31.788 Finiten Elemente ca. 100 m, während diese im Nahbereich der Staustufe auf Werte < 1 m verdichtet wurde. Bild 6 zeigt einen Ausschnitt der FE-Diskretisierung im Nahbereich des Wehres.

4.3 Hydraulische Durchlässigkeit

In einem horizontal-ebenen Modell werden die Durchlässigkeitseigenschaften durch den Parameter der Transmissivität $T [L^2/T]$ beschrieben, der als Produkt der hydraulischen Durchlässigkeit $k [L/T]$ und der Mächtigkeit $M [L]$ definiert ist. Gemäß vorhandener Baugrundaufschlüsse wurde die Aquiferbasis auf NN + 150 m angenommen, was in etwa der Höhe der Zwischendolomitschicht entspricht. In Ermangelung genauerer Daten über den Verlauf des Oberen Tonanhydrits wurde die Geländeoberkante als obere Begrenzung angesetzt. Aus den im Modell berechneten wassergesättigten Mächtigkeiten, lassen sich rechnerisch Durchlässigkeiten ableiten.

Da der Wert des Leakagekoeffizienten von der Anzahl, Beschaffenheit und Verteilung der hydraulischen Fenster (Erdfälle im Residualton) abhängt und diese nicht hinreichend bestimmbar sind, ist dieser ein reiner Kalibrierungsterm, der, wie die Durchlässigkeitseigenschaften auch, über eine Anpassung der berechneten Grundwasserstände an die Messwerte bestimmt wird.

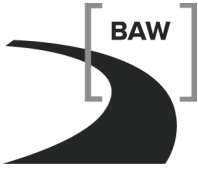
4.4 Randbedingungen

Im gesamten Modellgebiet wurde eine Grundwasserneubildung von 250 mm/Jahr angenommen. Die maßgebenden Randbedingungen im Modellgebiet ergeben sich durch den Neckarwasserstand. Im Oberwasser, unmittelbar vor dem Wehr, ergeben sich infiltrierende, unterhalb des Wehres exfiltrierende Bedingungen bezogen auf das Grundwasser im Oberen Tonanhydrit. Ober- und Unterwasserstand im Neckar wurden im Modell als Leakage-Randbedingung abgebildet. Entlang des Flusses wurden die Wasserstände jeweils dem natürlichen Gefälle des Neckars (Oberwasser: NN +182,75 m bis NN +182,3 m; Unterwasser: NN +176,25 m bis NN +175,5 m) angepasst. Im Fernbereich der Staustufe sowie an den Rändern des Modellgebiets existieren keine Grundwassermessstellen. In Ermangelung von Messwerten wurden am nordöstlichen Modellrand ein konstantes Potential von NN +181 m und am südwestlichen Rand ein Potential von NN +175 m vorgegeben (Dirichlet-Randbedingung). Die übrigen Ränder wurden vereinfachend als Randstromlinien angenommen, über die etwaige Zu- und Abflüsse als vernachlässigbar angenommen werden.

4.5 Parameterbestimmung

Um den Einfluss der einzelnen Sanierungsmaßnahmen auf die Grundwasserströmung zu quantifizieren, wurden vom Ist-Zustand ausgehend verschiedene Bauzustände in der Vergangenheit untersucht. Da die Sanierungsmaßnahmen wie die Hohlräumverfüllungen unterhalb der Bauwerke und die Erstellung des Dichtungsschleiers die Durchlässigkeitsverhältnisse lokal veränderten, mussten die Durchlässigkeitsparameter für die entsprechenden Bereiche auf Grundlage der Grundwassermessungen vor und nach der jeweiligen Sanierungsmaßnahme invers bestimmt werden.

Bei der inversen Parameterbestimmung werden die berechneten Grundwasserstände den gemessenen gegenüber gestellt und die Durchlässigkeits- und Leakageparameter im Kontext eines Optimierungsalgorithmus so variiert, bis eine optimale Übereinstimmung zwischen Berechnung und Beobachtung erreicht ist. Hierbei wurde das Programm PEST zur inversen Parameterbestimmung eingesetzt, bei dem eine Zielfunktion (Abweichung Berechnung-Beobachtung) minimiert wird (Doherty 2003). Die Optimierung erfolgt mit dem Gradientenverfahren nach Levenberg-Marquardt, bei dem die gesuchten Modellparameter in einer Iterationsschleife variiert werden. Natürlich können nur Grundwassermessungen zur Parameterbestimmung verwendet werden, die dem jeweils betrachteten Bauzustand zeitlich entsprechen. Die Durchlässigkeitsparameter wurden zu zwei verschiedenen Zeitpunkten bestimmt, in denen die Sanie-



rungsmaßnahmen unterschiedlich weit vorangeschritten waren. Die untersuchten Sanierungszustände werden im Folgenden beschrieben.

Zustand 4 (Ist-Zustand)

Die Parameterbestimmung des Ist-Zustandes erfolgte anhand der für den Zeitraum Januar 2001 bis Dezember 2009 gemittelten Grundwasserstände. Von den vorhandenen 69 Messstellen im Nahbereich der Schleuse sind lediglich 14 im Quartäraquifer verfiltert, so dass 55 Messstellen zur Beschreibung der geohydraulischen Verhältnisse im Festgestein-Grundwasserleiter herangezogen wurden. Zunächst wurden den einzelnen Zonen Schätzwerte der Durchlässigkeiten bzw. der Leakageparameter zugewiesen. Im Verlauf der inversen Parameterbestimmung wurden die Werte der hydraulischen Durchlässigkeiten im Bereich der verpressten Bauwerke deutlich abgemindert. Simultan zu den Durchlässigkeiten wurden die Leakagebeiwerte für Infiltration (Oberwasser) sowie für Exfiltration (Unterwasser) bestimmt. Die bestimmte Durchlässigkeit des Grundwasserleiters sowie die Leakageparameter wurden als unabhängig von den Baumaßnahmen angesehen und wurden für sämtliche weitere Berechnungen verwendet.

Zustand 3

Zustand 3 entspricht dem baulichen Zustand Mitte der 1990er Jahre, als der Dichtungsschleier noch nicht bis in das rechte Ufer verlängert worden war. Zur Berechnung dieses Zustandes wurde der Parametersatz des Zustandes 4 verwendet, lediglich dem noch nicht erstellten Bereich des Injektionsschleiers wurde die Durchlässigkeit des Untergrunds zugewiesen.

Zustand 2 (nicht abgeschlossene Baugrundverpressung)

Zum Zeitpunkt von Zustand 2 waren die Sanierungsarbeiten nur teilweise durchgeführt. Der Untergrund unterhalb der gesamten Wehranlage sowie unterhalb der Schleusenhäupter war bereits verpresst. Der Bereich unterhalb der Schleusenkammer sowie unterhalb des Kraftwerks hingegen noch nicht. Der Dichtungsschleier war zu diesem Zeitpunkt noch nicht durchgängig injiziert worden. Lediglich im direkten Bereich der Wehranlage war dies bereits erfolgt. Dieser Zustand bot sich an, um die Durchlässigkeitseigenschaften nicht verpresster Bereiche unterhalb der Bauwerke zu bestimmen. Zur Parameterbestimmung wurden die Messwerte von August 1990 verwendet, da diese zeitlich mit dem Sanierungsfortschritts korrespondieren. Die Durchlässigkeit im mittleren Bereich der Schleusenkammern und im Bereich des Kraftwerks wurde invers bestimmt. In den anderen Bereichen, wo die Sanierungsarbeiten bereits beendet waren, wurden die Durchlässigkeitseigenschaften entsprechend Zustand 4 angesetzt.

Zustand 1

Im Zustand 1 wird die Wehr- und Schleusenanlage unmittelbar nach Erstellung der Anlage vor Beginn der Sanierungsmaßnahmen betrachtet. Hierfür werden unterhalb der gesamten Bauwerke die in Zustand 2 bestimmten „unverpressten“ Durchlässigkeiten angesetzt. Diese Variante stellt eine Art „Anfangszustand“ dar, die als Referenz bei der Bewertung der Auswirkungen der Sanierungsmaßnahmen auf das Grundwasser heran gezogen wurde. Da die zugehörigen Messwerte aus den 1960er Jahren noch nicht hinreichend ausgewertet sind, konnten diese Berechnungsergebnisse noch nicht validiert werden.

5 Ergebnisse der geohydraulischen Untersuchungen

Ziel der Grundwasseruntersuchungen war es, die geohydraulischen Verhältnisse im Bereich der Staustufe zu erfassen, um den Einfluss der durchgeführten Bau- und Sanierungsmaßnahmen an der Wehr- und Schleusenanlage auf die Grundwasserströmungsverhältnisse zu bewerten. Die in den Grundwasserleiter einbindenden Bauwerke und die anschließend durchgeführten Sanierungsmaßnahmen behindern die vormals ungestörte Grundwasserströmung und erzeugen einen Aufstau im Anströmbereich sowie einen Absink auf der Abstromseite. Diese Behinderung der Strömung bewirkt eine Erhöhung der lokalen Potentialgradienten und führt gleichzeitig zu einer großräumigen Umströmung des Strömungswiderstandes. Diese Effekte konnten auf Grundlage des Grundwassermodells basierend auf zahlreichen Grundwassermessungen detailliert nachvollzogen werden.

5.1 Einfluss der Sanierungsmaßnahmen auf die Grundwasserströmung

Zunächst wurden für den Zustand 4 die Durchlässigkeiten des Grundwasserleiters, die den Austausch zwischen Grundwasserleiter und Fluss bestimmenden Leakageparameter sowie die Durchlässigkeiten der verpressten Bereiche bestimmt. Im Zustand 2 wurden die Verhältnisse untersucht, bei denen Schleusenhäupter und Wehranlage noch nicht verpresst waren, was Informationen über die Durchlässigkeiten nicht verpresster Bodenbereiche erbrachte. Anhand der in Tabelle 1 aufgelisteten Durchlässigkeitsparameter lassen sich die Auswirkungen der Bau- und Sanierungsmaßnahmen geohydraulisch interpretieren.

Tabelle 1: *Invers bestimmte Durchlässigkeitsparameter (auf die Aquiferdurchlässigkeit normiert) für die betrachteten Zustände*

	Zustand 1	Zustand 2	Zustand 3	Zustand 4
Kraftwerk				
k-Wert Untergrund [m/s]	18.9%	18.9%	0.2%	0.2%
k-Wert Dichtungsschleier [m/s]	---	---	2.1%	2.1%
Wehr				
k-Wert Untergrund [m/s]	18.9%	0.2%	0.2%	0.2%
k-Wert Dichtungsschleier [m/s]	---	2.1%	2.1%	2.1%
Schleusenhäupter				
k-Wert Untergrund [m/s]	18.9%	0.2%	0.2%	0.2%
Schleusenkammer				
k-Wert Untergrund [m/s]	18.9%	18.9%	0.2%	0.2%
k-Wert Dichtungsschleier [m/s]	---	---	2.1%	2.1%
Modellgebiet				
k-Wert Untergrund [m/s]	100%	100%	100%	100%
k-Wert Dichtungsschleier [m/s]	---	---	---	2.1%

Die in Tabelle 1 aufgelisteten Durchlässigkeitsparameter wurden bezogen auf die Durchlässigkeit des Aquifers ($2 \cdot 10^{-4}$ m/s) normiert. Es zeigte sich, dass durch den Bau der Wehranlage die Durchlässigkeit des Aquifers im Wehrbereich auf ca. 20 % der unbeeinflussten Durchlässigkeit reduziert wurde. Die Untergrundverpressung unterhalb des Wehres führte zu einer weiteren Verringerung der Durchlässigkeit auf ca. 0,2 % der unbeeinflussten Aquiferdurchlässigkeit. Für den Dichtungsschleier wurde eine deutliche, jedoch nicht ganz so ausgeprägte Abnahme der lokalen Durchlässigkeit festgestellt. Wie aufgrund der räumlichen Anordnung zu erwarten war, ließ sich die Durchlässigkeit des Dichtungsschleiers nicht eindeutig bestimmen, was auch an der Korrelationsmatrix der identifizierten Parameter abzulesen war.

5.1 Großräumige Grundwasserströmung

Die verringerten Durchlässigkeiten haben einen deutlichen Einfluss auf die Grundwasserströmung. Für den Zustand 4 (Ist-Zustand) ergibt sich die in Bild 7 dargestellte Verteilung der Grundwasserstände. Das Grundwasser strömt entlang des Neckartals der Wehranlage zu. Dort bildet sich im Oberwasserbereich ein Aufstau und im Unterwasserbereich ein Absenk, der zu einer großräumigen Umströmung links und rechts der Wehranlage führt. Ähnliche Strömungssituationen ergeben sich für die anderen untersuchten Zustände. Ebenfalls in Bild 7 dargestellt ist der Vergleich der gemessenen mit den berechneten Grundwasserständen, die sich um die Winkelhalbierenden verteilen.

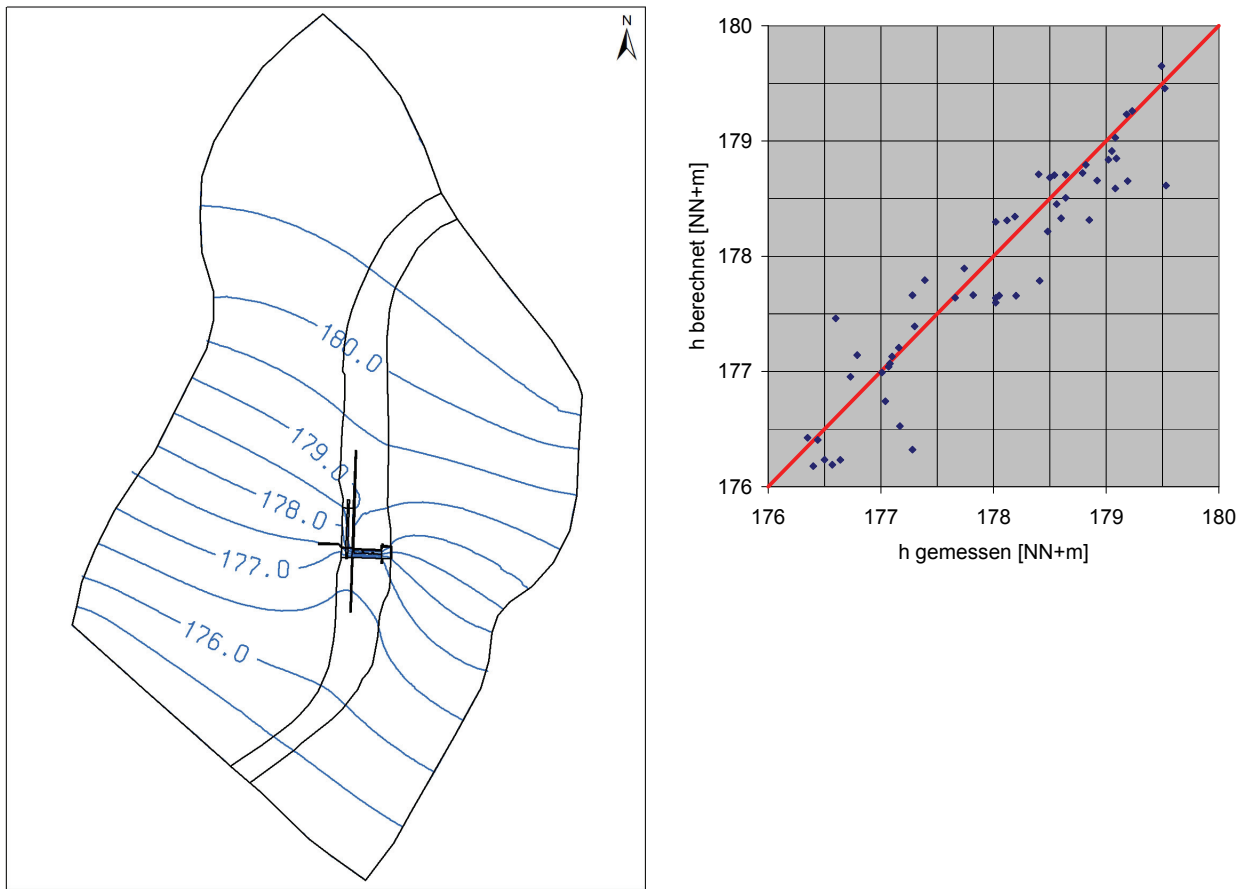


Bild 7: Grundwassergleichen [NN +m] und Vergleich der gemessenen mit den berechneten Grundwasserständen für den Zustand 4 (Ist-Zustand)

5.2 Grundwasserströmung im Nahfeld der Wehranlage

In der linken Abbildung von Bild 8 sind neben den Grundwassergleichen für den Zustand 2 die Grundwasserstandsunterschiede zwischen dem Zustand 2 und dem Bezugszustand (Zustand 1) dargestellt. Vergleicht man Aufstau- und Absenk mit der rechten Abbildung von Bild 8, in dem die Grundwassergleichen für den Ist-Zustand (Zustand 4) und die Differenzen zum Bezugszustand (Zustand 1) dargestellt sind, kann man feststellen, dass sich nicht nur die Lage der Grundwassergleichen, sondern auch der Betrag der Potentialdifferenz sowie die räumliche Ausbreitung von Aufstau- und Absenk deutlich unterscheiden. Diese Unterschiede sind auf die im Vergleich zu Zustand 4 noch lückenhafte Sanierung im Zustand 2 zurückzuführen. Vor der vollständigen Sanierung erfolgt eine deutliche Unterströmung der Schleusenammern sowie des Kraftwerks. Entsprechend geringer ist im Zustand 2 die Behinderung der Grundwasserströmung und somit die Potentialdifferenz. Die geohydraulischen Auswirkungen der Bau- und Sanierungsmaßnahmen lassen sich für die untersuchten 4 Zustände an zwei Schnitten in Strömungsrichtung (Bild 9) und senkrecht dazu (Bild 10) anschaulich darstellen.

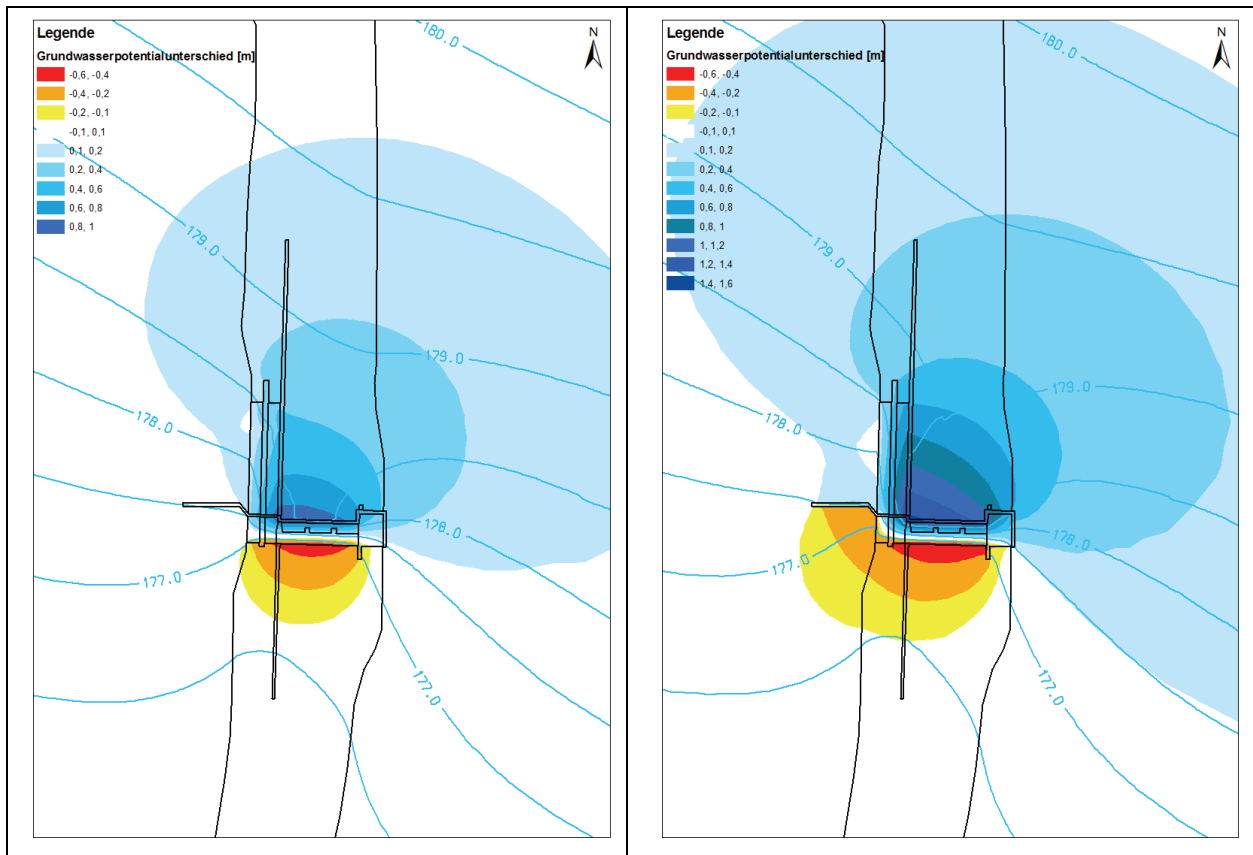


Bild 8: Grundwassergleichen [NN +m] und Wasserstandsunterschiede [m] zum Bezugszustand 1 für den Zustand 2 (links) und dem Zustand 4 (rechts)

Schnitt durch die Wehranlage

Jede Verringerung der Durchlässigkeit infolge Bodenverpressung führt zu einer Erhöhung des Grundwasserpentials im Anströmbereich. Man sieht, dass die Verlängerung des Injektionsschleiers im Uferbereich (Zustand 4) in diesem Längsschnitt durch das Wehr gegenüber dem Zustand 3 nahezu wirkungslos ist. Auf der Abstromseite gibt es Unterschiede zwischen Längs- und Querschnitten. Im Schnitt durch das Wehr (Bild 9) erfolgt, komplementär zum Aufstau, ein Absenk, der weniger ausgeprägt ist als der Aufstau und zudem für die unterschiedlichen Zustände nahezu identisch ist. Dieser Absenk wird offensichtlich von der großräumigen Zuströmung „aufgefüllt“, so dass die lokalen Verpressmaßnahmen wenig Einfluss auf den Betrag dieses Absenks haben.

Schnitt durch die Schleusenanlage

Im Querschnitt durch die Schleusenanlage (Bild 10) kann man erkennen, dass die Sanierungsmaßnahmen im Wesentlichen zu einem Aufstau führten, während auf der Landseite der Absenk kaum ausgeprägt ist. Auch hier kann die großräumige Grundwasserströmung den Absenk nahezu ausgleichen. In diesem Schnitt ist die Abschirmwirkung des landseitigen Injektionsschleiers deutlicher zu erkennen. Dieser verengt den landseitigen Grundwasserströmungsquerschnitt, wodurch die seitliche Umströmung der Schleuse behindert wird und der Absenk von Zustand 3 zu Zustand 4 etwas abnimmt. Im Querschnitt nimmt der Wasserstand im Zustand 3 und 4 mit der Entfernung von der Schleuse in Richtung Flussmitte scheinbar ab, was damit zusammen hängt, dass die Hauptgeschwindigkeitskomponente des Grundwassers nicht senkrecht, sondern schräg auf das Wehr gerichtet ist, wie in Bild 8 rechts gut zu erkennen.

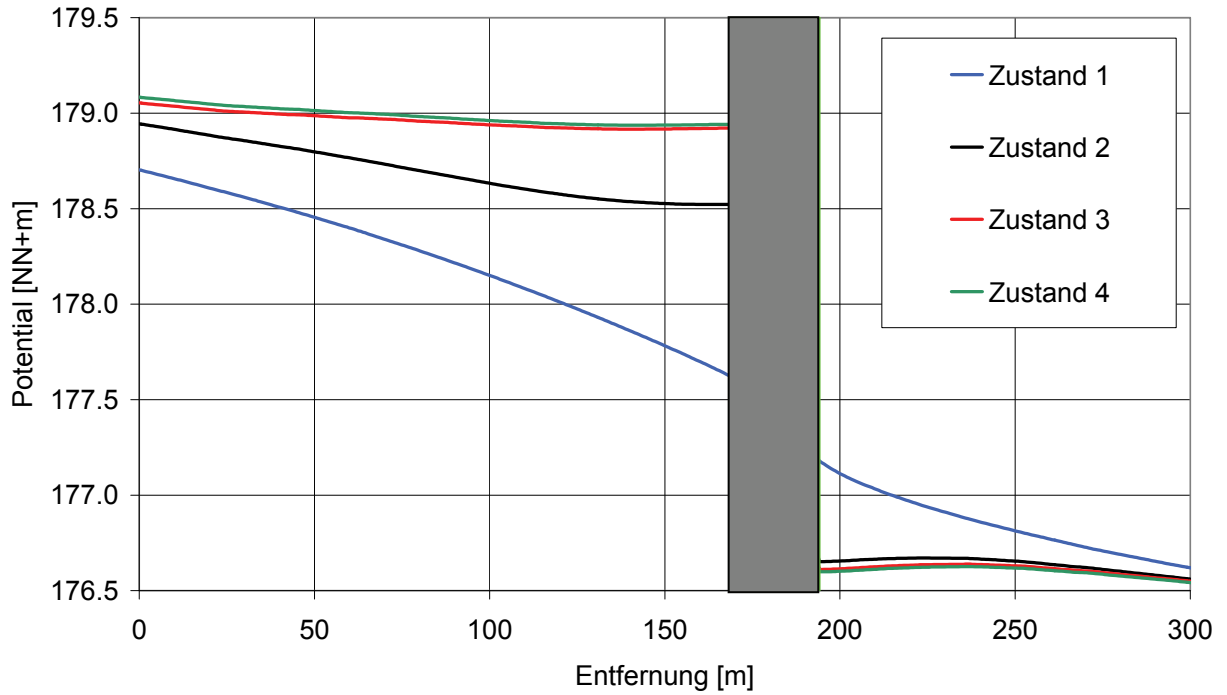


Bild 9: Potentialverteilung der Zustände 1-4 in einem Schnitt durch das Wehr (grau unterlegt)

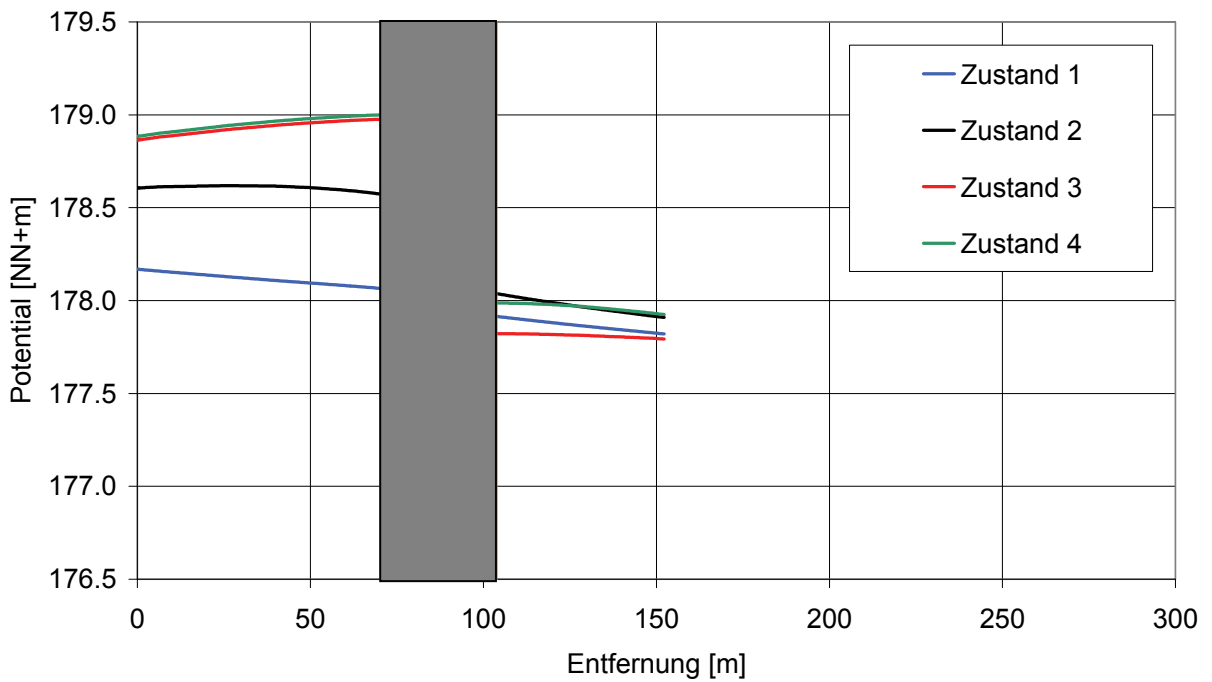


Bild 10: Potentialverteilung der Zustände 1-4 in einem Schnitt quer zur Schleusenkammer (grau unterlegt)

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Durch die Auswertung der Baugrundaufschlüsse aus verschiedenen Baugrundaufschlussprogrammen zwischen 1950 und 2011 wird das Fortschreiten des Lösungsprozesses des Oberen Tonanhydrits sichtbar. Auflösungsprozesse des Unteren Tonanhydrits wurden nicht festgestellt. Dies wird wie bereits erwähnt auf den geringen Gipsgehalt dieser Schicht und auf die schützende Wirkung des darüberliegenden Zwischendolomits zurückgeführt. Der Schicht des Zwischendolomits wird deshalb beim (zukünftigen) Baugrundaufschlussprogramm für die Schleusenverlängerung hinsichtlich ihrer Existenz, der Mächtigkeit und der mineralogischen Zusammensetzung besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

Durch den Bau der Wehranlage und die im Verlauf der Zeit nachfolgenden Sanierungsmaßnahmen erfolgte eine zunehmende Abschirmung der Grundwasserströmung im Bereich des Wehres und der Schleusen, so dass es zu einem Aufstau auf der Anstromseite und einem Absink auf der Abstromseite kommt. Hierdurch wird ein Anteil der Grundwasserströmung großräumig umgelenkt. Mit dem Grundwassermodell konnte man - trotz wesentlicher Vereinfachungen - diese Änderungen der Grundwasserverhältnisse für verschiedene Zustände der Sanierungsmaßnahmen sehr gut abbilden. Hierfür maßgebend waren die Sensitivität der Grundwasserstände auf die Sanierungsmaßnahmen, die Anzahl an Grundwassermessstellen und vor allem die Qualität der Messungen. Bei einem überschaubaren Modell, guter Sensitivität gegenüber Systemänderungen und sorgfältig aufgezeichneten Grundwasserdaten stellt eine inverse Parameterbestimmung die Methode der Wahl dar. In diesem Kontext lässt sich eine Vielzahl verschiedener Parameterkombinationen sehr effizient auswerten und die wahrscheinlichste auf Grundlage objektiver Kriterien auswählen. Mit dem Modell können nun geohydraulische Auswirkungen zukünftiger Baumaßnahmen, wie die Verlängerung der landseitigen Schleuse, untersucht werden.

Literatur

- Doherty J. (2003): Ground Water Model Calibration Using Pilot Points and Regularization. Ground Water Vol. 41, No. 2. pp 170-177.
- Franzius L. (1991): Verpressung durch Gipsauslaugung bedingter Hohlräume im Untergrund der Wehranlage Hessigheim/Neckar. - In: Zeitschrift für Binnenschifffahrt (ZfB) 1991, Nr. 24, pp 1224-1231.
- Wittke W. (1987): Staustufe Hessigheim/Neckar – Bericht zum Entwurf der Sanierungsmaßnahmen. (unveröffentlicht)
- Wittke W. (1997): Staustufe Hessigheim – Bericht über die Verlängerung des Dichtungsschleiers am rechten Neckarufer. (unveröffentlicht)