

DVGW-gefördertes F+E-Vorhaben

**Zeitbeständigkeit unverfilterter Brunnen in
Festgesteinsgrundwasserleitern Mittel-
und Süddeutschlands**

(Abschlussbericht, Juni 2003)

Bearbeiter:

Prof. Dr. Jürgen Wagner

Grundwasser und Geo-Forschung, Neunkirchen

Danksagung

Es existieren in Deutschland wahrscheinlich wenige hundert nichtverfilterte Festgesteinsbrunnen. Der DVGW hat mit der Förderung dieses Projektes einmal mehr gezeigt, dass er auch kleinere Wasserversorgungsunternehmen in seiner Betreuung berücksichtigt und auch für deren Probleme Lösungen erarbeitet.

An dieser Stelle sei dem DVGW gedankt, der das vorliegende Forschungs- und Entwicklungsprojekt finanziell gefördert hat.

Es hat sich bereits nach Abschluss der Arbeiten und nach probeweiser Vorlage des Entwurfs des hier vorliegenden Abschlussberichtes bei einigen Wasserversorgungsunternehmen ein großes Interesse an den Resultaten erkennen lassen. Die erarbeitete Hilfe scheint für die Praxis bei Wasserversorgungsunternehmen, in deren Brunnenbestand sich nichtverfilterte Brunnen befinden, die erhoffte Brauchbarkeit und Umsetzung zu finden, die mittels der nun ebenfalls vorliegenden EDV-Version zu konkreten Handlungsempfehlungen führt.

Dieser Abschlussbericht mit der dazugehörigen EDV-Anwendung kann auf der Homepage des DVGW unter www.dvgw.de heruntergeladen werden.

Neunkirchen und Ottweiler
Juni 2003

Inhalt

1 KURZE BESCHREIBUNG DER AUSGANGSSITUATION UND FORMULIERUNG DER WESENTLICHEN ZIELE DES FORSCHUNGSPROJEKTES	4
2 AUSWERTUNG DES SCHRIFTTUMS.....	5
3 DOKUMENTATION ZU AUSGEWÄHLTEN BRUNNEN, DATENBASIS ALS GRUNDLAGE FÜR DAS ERARBEITEN VON ZUSAMMENHÄNGEN UND ABHÄNGIGKEITEN	8
4 TYPISIERUNG UND KATEGORISIERUNG DER IN UNVERFILTERTEN FESTGESTEINSBRUNNEN AUFTRETENDEN ALTERUNGERSCHENUNGEN	11
4.1 STRATIGRAPHISCH-LITHOLOGISCHE EINFLÜSSE AUF DIE ZEITBESTÄNDIGKEIT UNVERFILTERTER FESTGESTEINSBRUNNEN SOWIE BERÜCKSICHTIGUNG EVENTUELLER BAULICHER ASPEKTE UND UNTERSCHIEDLICHER BETRIEBLICHER BEANSPRUCHUNG.....	11
4.2 KLASSIFIZIERUNG VON ALTERUNGERSCHENUNGEN UND AUFFÄLLIGKEITEN IN DEN UNTERSUCHTEN BRUNNEN, VERSUCH DER VERALLGEMEINERUNG DER GEWONNENEN ERKENNTNISSE	12
5 NUMERISCHE SIMULATION DER BRUNNENANSTRÖMUNG ÜBER HOCHPERMEABLE SCHICHT-/ BANKUNGSFUGEN UND DER ZUSTRÖMVERHÄLTNISSE AM SPERRROHRFUß.....	21
6 METHODISCHE HILFE ZUR BEWERTUNG DER ERGEBNISSE DER BRUNNENUNTERSUCHUNGEN, ZUR WEITGEHEND OBJEKTIVEN ABSCHÄTZUNG DER ZEITBESTÄNDIGKEIT UND ZUR FORMULIERUNG VON HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN IN FORM EINES EDV-PROGRAMMS.....	24
7 LITERATURVERZEICHNIS	36

1 Kurze Beschreibung der Ausgangssituation und Formulierung der wesentlichen Ziele des Forschungsprojektes

Im Festgestein Mittel- und Süddeutschlands ist ein Großteil älterer Brunnen lediglich mit einem Sperrrohr im oberen Teil ausgebaut, während im unteren Teil offener Fels ansteht und kein Filterrohr oder sonstiger Ausbau vorhanden ist. Dies führt dazu, dass nach einiger Zeit (Jahre oder Jahrzehnte) der bauliche Zustand und die oft damit verbundenen Eigenschaften einiger derartiger Brunnen sich drastisch verschlechtern. Exemplarisch können Aufsandungen von mehreren Zehnern von Metern, große Kavernenausbildungen mit überhängenden Bänken an Schichtfugen, die Zuströmung von oberflächennahem Grundwasser mit nachteiligen Eigenschaften oder die Veränderung der hydraulischen Leistung genannt werden.

Derzeit gibt es keine objektive Grundlage, die den Wasserversorgungsunternehmen (WVU) als Entscheidungshilfe dienen könnte, welcher Handlungsempfehlung (z. B. kein Handlungsbedarf, Regenerierung des Brunnens erforderlich, Sanierung angeraten, Aufgabe des Brunnens sinnvoll) im Einzelfall gefolgt werden sollte. Das Erkennen und die Herausarbeitung wissenschaftlicher Zusammenhänge etwa zwischen stratigraphischen, lithologisch-faziellen, tektonischen, hydrochemischen Gegebenheiten, Tiefe eines Brunnens und Betriebsweise einerseits und dem Alterungsprozess (insbesondere der Formbeständigkeit) des Brunnens im Felsteil andererseits sollten deshalb zunächst als Grundlage erarbeitet werden.

Diese Grundlage bildet die Voraussetzung für eine ebenfalls zu formulierende Hilfe in Form einer objektiven Handlungsempfehlung zur Einschätzung von Brunnenzustand und geeigneter Brunnenerhaltungsmaßnahme durch das WVU. Als Hilfe für die Wasserversorger war neben den beschreibenden Erfahrungen mit verschiedenen Brunnen auch eine EDV-Hilfe angestrebt, die auch Nichtwissenschaftlern bei der Entscheidungsfindung Unterstützung bietet. - Wenngleich in nahezu jedem hydrogeologischen oder wasserwirtschaftlichen Standardwerk zum generellen Thema Alterung von Brunnen sehr umfassende Beiträge beinhaltet sind, fehlen zu den speziellen Problemen tiefer nichtausgebauter Brunnen in offenen Festgesteinen und der dort bestehenden immanenten Einsturzgefahr objektive Empfehlungen.

Das Know how und die Entwicklung am Markt werden fast ausschließlich von Dienstleistungsunternehmen beeinflusst. - Neben den seriösen Dienstleistern agieren auch solche, die, entweder aus unvertretbarem überzogenen Sicherheitsdenken oder aus Gründen der eigenen wirtschaftlichen Vorteilnahme, bei den WVU auch bei objektiv gesehen unkritischen Bestandsaufnahmen von Brunnenzuständen unangemessene, weil technisch und wirtschaftlich überzogene Forderungen, vorschlagen und umsetzen. - Bei richtiger Handhabung der Untersuchungsergebnisse ist gerade die visuelle Beurteilung des Felszustandes in der Lage, ausschlaggebende Erkenntnisse zu erbringen, die nicht nur zur Bestätigung der Resultate der Geophysik und bisweilen auch durchgeführter Leistungspumpversuche zu sehen sind, sondern immer wieder einmal auch eine unerwartete neue Interpretation zulassen.

So sind es letztlich die im Laufe der letzten Jahre immer drängenderen Probleme der Praxis des Betriebes nichtverfilterter Brunnen sowie zukünftig anstehende Situationsentscheidungen bei einer im Laufe der Jahre zwangsweise größer werdenden Zahl von Wasserversorgern im südwestdeutschen Raum (allein im Saarland und in Rheinland-Pfalz sind etwa zweihundert Brunnen betroffen!), die es angeraten erscheinen lassen, nachvollziehbare wissenschaftliche Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften des Gebirges, des Bauwerks Brunnen und den Alterungserscheinungen herauszufinden. - Derzeit erkennbare Zusammenhänge sind im Vorfeld der Bearbeitung dieses Forschungsprojektes durch über zweihundert TV-Befahrungen von Unternehmen dokumentiert worden, deren Archive durchgearbeitet werden konnten. So war zu vermuten, dass (beispielsweise) der Art des Kornbindemittels (tonig, ferritisch, silikatisch, karbonatisch usw.) bei Sandsteinen im Mittleren Buntsandstein, welcher gebietsweise den Hauptgrundwasserleiter repräsentiert, eine dominierende Bedeutung bei der Formstabilität des Brunnens zugestanden werden könnte. Nach diesen Vermutungen schienen selbst große Felsüberstände an Schichtfugen duldbar zu sein, wenn es sich um silikatische oder ferritische Bindemittel handelt, wohingegen tonige oder arkosische Sandsteine schon bei sehr unbedeutenden Auswaschungen nachbrechen.

Für mehrere Brunnen im Rotliegenden und einigen in den wasserführenderen Partien im Karbon war anzunehmen, dass wahrscheinlich die tektonische Überprägung die Hauptrolle für eine Zeitbeständigkeits-Prognose, und zwar möglicherweise weitgehend unabhängig von Lithologie und

Kornbindemittel, eine Rolle spielen könnte. Sich andeutende Rutschungen von Felsblöcken, so schienen die damals gesichteten Videoaufnahmen den Schluss aufkommen zu lassen, finden tatsächlich innerhalb kürzerer Zeiten statt, so dass die offenen Bohrlöcher nicht zeitbeständig sind und in derartigen Fällen eine entsprechende Sofortmaßnahme ergriffen werden sollte.

Brunnen im Muschelkalk könnten nach den damaligen, zahlenmäßig jedoch sehr ungesicherten Untersuchungsergebnissen wesentlich in ihrer Form- und Zeitbeständigkeit von den Einflüssen des Brunnenbetriebes und des Hydrochemismus abhängig sein. Nach den untersuchten Fällen müsste bei Betreiben dieser Brunnen mit einer Absenkung nahe der hydraulisch zulässigen Maximalabsenkung auch liegendes Buntsandstein-Kluftwasser im Gesamtförderregime zu beachten sein, so dass im Kontaktbereich beider stratigrafischer Einheiten die dort noch vorhandene überschüssige freie Kohlensäure mit den kalkigen Bestandteilen reagiert und es zu beträchtlichen Auflösungserscheinungen kommt. Die dadurch entstehenden Kavernen zeigten sich anscheinend jedoch als sehr formstabil und könnten, sofern dies durch die Untersuchungsergebnisse des Forschungsprojektes bestätigt würde, vermutlich ohne weitere Maßnahmen viele Jahre überstehen.

Alle hier nur kurz angedeuteten Resultate stützten sich vor dem Abschluss dieses Forschungsprojektes auf nicht systematisch gewonnenen und statistisch nicht abgesicherten Erkenntnissen. Aus diesem Grund haben die

GRUNDWASSER- UND GEO-FORSCHUNG (Zuwendungsempfänger und Projektleiter)
Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Wagner
Rodenheimweg 15
66538 Neunkirchen

und der

Zweckverband Wasserversorgung der Stadt- und Landgemeinden
des Kreises Neunkirchen in Ottweiler,
(vertr. durch deren Geschäftsführer, Herrn Dipl.-Ing. Stefan Kunz)
In der Etwies 6
66564 Ottweiler

Ende 1999 beim DVGW als Arbeitsgemeinschaft den Antrag gestellt, die „Zeitbeständigkeit unverfilterter Brunnen in Festgesteinsgrundwasserleitern Mittel- und Süddeutschlands“ zu untersuchen. Die wesentlichen Ziele dieses Projektes (Proj.-Nr. W 45/99) waren die

- Erarbeitung standortübertragbarer oder eingeschränkt standortübertragbarer und die
- Definition individualfallbezogener Erkenntnisse bezüglich
 - tolerierbarer,
 - kritischer und
 - zu Sofortmaßnahmen Anlass gebender Alterungserscheinungen an Brunnen mit Sperrrohrsicherung und unten offen anstehendem Festgestein sowie die
- Formulierung von auf wissenschaftlicher Basis begründeten, nachvollziehbaren, möglichst objektiven Handlungsempfehlungen für WVU zur Einschätzung des baulichen Brunnenzustandes und zur Entscheidungshilfe für die richtigen Brunnenerhaltungsmaßnahmen sowie den sinnvollen Zeitpunkt für diese Maßnahme in Festgesteinsbrunnen ohne derzeitigen Ausbau im tiefen Teil.

2 Auswertung des Schrifttums

Zur Thematik des hier bearbeiteten Forschungsprojektes wurde die Literatur im wesentlichen unter zwei Gesichtspunkten gesichtet und ausgewertet: Zum einen wurde die Untersuchungsmethodik der optischen Inspektion von Brunnen mittels Kamerabefahrungen recherchiert, zum anderen wurde nach Publikationen gesucht, in denen Brunnenalterungserscheinungen im Allgemeinen und solche in nichtausgebauten Festgesteinsbrunnen im Speziellen behandelt werden. - Berücksichtigt wurden als Standardwerke anzusehende Lehrbücher aus dem Wissenschaftsbereich der Angewandten Hydrogeologie, der Wasserwirtschaft bzw. Wassergewinnung, der Bohrtechnik bzw. des Brunnenbaus sowie die wichtigsten deutschsprachigen Periodika. - In dieser zusammenfassenden Ergebnisbeschreibung wird exemplarisch nur auf die zweitgenannte obige Thematik verkürzt eingegangen.

Die wichtigsten Alterungserscheinungen von Brunnen sind u. a. im **DVGW-Regelwerk, Merkblatt W 130**, Brunnenregenerierung [1], genannt. Aufgezählt sind dort Verockerung, Versandung, Korrosion, Versinterung, Verschleimung und Aluminiumausfällung. - Alle Erscheinungen kommen bei Brunnen mit vollständigem Ausbau, aber auch bei unverfilterten Brunnen, d. h. bei solchen ohne Ausbau, vor. Darüber hinaus existieren bei letztgenannten weitere Alterungserscheinungen, die in obiger Auflistung nicht genannt sind und die insbesondere inhaltlich im vorliegenden Projekt bearbeitet werden. - In Lehrbüchern und Periodika wird die Thematik Brunnenalterung im Gegensatz zur optischen Untersuchung dieser Erscheinungen umfassend und sehr ausführlich gewürdigt. Allerdings wird, von nachfolgend eingehender diskutierten Ausnahmen abgesehen, den speziell in „offenen“ Brunnen auftretenden Formen der Alterung kein großer Raum gewidmet. Teilweise wird die Zeitbeständigkeit unverfilterter Brunnen auch gänzlich unrichtig eingeschätzt.

Grund für die knappe Behandlung ist teilweise die Tatsache, dass nicht ausgebaute Brunnen zahlenmäßig im Vergleich zu den ausgebauten insgesamt eine untergeordnete Rolle spielen. Ferner sind die unverfilterten bevorzugt in bestimmten Regionen Deutschlands konzentriert, wo sich ihr Anteil an der Gesamtzahl der Brunnen jedoch bemerkenswert erhöhen kann und bisweilen sogar über der Zahl ausgebaute Brunnen in der entsprechenden Großregion liegt.

Explizit wird auf unverfilterte, d. h. nicht ausgebaute Brunnen auch kurz eingegangen bei **Balke, Beims, Heers, Hölting, Homrighausen, Matthes**, 2000, [2]. Nach Meinung dieser Autoren dient die Verrohrung bei Festgesteinsbrunnen vornehmlich zur Stabilisierung des Bohrlochs, da bei längeren Nutzungszeiten - insbesondere bei häufigem Ein- und Ausschalten der Pumpe und den damit einhergehenden Druckstößen - es zur dort beschriebenen Alterungserscheinung des Ablösens von Gesteinspartikeln und zu Ausbrüchen kommen kann. Aus diesem Grund wird dort grundsätzlich auch für Festgesteinsbrunnen ein Ausbau empfohlen, wobei sich diese Empfehlung jedoch auf zwei andere Literaturstellen stützt, welche nachfolgend noch diskutiert werden.

E. Bieske, 1992, [3], geht ebenfalls näher auf „filterlose Bohrbrunnen“ ein und stellt fest, dass diese unter anderem „im Saargebiet mit Erfolg abgeteuft worden“ sind. Bieske beschreibt einen klassischen nicht ausgebauten Brunnenaufbau, bei dem lediglich im oberflächennahen Bereich ein Standrohr bzw. Sperrrohr eingebaut ist, das laut Bieske „gelegentlich mit einer Zementabdichtung hintergossen wird“. Im Vergleich zu ausgebauten Brunnen unterstellt Bieske den filterlosen eine geringere Lebensdauer und in der Folge den Zwang zu einer kürzeren Abschreibungszeit, verbunden mit höheren jährlichen Abschreibungskosten. Diese Aussage kann so nicht gehalten werden, da sie zum einen für einen doch beträchtlichen Teil dieser Brunnen nicht zutrifft und außerdem dort im Gegensatz zu ausgebauten Brunnen einige Alterungserscheinungen nicht auftreten (z. B. Versandung des Kiesraumes, Korrosion oder andere Alterungserscheinungen der Verrohrung), die mit entsprechenden Kosten für die Durchführung von Brunnenerhaltungsmaßnahmen verbunden sind.

Die bisher umfassendste Beurteilung der Thematik ist zu finden in **bbr Wasser und Rohrbau**, Heft 5, 1963 [4]. Dort führt E. Bieske jr. zunächst die Gründe auf, die dafür zu sprechen scheinen, eine Brunnenbohrung in standfestem Gestein unverbohrt zu belassen (wortgetreues Zitat in Kursivschrift):

- *Es werden die Kosten für die Lieferung und den Einbau der Filter- und Aufsatzrohre mit Kiesschüttung und allem Zubehör eingespart.*
- *Der unter erheblichem Kostenaufwand erreichte Endbohrdurchmesser wird nicht durch den Einbau von Filter- und Aufsatzrohren verkleinert und steht im ursprünglichen Ausmaß zum Einbau von Pumpen, Saugrohren und Zubehör zur Verfügung.*
- *Durch den Fortfall des Filtereinbaus und der dabei erforderlichen Kies-Stüttschicht wird gleichzeitig ein Eintritt des Wassers in den Brunnen ohne jeden Eintrittswiderstand ermöglicht.*

Im Anschluss geht Bieske auf die Kosten beider Brunnenarten ein und differenziert Anlagekosten und Abschreibungskosten, wobei, wie bereits weiter oben erwähnt, diese Betrachtung fachlich nicht haltbar ist, da die von ihm angenommene Lebensdauer von lediglich 10 Jahren für einen unverrohrten Brunnen weit an der tatsächlichen Situation der allermeisten Brunnen dieser Art vorbeizieht. Bemerkenswert sind allerdings die, wenngleich nicht auf statistisch abgesicherten realen Erfahrungen und konkreten Beispielen fußend, sondern eher vorsorglich befürchteten Gründe, die an besagter Stelle genannt werden, um vom Bau unverrohrter Bohrbrunnen abzuraten. Schließlich handelt es sich bei diesen Gründen vornehmlich um Alterungserscheinungen, welche, wie in diesem Forschungsprojekt gezeigt werden konnte, bei einigen, wenngleich bei weitem nicht allen unverrohrten

Brunnen auftreten können. Bieske nennt vier Gründe, die einen Nachfall herbeiführen oder einen unverrohrten Brunnen ganz zusammenstürzen lassen:

- Geologische Gründe

Gleichmäßiger oder auch einseitiger Gebirgsdruck, Erscheinungen tektonischer Natur, aber auch das Quellen von lehmigen und tonigen Zwischenschichten verursachen früher oder später Nachfall oder ein Zusammenschieben des ganzen Bohrlochs, machen es unbrauchbar und erschweren oder verhindern auch das Ziehen von eingebauten Pumpen und Saugrohren.

- Bohrtechnische Gründe

Bohrungen im standfesten Speichergestein in den erforderlichen Bohrdurchmessern werden nach einem der bekannten Meißelbohrverfahren abgeteuft. Die unvermeidlichen Erschütterungen beim Bohren und die durch große Schlaggewichte und hohe Schlagzahl erzeugten Schwingungen im Gestein verursachen Risse, Nachfall und ein Nachschieben des Gesteins, besonders bei stark einfallenden Schichten.

- Hydrogeologische Gründe

Aus hartem, gebundenem, homogenem Gestein treten keine Wassermengen aus, da eine Wasserführung hier überhaupt nicht vorhanden ist. Eine nennenswerte Wasserführung im festen Speichergestein ist nur in den Störungszonen des Gebirges zu erwarten, die von Klüften durchzogen und gerade durch die Wasserführung mehr oder weniger stark brüchig ist. Es handelt sich also um Gesteinspartien, die ohnehin bröckelndes, in einzelne Gesteinstrümmel aufgelöstes Gestein aufweisen. Durch die Wasserbewegung werden einzelne Gesteinsstücke ausgewaschen, Sand oder tonige Bestandteile der Kluffüllung ausgespült und sammeln sich als Nachfall im Sumpf der Bohrung. - Der Eintritt des Wassers aus dem Festgestein in den Brunnen vollzieht sich kaum jemals in der ganzen Fläche der Bohrlochwandung, sondern fast immer an einzelnen Punkten. Wenn der Wasserspiegel abgesenkt wird, spritzt das Wasser aus den verschiedenen Spalten, wie sich immer beobachten lässt, mehr oder weniger heftig in das Bohrloch hinein und erodiert die Bohrlochwandung. Es spült den Sand aus den Kluffüllungen mit heraus, was oft zu lang anhaltenden Trübungen führt, zumal die Ausfüllungen der Klüfte meist aus staubfeinem Gesteinsmehl bestehen, die das Wasser lange Zeit färben können.

- Fördertechnische Gründe

Bekanntlich herrschen bei den in Bohrbrunnen eingebauten Brunnenpumpen und Saugleitungen in Höhe der Einlaufsiebe sehr hohe Einströmgeschwindigkeiten. Es entstehen dort häufig Turbulenzerscheinungen, die zu starken Auswaschungen der Bohrlochwand führen. Die Pumpe selbst kann durch diese Auswaschungen gerade in der Zone, die am gefährdesten ist, Nachfall verursachen und es können hier durch nachstürzendes Gestein die Pumpe oder andere Einbauteile festgeklemmt und blockiert werden.

Generell sei vorab nochmals betont, dass durch die beschriebenen zeitabhängigen Veränderungen in einem Brunnen der Eindruck beim Leser erweckt wird, als seien generell alle oder der Großteil der unverrohrten Brunnen von derartigen nachteiligen Geschehnissen betroffen, was jedoch beileibe nicht der Fall ist, wie die Existenz zahlreicher Brunnen beweist, die auch mehr als ein halbes Jahrhundert nach ihrer Herstellung sich noch in einem guten baulichen Zustand befinden.

Zahlreiche andere in den bekannten Periodika enthaltene Abhandlungen zur Brunnenalterung behandeln vornehmlich die bei allen Brunnenarten prinzipiell möglichen Alterungserscheinungen wie Verockerung, Versandung und Versinterung und Korrosion. Dabei werden neben den theoretischen Ablaufmechanismen und den Klärungsversuchen für deren Ursachen und Vermeidung bzw. Verminderung sehr häufig auch Regenerierungsmaßnahmen gleichzeitig mit den Alterungserscheinungen thematisch mitbehandelt oder gar in den Vordergrund gestellt. - Große Bedeutung für die Zeitbeständigkeit nicht ausgebaute Brunnen hat die Entwicklung am und unterhalb des Sperrrohrfußes. Dabei spielt auch die Korrosion eine bedeutende Rolle. Wenngleich zu dieser Thematik im oben genannten Schrifttum beachtenswerte Beiträge enthalten sind, existieren Publikationen neueren Datums, in denen die wissenschaftlichen Zusammenhänge des Auftretens und der Erscheinungsformen sowie der Umwandlung verschiedener Eisenmodifikationen weitaus umfassender dargelegt werden. Zwar handelt es sich in der Regel dabei nicht um Beiträge, welche die Zielrichtung besitzen, Korrosionsvorgänge im Brunnen zu erforschen. Vielmehr sind sie insbesondere erarbeitet worden, um Korrosion in Rohren der Wasserverteilung zu verstehen und mit ihr in geeigneter Weise umgehen zu können. Dennoch sind die dort gefundenen Resultate für die hier interessierenden Probleme mehr oder weniger direkt übertragbar und nutzbar.

In diesem Zusammenhang sei auf zahlreiche Veröffentlichungen der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe bzw. des TZW Technologie Zentrum Wasser, z. B. von

E. Böhler, 1997, [5], A. Kuch, 1984, [6] und H. Sontheimer, A. Kuch, I. Wagner, 1983, [7], hingewiesen.

3 Dokumentation zu ausgewählten Brunnen, Datenbasis als Grundlage für das Erarbeiten von Zusammenhängen und Abhängigkeiten

Bei zahlreichen öffentlichen Wasserversorgungsunternehmen wurden während der Projektlaufzeit ältere Videoaufnahmen von TV-Brunnenuntersuchungen beschafft und ausgewertet. Des Weiteren wurden bei einer mittlerweile nicht mehr bestehenden Dienstleistungsfirma aus dem Tätigkeitsbereich Brunnensanierung deren Video-Duplikate (Archivmaterial) gekauft und ausgewertet. Zum Dritten konnte das Archivmaterial der Firma GRUNDWASSER- UND GEO-FORSCHUNG für das Forschungsprojekt verwendet werden. Schließlich sei auf die aktuellen TV-Befahrungen hingewiesen, welche bereits bei Antragstellung des damaligen F+E-Vorhabens vorgesehen und während der Laufzeit auch durchgeführt wurden. Alle vier genannten Informationsquellen umfassen über 300 Filme von Brunnenbefahrungen. Von diesen sind 40 Brunnen ausgesucht worden, die aus unterschiedlichen Gründen in die zur Auswertung vorgesehene Datenmatrix Eingang fanden. Vierunddreißig dieser Brunnen sind in der Verfügungsberechtigung von Stadtwerken, Gemeindewerken, Kommunen oder Wasserzweckverbänden, die allesamt zum Zweck der öffentlichen Wasserversorgung ihre Brunnen betreiben. Sechs dieser Brunnen gehören Privatfirmen oder Aktiengesellschaften aus dem Bereich der Getränkeindustrie, des Gärtnereiwesens, der Eisen- und Stahlindustrie oder der Automobilbranche. Die dortigen Brunnen werden primär für die Brauchwasserversorgung, die Trinkwasser-Eigenversorgung oder für Produktionszwecke betrieben und dienen nicht der öffentlichen Wasserversorgung.

Während auf den Inhalt dieser Datenmatrix in Kapitel 4 eingegangen wird, wird an dieser Stelle zunächst ihr genereller Aufbau sowie die Qualität der Dateneinträge an einem einzigen Beispiel erläutert. - Die Spaltenüberschriften der Datenmatrix sind vier Blöcken zugeordnet:

Im Block Eins werden allgemeine Angaben zu den Brunnen und der TV-Befahrung gemacht. - In der in allen vier Blöcken linken Spalte ist zur Einordnung bzw. Identifikation eine durchlaufende Nummer aufgenommen worden. In der zweiten Spalte ist der Auftraggeber für die Durchführung der Brunnenverfilmung genannt, die dritte Spalte enthält die Brunnenbezeichnung. Das Datum der optischen Untersuchung ist in Spalte vier genannt. In den Spalten fünf bis neun folgen Angaben zum Brunnen selbst, wie (in der Spaltenreihenfolge) Tiefe, Durchmesser, Alter, Angabe darüber, ob er zum Befahrungszeitpunkt noch immer oder lediglich zu einem früheren Zeitpunkt als Betriebsbrunnen fungiert/e.

Block Zwei differenziert, so vorhanden, die bedeutenden optisch ersichtlichen Alterungserscheinungen. Wie bereits erwähnt, gibt Spalte Eins nochmals die laufende Nummer wieder. In den Folgespalten Zwei bis Acht des zweiten Datenmatrix-Blockes werden in Form textlicher Beschreibungen Angaben zum Sperrrohrzustand, zum Sperrrohrfuß, zu eventuell vorhandenen Bankungsfugen, zur Stratigraphie, zu Vertikalklüften, zu erkennbarem Nachfall bzw. Teilverschlüssen sowie zur Art bzw. Mächtigkeit der Auflandung im Brunnentiefsten gemacht.

Block Drei beinhaltet drei teilweise in sich nochmals untergliederte Teilblöcke, welche eine weitere Detaillierung der optischen Alterungserscheinungen ermöglichen oder als denkbare Bestätigung der durch die TV-Befahrung erhaltenen Resultate dienen und in einigen Fällen auch Quantifizierungen liefern.

Der erste Teilblock listet unterstützende Messdaten durch die Geophysik auf, wobei die Spaltenüberschriften die Fahrten mit verschiedenen Sonden oder bestimmten Verfahren wiedergeben. Nach aufsteigenden Spalten werden angesprochen: Kaliber, FLOW, TEMP/SAL, Gamma Ray und FEL. - Im zweiten Teilblock werden einige Werte aus der chemischen und bakteriologischen Analyse aufgeführt, und zwar zunächst chemische Summenparameter, danach bemerkenswerte Einzelparameter und schließlich die häufig in systematischen Brunnenwasseruntersuchungen enthaltenen Angaben zur Keimbelastung. - Der dritte Teilblock geht auf Pumpversuchsergebnisse ein. - Ebenso wie Auffälligkeiten oder Veränderungen im Hydrochemismus eine Alterung eines Brunnens dokumentieren können, kann eine Veränderung in der hydraulischen Leistungsfähigkeit Hinweis auf eine kritische Entwicklung der Zeitbeständigkeit eines Brunnens sein. Dies gilt sowohl für eine

Verminderung (Kolmation im Ringraum durch Feinkorn oder Verockerung) als auch für eine Erhöhung der Ergiebigkeit (Freispülen von Bestegen auf Klüften u. ä.).

Block Vier dient dazu, besondere Pointierungen zu setzen, die infolge der Kamerabefahrung einem Brunnen zugesprochen werden. Auch hier ist in der ersten Spalte die laufende Nummer wiedergegeben, Spalte Zwei stellt unter der Überschrift interne Bemerkungen Kommentierungen des Befahrungstrupps zusammen, in der dritten Spalte wird eine vorläufige und zusammenfassende Wertung des Brunnens, seiner Besonderheiten und Auffälligkeiten vorgenommen. Die letzte Spalte des Blocks Vier beinhaltet eine vereinfachte Gruppenzuordnung des jeweiligen Brunnens in Form einer Ziffer. Diese bedeuten:

- (1) Trotz seines hohen Alters zeigt der Brunnen keine wesentlichen Alterungserscheinungen, sein Weiterbetrieb ist auch ohne weitere Maßnahmen möglich.
- (2) Der Brunnen hat zwar bereits ein hohes Alter, ist jedoch auch von starken Alterungserscheinungen geprägt. Es sind kurz oder mittelfristig Brunnenerhaltungs- bzw. Sanierungsmaßnahmen erforderlich, um den Brunnen weiterhin ungefährdet betreiben zu können.
- (3) Es handelt sich um einen Brunnen, dessen derzeit bestehender Ausbau (vollständige Verrohrung oder ausschließlich Sperrrohr im oberen Teil) entfernt wurde und wo somit eine Einschätzung des Bohrlochzustandes vor dem Einbau der früheren Verrohrung (mit Vorbehalt!) ermöglicht wird.
- (4) Offenes Bohrloch, in welchem ein Ausbau zu einer Grundwassermessstelle vorgesehen ist und in dem zum Befahrungszeitpunkt noch kein Einfluss einer langzeitigen Grundwasserentnahme zu berücksichtigen ist. Unter Ziffer 4 werden nur solche Fälle eingeordnet, in denen das Bohrloch keine Auffälligkeiten in Form von „scheinbarer Alterung“ zeigt.
- (5) Gleiche Zuordnungskriterien wie unter 4, mit dem Unterschied, dass hier optische Veränderungen dokumentiert sind, die später fälschlicherweise als Alterung angesprochen werden könnten.
- (6) Die Brunnen werden dieser Gruppe zugeordnet, wenn die unter den Punkten 1 bis 5 beschriebenen Kriterien nicht oder nur ungenau zutreffen.

Die vollständige Datenmatrix besteht aus 28 Spalten und über 300 Zeilen (= Brunnen) und enthält 8.680 Informationsfelder. - Exemplarischer Auszug aus der angesprochenen Datenmatrix:

Block 1

Allgemeine Angaben								
<i>lfd. Nr.</i>	<i>Auftraggeber</i>	<i>Brunnenbezeichnung</i>	<i>Datum der Befahrung</i>	<i>Tiefe</i>	<i>Durchmesser</i>	<i>Alter</i>	<i>Betriebsbrunnen?</i>	<i>Erkundungsbohrung?</i>
131	Stadtwerke Völklingen	Differten 2	31.12.1998	57,0	400 mm	ca. 35 Jahre	ja	nein

Block 2

Optisch erkennbare Alterungserscheinungen (Brunnen-TV)							
<i>lfd. Nr.</i>	<i>Sperrohrzustand</i>	<i>Sperrohrfuß</i>	<i>Bankungs-/Schichtfugen</i>	<i>Stratigraphie</i>	<i>Vertikalklüfte</i>	<i>Nachfall oder Teilverschlus</i>	<i>Auflandung</i>
131	starke Korrosionen, Abplatzungen, Lochfraß, Risse	eindeutig ersichtliche Hinweise auf Hinterströmung	große Ausspülungen bei Wechsel der Lithologie mit Felsüberstand und Querschnittsveränderungen	Mittlerer Buntsandstein (sm), überwiegend feinsandig, kaum Kies- oder Konglomeratlagen; feinblättrig	keine	Ausbrüche aus der Wand, die jedoch bis zum Brunnensumpf gefallen sind	vorhanden, vermutlich mehrere Meter mächtig

Block 3

<i>lfd. Nr.</i>	Unterstützende Messdaten durch Geophysik					Chemie-/Bakteriologie-Werte			Pumpversuchsergebnisse
	<i>Kaliber</i>	<i>Flowmeter</i>	<i>TEMP/SAL</i>	<i>Gamma Ray</i>	<i>FEL</i>	<i>Summenparameter</i>	<i>Einzelparameter</i>	<i>Keime</i>	
131	bestätigt Bohr-Ø; an Schichtfugen D>1 m	vier Zuflusshorizonte, an Schichtfugen gebunden	Messwerte bestätigen die FLOW-Kurven	Tonhorizonte unterhalb der Ausspülungen	inhaltliche Ergänzung zu γ-Ray	unauffällig	Nitratwert leicht erhöht, Fe und Mn ebenfalls	allenfalls bei Hochwasser auffällig	evtl. Ergiebigkeitserhöhungen im Verlauf der letzten Jahre

Block 4

<i>lfd. Nr.</i>	WVU- oder Gutachterinterne Bemerkg.	zusammenfassende Kommentierung	Einordnung in Gruppe
131	Brunnen noch nicht akut einsturzgefährdet	stark ausgeprägte Alterungserscheinungen einschließlich Verockerungen im Felsteil eines langjährig intensiv betriebenen Brunnen	2

4 Typisierung und Kategorisierung der in unverfilterten Festgesteinsbrunnen auftretenden Alterungserscheinungen

4.1 Stratigraphisch-lithologische Einflüsse auf die Zeitbeständigkeit unverfilterter Festgesteinsbrunnen sowie Berücksichtigung eventueller baulicher Aspekte und unterschiedlicher betrieblicher Beanspruchung

Entsprechend dem Arbeitsprogramm im Projektantrag wurden die in die Datenmatrix aufgenommenen Brunnen unter mehreren Gesichtspunkten aus der großen Zahl beschaffter TV-Dokumentationen selektiert. Als vermutlich maßgebliche Einflussfaktoren auf die Zeitbeständigkeit unverfilterter Brunnen wurden zu Beginn stratigraphisch-lithologische Kriterien erwartet, aber auch die Vermutung geäußert, dass die Art, wie ein Brunnen betrieben wird und wie seine Dimensionierung gestaltet wurde, eine Alterung beeinflussen können.

Aus diesem Grund wurde zunächst eine Auswahl der geologischen Formation getroffen, in der genügend unverrohrte Brunnen niedergebracht sind, so dass es möglich ist, an einer größeren Zahl von Objekten mehrere Einflussfaktoren überprüfen zu können, während die Randbedingung Stratigraphie/Lithologie in diesen Fällen möglichst unverändert gehalten wird. - Andererseits war natürlich zu fordern, dass auch der Einfluss gerade dieser geologischen Formation abgeschätzt werden kann, indem bei Konstanthalten der übrigen denkbaren Einflussfaktoren Brunnen in anderen geologischen Formationen auf ihre Zeitbeständigkeit inspiziert werden. Das beschaffte und noch nicht zahlenmäßig eingeeengte Videomaterial beinhaltet optische Untersuchungen von Brunnen, welche folgende Formationen erschließen:

- Devon (Quarzite, Kalke und Schiefer des Rheinischen Schiefergebirges, - Region Eifel und Hunsrück).
- Karbon (Konglomerate, Sandsteine und Tonschiefer im intramontanen limnischen Saar-Kohlebecken).
- Perm (vorwiegend Sand- und Schluffsteine im Oberrotliegenden des Saar-Nahe-Troges).
- Trias (fast die gesamte Korngrößen-Bandbreite der klastischen Sedimente des Unteren und Mittleren Buntsandsteins sowohl aus dem Randbereich des Pariser Beckens als auch aus dem Pfälzer Bergland einerseits sowie kalkige Sedimente des Oberen Muschelkalkes andererseits).

Bei der zahlenmäßigen Einengung dieser Daten wurde die Trias-Formation, namentlich der Mittlere Buntsandstein, als die quasi stratigraphisch-lithologische „Vergleichsmäßigung“ definiert, d. h. im Rahmen der Überprüfung der Einflüsse anderer denkbarer Faktoren, bei denen, wie bereits oben erwähnt, die Stratigraphie/Lithologie stets unverändert bleiben sollte, war vorgesehen, auf möglichst viele Brunnen aus dieser Formation zugreifen zu können. - Diese Formation (der Begriff Buntsandstein bezeichnet streng genommen ein geologisches Alter, nicht eine Gesteinsart!) wird in ihrem Verbreitungsgebiet in Deutschland (z. B. Rheinland-Pfalz, Hessen, Thüringen, Saarland) meist wasserwirtschaftlich intensiv genutzt. Im Saarland wird der Mittlere Buntsandstein, zusammen mit den Kreuznacher-Schichten aus dem Oberrotliegenden, als Hauptgrundwasserleiter bezeichnet, da sowohl das Speichervermögen als auch die Transmissivität hoch sind. Als Folge der genannten Charakteristika (Mächtigkeiten, Verbreitung, Aquiferparameter) ist eine große Zahl von Brunnen abgeteuft worden, wovon regionabhängig eine ansehnliche Zahl unverfiltert ist. Je nachdem, welches Teilgebiet ausgewählt wird, können sich entweder selbst über größere Entfernungen die verschiedenen Eigenschaften des Gesteins von Brunnen im Mittleren Buntsandstein tatsächlich weitgehend unverändert beobachten lassen. Andererseits gelingt es in bestimmten Gebieten aber auch, gewünschte Veränderungen über relativ geringe Distanzen, bspw. zwischen nur wenige hundert Meter voneinander entfernten Buntsandsteinbrunnen, festzustellen.

So existieren große Buntsandsteinschollen (Horste oder Gräben) mit starker tektonischer Beanspruchung des Grundwasserleiters in den Randbereichen und nahezu söhlig, ungestörter Lagerung im Zentrum großer geologischer Synklinalen. Gleichermaßen sind mächtige, lithologisch homogene Gegebenheiten in Buntsandsteinbrunnen zu finden, aber auch faziell sehr filigran differenzierte Schichtkomplexe mit Schräg- oder Kreuzschichtungen, mit dickbankigen Sandsteinen und einem vorherrschenden Kornbindemittel oder blättrige Wechselfolgen von Tonen, Schluff- und Feinsandsteinen neben Kiesschichten oder Konglomeraten. Viele Eigenschaften des Gesteins pausen sich durch in der hydrogeologischen Charakteristik, d. h. es gibt sehr hoch- und sehr geringpermeable Partien oder Regionen im Buntsandstein.

Folglich gelingt es am ehesten in Buntsandsteingebieten mit in mehreren Brunnen gleich bleibenden stratigraphisch-lithologischen und hydrogeologischen Randbedingungen, auch Brunnenbauwerke zu finden, die sich entweder (nur) im Durchmesser, (nur) in der Tiefe oder (nur) in der Art, wie sie betrieben werden, unterscheiden.

Innerhalb der Schichten und Brunnen im Mittleren Buntsandstein kann zwar eine große Bandbreite von Korngrößen, Kornbindemittel, Gesteinsarten, Bruchtektonik usw. überstrichen werden. Insbesondere hinsichtlich des letztgenannten Punktes sind jedoch in einer Vielzahl von Brunnen bei Vorhandensein von Klüften diese als stark ausgeprägte, sehr steil stehende bis saigere Einzel-Rupturflächen vorzufinden, die sogar oft klaffend anzutreffen sind. Eher untergeordnet sind intensive Zerstückerlungen des Gebirgsverbandes durch eine Vielzahl engständiger Scherflächen ausgebildet, die geschlossen sind, sich kreuzen bzw. schneiden können und zu einer intensiven kleinskaligen Zerrüttung des Festgesteins führen. Da dies aufgrund der Sprödigkeit des Gesteins bei vielen Karbongesteinen jedoch der Fall ist (bei Buntsandsteinbrunnen in Gestein mit silikatischem Bindemittel ebenfalls), sind die angesprochenen Karbonbrunnen ebenfalls in der Datenmatrix enthalten.

4.2 Klassifizierung von Alterungserscheinungen und Auffälligkeiten in den untersuchten Brunnen, Versuch der Verallgemeinerung der gewonnenen Erkenntnisse

Die detaillierte Auswertung der TV-Farbkamerauntersuchungen der 40 ausgesuchten Bohrungen lässt eine Differenzierung der Brunnen hinsichtlich ihres Normalzustandes sowie der verschiedenen Alterungserscheinungen und Auffälligkeiten zu, die sich in den nachfolgenden Kategorien widerspiegelt. Mehrere der ausgewiesenen Kategorien beschreiben Alterungserscheinungen, die auch in Brunnen mit vollständigem Ausbau auftreten können, andere Alterungserscheinungen sind spezifisch für die nichtverfilterten Festgesteinsbrunnen. Der besseren Übersicht halber wird zunächst eine reine Auflistung der Kategorien vorgenommen und erst im Anschluss an diese Liste folgt eine Kommentierung einschließlich Beispiel/en (gekürzte Darstellung) sowie eine Aussage darüber, ob die Erkenntnisse fachlich so belastbar sind, dass eine Übertragung auf andere Brunnen bzw. eine generelle Formulierung vertretbar erscheint.

Einschließlich der Beschreibung des Idealzustandes eines Brunnens im nichtverfilterten Festgestein, welcher in einigen Fällen seinem tatsächlichen Anfangszustand nach Fertigstellung und Abnahme entspricht, können elf Kategorien unterteilt werden, die schlussendlich Auswirkungen auf die Zeitbeständigkeit haben oder haben können:

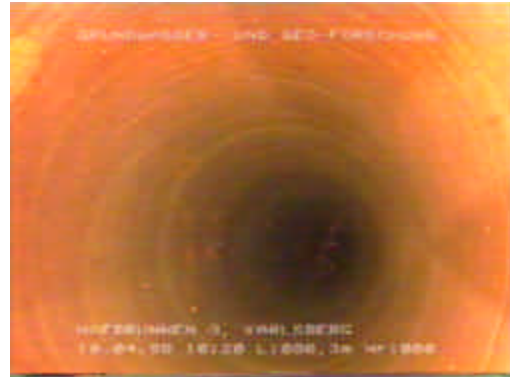
1. Brunnen im schadensfreien Originalzustand
2. Brunnen mit weitgehend gleichmäßiger Querschnittsvergrößerung infolge Absandung
3. Brunnen mit nicht mehr radialsymmetrischem Querschnitt
4. Brunnen mit nennenswerten Ausspülungen an Schicht- und Bankungsfugen
5. Brunnen mit großen Kavernenbildungen
6. Brunnen mit eingerutschten Gesteinsblöcken
7. Brunnen mit nennenswerten Erosionserscheinungen an Klüften und Spalten
8. Brunnen mit relevanter Sperrrohrhinterströmung oder freigespültem Sperrrohrfuß
9. Brunnen mit beträchtlichen Auflandungen
10. Brunnen mit Lochfraß im Sperrrohr
11. Brunnen mit Querschnittsverringern durch Aufwachsungen

Kategorie 1: Brunnen im schadensfreien Originalzustand

Stellvertretend für diese Gruppe sei ein Brunnen beschrieben, dessen baulicher Zustand weitgehend als Zielvorgabe für einen einwandfrei gebauten oder gut erhaltenen Brunnen des Bautyps unverfilterter Festgesteinsbrunnen dienen könnte. Es handelt sich um einen über viele Jahrzehnte sinnvoll betriebenen Brunnen, dessen U-Pumpe mit einem mehrere Meter langen Anströmrohr versehen ist, wodurch eine Erosion an den Bohrlochwänden in Saugkorbnähe sicher vermieden werden konnte. Der Sandstein ist dickbankig und kompakt, bevorzugt ferritisches Bindemittel hält die Körner im Verbund, während toniges Kornbindemittel zurücktritt. Wechsellagerungen von weichen Ton-, Schluff- und Feinsandsteinen mit harten Grobsand- oder Kies-/ Konglomeratlagen gibt es ebenfalls nur völlig untergeordnet. Bedeutende Vertikalklüfte fehlen gänzlich, der Grundwasserleiter kann nahezu als Porenaquifer angesehen werden. Bei der Herstellung des Bohrlochs wurde offensichtlich mit Sorgfalt und Sachkenntnis vorgegangen. Der Brunnen kann vermutlich noch Jahre oder gar Jahrzehnte weiterbetrieben werden. Bild 1 zeigt beispielhaft den immer noch nicht zu beanstandenden Brunnen, der weitgehend frei von o. g. Alterungserscheinungen ist und eine noch

lange währende Zeitbeständigkeit haben dürfte. - Vorbildlich an Bohrungen mit hoher Zeitbeständigkeit ist in allen Fällen die Ausführung des Sperrrohrfußes, welcher durch arbeitsmethodisch richtiges Vorgehen bei Planung und Ausführung der Arbeiten seitens Planer und Bohrmeister einen idealen Anschluss bzw. Verbund zwischen Metallfuß und Festgestein gewährleisten muss. Wenngleich wohl jede ausführende Firma die Qualität einer derartigen Arbeit zusicherte, war sie in der Praxis bei Festgesteinsbrunnen eher die Ausnahme.

Bild 1: Alter Brunnen einer Privatbrauerei, der trotz seiner langen Betriebszeit keine Alterungserscheinungen zeigt. Die Wände sind glatt, der Querschnitt kreisrund, der Brunnen ist standfest.



Kategorie 2: Brunnen mit weitgehend gleichmäßiger Querschnittsvergrößerung infolge Absandung

Exemplarisch für diese Gruppe seien Brunnen aus der Datenmatrix genannt, die seit langer Zeit betrieben werden, ohne dass sich zu irgend einem Zeitpunkt eine Gefährdung ergeben hätte oder in absehbarer Zukunft ergibt. Probleme kann allenfalls eine zwar schwache, aber permanente Sandführung im Rohwasser verursachen. Die gleichmäßige Querschnittsvergrößerung infolge Absandung ist womöglich die unauffälligste Alterungserscheinung, die außerdem bei der optischen Inspektion kaum erkennbar ist. Sie wird in der Regel erst erkannt, wenn anhand eines alten Ausbauplans etwa erwartet werden kann, dass der Durchmesser des Bohrlochs im nichtausgebauten Brunnenteil kleiner oder etwa gleich dem Innendurchmesser des Sperrrohres sein sollte, dies aber nicht der Realität entspricht. Alte Brunnen können in den unterhalb des Sperrrohrfußes folgenden Bereichen dann durchaus größere Durchmesser als das Sperrrohr haben.

Sofern diese Absandung nicht über die ganze offene Bohrlochstrecke gleichmäßig bis zum Sperrrohrfuß auftritt, sondern erst allmählich nach der Tiefe hin einsetzt oder an bestimmte Schichten gebunden ist, wobei der Übergang zum Liegenden oder Hangenden ebenfalls allmählich einsetzt, ist die Bohrerweiterung durch gleichmäßige Querschnittsvergrößerung mit der optischen Befahrung überhaupt nicht erkennbar! In diesen Fällen ist die Quantifizierung des Durchmessers durch geophysikalische Messung unabdingbar. Hinweise des Brunnenbetreibers auf permanente Sandführung sollten in diesem Zusammenhang grundsätzlich auch als Anlass gesehen werden, rechtzeitig auf die Sinnhaftigkeit der sinnvollen geophysikalischen Ergänzungsuntersuchung, bspw. CAL- und FLOW-Messungen, hinzuweisen.

Kategorie 3: Brunnen mit nicht mehr radialsymmetrischem Querschnitt

Vielen Wasserversorgern bereitet das Abweichen eines Brunnenquerschnittes von der Radialsymmetrie, je nach Ursache dieser Erscheinung, massive Probleme. Ein nicht radialsymmetrischer Querschnitt kann nämlich etliche Gründe haben und z. B. dadurch entstehen, dass ungleichmäßige Absandung eine starke Ovalität bewirkt, dass Ausspülungen an Fugen, Spalten, Klüften verantwortlich für augenförmige Querschnitte sind oder bspw. auch dadurch, dass Gesteinsblöcke teilweise in den runden Querschnitt hineingleiten. Auch dicke Aufwachsungen seien als Ursache für ungleichmäßige Durchmesserverringerungen angeführt.

Bei bemerkenswerten Reduktionen des freien Durchmessers sind die potenziell damit einhergehenden Probleme hinlänglich bekannt oder vorstellbar. Jedoch sind selbst bei elliptischen Querschnittsvergrößerungen in der Praxis mehrfach Schwierigkeiten dadurch aufgetreten, dass etwa Zentrierkörbe an Pumpe und Steigleitung ihre Rolle nicht mehr wie gedacht übernehmen können. Diese Einbauten können bei den Schaltvorgängen der Pumpe kräftig an die offene Bohrlochwand schlagen, so dass im Laufe der Zeit dort entsprechende Folgewirkungen eintreten. Derartige Folgewirkungen können beträchtlich (Nachfall, Einsturzgefahr, Gefahr der Zerstörung tiefer befindlicher Pumpe o. ä.) oder aber ohne jede Bedeutung sein. Aus diesem Grund ist eine individuelle Beurteilung der Situation unentbehrlich und eine Generalisierung oder Übertragung der Erkenntnisse, verbunden mit entsprechenden Handlungsempfehlungen, nicht möglich.

Ohnehin sei betont, dass Brunnen, die dieser Kategorie zuordenbar sind, auch weiteren Kategorien zugeteilt werden können. Dies zeigen bereits die im vorletzten Absatz genannten Beispiele. In dieser Kategorie muss die Ursache des Abweichens von der Radialsymmetrie nicht unbedingt bekannt sein, allein die Tatsache, dass dieses für intakte Brunnen charakteristische Merkmal nicht mehr vorzufinden ist, genügt für die Zuordnung. - Die drei nachfolgend ausgewählten Beispiele zeigen zwar alle das Kriterium der nicht mehr bestehenden Radialsymmetrie. Die Gründe dafür hingegen überdecken eine ganze Bandbreite von Ursachen und sind bei jedem der abgebildeten Brunnen verschieden. In den genannten Fällen sind die Ursachen eindeutig (ingerutschter Festgesteinsblock, Kluft, Aufwachsung), so dass diese Brunnen primär oder zusätzlich auch einer anderen Kategorie zugeordnet werden könnten.

Bild 2: Veränderung der Radialsymmetrie durch seitlich in das Bohrloch eingerutschten, sichelförmigen Gesteinsblock, der den Querschnitt um ca. ein Drittel verringert.



Bild 3: Veränderung der Radialsymmetrie infolge erheblicher Erosion an einer durchschlagenden Kluft.

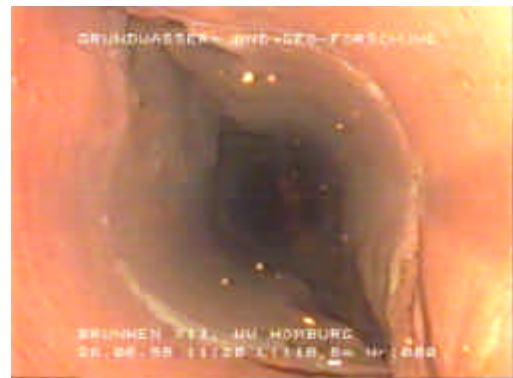


Bild 4: Veränderung der Radialsymmetrie durch karbonatische Aufwachsungen führt beim Pumpenein- und -ausbau und massiven Problemen.



Kategorie 4: Brunnen mit nennenswerten Ausspülungen an Schicht- und Bankungsfugen

Es handelt sich um eine der am häufigsten festzustellenden Alterungserscheinungen. Sie kommt in unterschiedlichster Ausprägung vor, beginnend mit unbedeutend sich darstellenden Einkerbungen bis zu mehrere Dezimeter tiefen Rücksprüngen des Liegenden mit größeren Felsüberständen auf einer Schichtungsfläche. Asymmetrische Erscheinungen sind häufig, die Regel ist jedoch die ringförmig in die Bohrlochwand eingeschnittene Fuge. Übergänge zu Kavernen sind fließend. Schicht- und Bankungsfugen können Ansatzstellen für das Loslösen von Gesteinsblöcken oder -platten vom übrigen Festgestein sein. Beispiele werden bei der Beschreibung der Kategorie 6 aufgeführt. - Wie der Vergleich von Videoaufnahmen und geophysikalischen Messergebnissen zeigt, ist die Ausbildung von Ausspülungen entweder mit dem lithologischen Aufbau im Schichtenprofil oder mit den Durchlässigkeiten und damit den Zustromverhältnissen im Gebirge verhaftet.

Sowohl Bankungs- als auch Schichtfugen können, müssen jedoch nicht durch klaffende Horizontalrisse, -fugen oder Spalten charakterisiert sein. Sind geöffnete Fugen jedoch vorhanden, ist in ausnahmslos allen Brunnen ein relevanter oder gar dominanter Einfluss auf die Strömung auszumachen. Im Zuge der in diesem F+E-Projekt gewonnenen Erkenntnisse hat sich jedoch gezeigt, dass es für die eindeutige Mehrzahl aller Brunnen mit Ausspülungen an Schicht- und Bankungsfugen keinen Ausbaubedarf gibt! Diese Empfehlung ist neben dem Vorhandensein der genannten Erscheinungen an weitere Kriterien zu knüpfen, wie später im Text noch erläutert wird. - Exemplarisch für Brunnen, die (auch) dieser Kategorie zugeordnet werden können, sind nachfolgend die Bilder 5 bis 7 anzusehen.

Bild 5 zeigt Ausspülungen in einer feinblättrigen Schichtfolge, bei der langfristig die Gefahr von Nachbrüchen besteht.

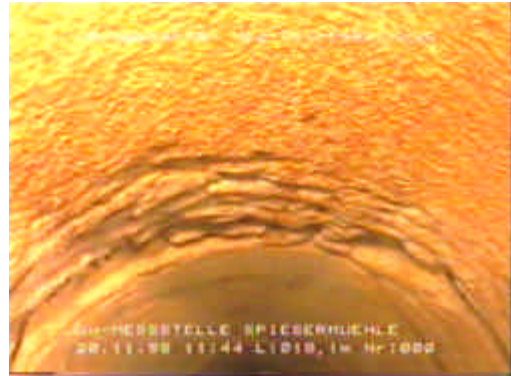


Bild 6 zeigt sehr große Ausspülungen an einer Schichtfuge, die sich vermutlich in Zukunft zu einer Kaverne vergrößern werden.

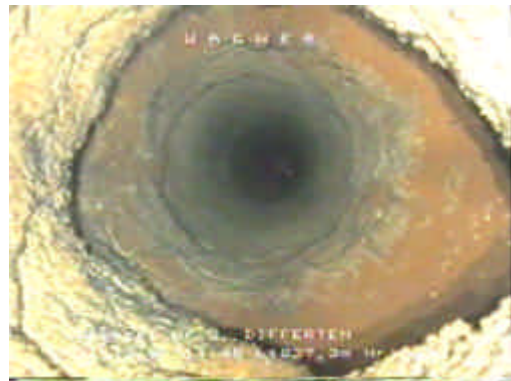


Bild 7 zeigt eine Ausspülung an einer Schichtfuge, die zur häufigen Bildung eines Plateaus auf der Liegendenschicht geführt hat.



Die in Kapitel 3 beschriebene Datenmatrix enthält auch einige Datensätze von Grundwassermessstellen (Bohrloch-Ø 300 mm), von Brunnenvorbohrungen und von früher vollständig ausgebauten Brunnen, bei denen im Zuge einer Sanierung die alte Rohrtour ausgebaut wurde und bei denen dann eine TV-Untersuchung des offenen Bohrlochs möglich war. Ferner sind auch Datensätze von Brunnen vorhanden, bei denen mehrere TV-Untersuchungen im Abstand von einigen Jahren durchgeführt worden sind (Wiederholungsbefahrungen). - Die nach obiger Aufzählung angesprochenen Untersuchungen ermöglichen die Aussage, dass es mittlerweile fachlich eindeutig und sicher ist, dass es sich bei vielen Ausspülungen und Felsüberständen an Schicht- und Bankungsfugen nicht, wie explizit oder implizit in nahezu allen Berichten zu TV-Untersuchungen bisher angenommen, um Alterungserscheinungen handelt!

Bisher war die generelle Ansicht, dass im Laufe der Jahre der Brunnenbetrieb die allmähliche Erosion an diesen Stellen verursacht und sich die Ausspülungen deshalb grundsätzlich und stetig vergrößern. Die vorliegende Arbeit kann jedoch mit Hilfe der TV-Resultate und einer numerischen Berechnung der

Strömung in den Brunnen zeigen, dass hinsichtlich der Zeitbeständigkeit Zusammenhänge existieren, die eine Prognose der Entwicklung zwar erlauben, hierfür aber bestimmte Mindestkenntnisse und Daten vorhanden sein oder erarbeitet werden müssen.

Die in Kapitel 5 eingehender erläuterten Betrachtungen verdeutlichen, dass zur Vergrößerung von Schichtfugen und Bankungsfugen verschiedene Randbedingungen (z. B. bzgl. Entnahmerate, Durchlässigkeit im Bereich der Horizontalfuge, Verhältnis der Durchlässigkeiten zwischen Schichtfuge und Liegendem bzw. Hangendem) erfüllt sein müssen und selbst bei Vorhandensein bestimmter Randbedingungen ab einer gewissen radialen Entfernung zum Brunnen der Materialtransport zum Stillstand kommt. Bestehen verschiedene Randbedingungen nicht, ist ein Materialaustrag wenig wahrscheinlich. - Die bei einer TV-Befahrung beobachtbaren Ausspülungen können oft einen Prozess vortäuschen, dem man unbewusst eine bestimmte größere Zeitdauer bis zum Erreichen des jeweils aktuellen Zustandes zugesteht. Wie in der Datenmatrix beinhaltetete Resultate aber verdeutlichen, entwickeln sich in Abhängigkeit von den hydrogeologischen und lithologischen Gegebenheiten bereits im Zuge der Herstellung des Bohrlochs und den damit grundsätzlich einhergehenden massiven Eingriffen in den Grundwasserleiter (Dichte und Abrasivität der Spülung, Fließgeschwindigkeit der Spülung, mechanische Beanspruchungen usw.) die meisten der später festzustellenden Ausspülungen.

Diese Entwicklung verläuft quasi mit einem Zeitraffer-Effekt. Die Befahrungen vor dem Ausbau von Brunnenbohrungen bzw. unmittelbar nach Abschluss der Bohrarbeiten zeigen schon den Jahre später mit der Formulierung „zu sofortigem Handeln Anlass gebende Situation“ beschriebenen Zustand. Dieser kommt in der Regel in der Folgezeit zum Stillstand oder verlangsamt sich aufgrund der viel „milderen“ Betriebsbedingungen erheblich. - Wenn nach Fertigstellung von Bohrungen diese „scheinbaren Alterungen“ nicht vorhanden sind, treten sie auch in der Folgezeit bevorzugt nur in denjenigen Fällen auf, in denen die infolge der numerischen Betrachtungen angesprochenen und spezifizierten besonderen Randbedingungen bestehen. Wiederholungsbefahrungen liefern einen weiteren Beweis dieser Erkenntnisse.

Kategorie 5: Brunnen mit großen Kavernenbildungen

Die Übergänge zwischen Brunnen, die dieser Kategorie zugeordnet werden und denen, die der zuvor behandelten Kategorie 4, - Ausspülungen an Schicht- und Bankungsfugen -, zugeordnet werden, sind in Einzelfällen fließend. Im vorliegenden Bericht sind in diesem Zusammenhang erheblich größere Hohlräume gemeint, die den Bohrlochdurchmesser um *mindestens* Faktor 2 übertreffen und eine vertikale Dimension von mehreren Dezimetern erreichen. Große Kavernen wurden bei einigen Kamerabefahrungen mit mehreren Kubikmetern Volumen bei einem Durchmesser von weit über einem Meter festgestellt. Zur Veranschaulichung sollen die beiden Bilder 8 und 9 dienen.

Bild 8: Oberkante einer großen Kaverne mit beträchtlichem Festgesteinsrücksprung und derzeit aufgrund des kompakten Hangendfelsens noch gegebener Standfestigkeit des Gebirges. Ganz schwach erkennbar im Bildzentrum ist das weiterführende Bohrloch am Boden der Kaverne.



Bild 9: Blick auf den Bodenbereich der gleichen Kaverne. - Anhand des Vergleichs mit dem 400 mm-Bohrlochdurchmesser im Zentrum des Bildes wird deutlich, dass auch hier der Kavernendurchmesser noch weit über einen Meter beträgt!



Verständlicherweise sind es gerade solche Auffälligkeiten, die große Besorgnis hinsichtlich der Zeitbeständigkeit aufkommen lassen, da man sich über die Stabilität des Bohrlochs in derartigen Fällen nicht sicher ist. Vor allem die Frage, ob frei schwebende Decken an den Felsüberständen dauerhaft sind, verlangt nach einer Antwort. Ebenso wäre es hilfreich, zu wissen, wo und unter welchen Bedingungen sich Kavernen überhaupt ausbilden können, wobei insbesondere interessiert, ob die Grundwasserströmungssituation im Tiefenniveau der Kaverne Ursache für ihre Bildung ist, d. h. ob die Kaverne sich im Bereich eines hohen Zustroms bildet. Denkbar wäre auch hier wieder ein maßgeblicher Einfluss der Lithologie. - Arbeitsmethodisch sollte versucht werden, die obigen Fragen über zwei verschiedene Wege einer Lösung näher zu bringen. Zum einen ist versucht worden, über einfacher und detaillierter zu gewinnende Erkenntnisse bei der Untersuchung oberirdischer Profile in den gleichen Schichten wie in den betrachteten Brunnen Analogieschlüsse zum Verhalten des Festgesteins im tiefen Bohrloch zu ziehen. Zum Zweiten wurden sehr fein abgestimmte Vergleiche von Resultaten der TV-Untersuchung mit denen der geophysikalischen Untersuchung vorgenommen, um entsprechende Zusammenhänge und kausale Vernetzungen von Fakten zu erkennen.

Der Vergleich von Einschätzungen der optischen Inspektion mit den objektiven Messdaten der CAL-, FLOW-, FEL- und GR-Sonden zeigt, dass es für die Lokalität des Auftretens von Kavernen durchaus mehrere Ursachen gibt: Zwar kann nicht generell ausgeschlossen werden, dass auch die Zuflussbedingungen eine gewisse Relevanz haben und in Einzelfällen diesen sogar die dominierende Rolle zukommt. Generell scheint die Lithologie aber von erheblich größerer Bedeutung für die Entstehung von Kavernen zu sein. - Schichtfugen sind häufig mit einem sehr markanten Wechsel der Lithologie verbunden, der seinerseits wieder korrespondiert mit den Durchlässigkeitseigenschaften. In der Folge gibt es Konstellationen, bei denen eine Liegendschicht mit geringer Durchlässigkeit wie eine Sohlschicht im Schichtaufbau wirkt. Es bilden sich demzufolge Grundwasserstockwerke aus.

Bedingt durch das Durchhörern der wasserstauenden Liegendschicht mit der Brunnenbohrung kann für den Fall, dass mächtige hochdurchlässige Aquiferpartien über einer geringdurchlässigen Schicht lagern, der nachweisbar hohe Grundwasserzustrom an der Grenze beider Schichten Schädigung in Form der Kavernenbildung entfalten. - Im Gegensatz zu allen bisher beschriebenen Kategorien sind aufgrund der geringen Zahl der großen Kavernen und der nur begrenzten Datenmenge im Forschungsprojekt gewonnene Erkenntnisse unter Umständen nur für die untersuchten Brunnenindividuen gültig und nicht oder nur mit Einschränkungen auf andere Situationen übertragbar. Nachweislich gibt es auch hier eine „scheinbare Alterung“, d. h. es sind den Projektarbeitern Bohrungen bekannt, die schon unmittelbar nach Fertigstellung riesige Kavernen ausgebildet haben müssen. Ein Indikator dafür war die extrem hohe Aufnahmefähigkeit für Kies bei der Ringraumverfüllung. - Zwangsweise ergibt sich der für die Zielsetzung dieses Forschungsprojektes unbefriedigende Fall, dass man anzuraten hat, subjektive Erfahrungen des Untersuchungstrupps und des Wasserversorgers sowie Analogiebetrachtungen für eine Einschätzung der Standsicherheit des Bohrlochs vor allem im Deckenbereich der Kaverne vorzunehmen.

Kategorie 6: Brunnen mit eingerutschten Gesteinsblöcken

Erscheinungen dieser Art sind in aller Regel eine Folge von Auffälligkeiten, die unter anderen Kategorien beschrieben sind. So kann es z. B. an Kavernen und Ausspülungen an Schichtfugen zum Lösen von Gesteinsblöcken aus dem Gebirgsverband kommen, die im Brunnen nach unten bis zum Brunnentiefsten fallen oder sich unter besonderen Umständen während des Falls verkanten und dann hängen bleiben. Auch das Abbrechen von Gesteinskanten an durchschlagenden Klüften, die als offene Spalten bestehen, ist mehrfach beobachtet worden. Mehrfach ist ein Lösen von Gesteinsstücken aus der Bohrlochwand in entfestigten Partien beobachtet worden (siehe Bild 10). Teilweise ist sogar noch die Passform des im Brunnenquerschnitt befindlichen Gesteinsstückes zur Lochform in der Wand erkennbar.

Inwieweit die in zwei Fällen durch zufällig erhaltene Informationen in Erfahrung gebrachte Ursache von im Brunnenquerschnitt befindlichen Gesteinsblöcken auch auf andere festgestellte diesbezügliche Auffälligkeiten übertragbar ist, kann nicht gesagt werden. In den beiden genannten Fällen war einmal durch Unachtsamkeit beim Umgang mit an der Baustelle befindlichen Bohrkernen ein Gesteinsstück in den Brunnen gefallen, in einem anderen Fall nachweislich (TV-Zwischenbefahrung) im Zuge des wiederholten Klarspülens mittels Lufthebeverfahren beim Ausbau des Bohrgestänges nach dem Anstoßen an die Bohrlochwand ein Nachfall provoziert worden. Beide beschriebenen, möglicherweise eher untypischen Vorfälle lassen aber auch hier die Vermutung aufkommen, dass einige Nachfallstücke nicht erst im Verlauf langjährigen Brunnenbetriebes ausgebrochen sind, sondern es sich in Einzelfällen wiederum um „Scheinalterung“ handelt.

Die Folgen von in die Bohrung eingerutschten oder hinabgefallenen Gesteinsblöcken sind meist eher unproblematisch und können, so maßgebliche Nachteile etwa aufgrund des geringen Tiefenniveaus eines verkeilten Blockes erwartet werden, oft mit nur geringem Zeit- und Kostenaufwand verhindert werden. In manchen Situationen sind keinerlei Handlungen vonnöten. Reaktionszwänge gibt es dann, wenn sich über einem eingerutschten Gesteinsblock weiterer Nachfall ansammelt und sich allmählich eine hängende Zwischenauflandung bildet. Die Gefahr einer hydraulischen Abkoppelung des darunter befindlichen Tiefenbereiches des Brunnens ist wohl nur theoretisch gegeben, eine Verminderung der Effizienz allerdings kann tatsächlich eintreten. Außerdem sei darauf hingewiesen, dass der unterhalb liegende Brunnenteil nicht mehr befahrbar ist und somit keine zeitliche Entwicklung der Standfestigkeit mehr dokumentiert werden kann. Querschnittsverringerungen durch bereits teilweise eingerutschte Gesteinsblöcke können den Ein- und Ausbau einer U-Pumpe behindern oder unmöglich machen. Ferner kann die möglicherweise im offenen Bohrlochteil hängende Pumpe durch Nachfall beschädigt werden.

Bild 10: Aus der Bohrlochwand herausgelöstes Gesteinsstück, das sich beim Herabfallen verkeilt hat und auf dem sich weitere Gesteinsstücke ansammeln. Der untere Brunnenteil ist für Sonden, TV-Kamera u. a. nicht mehr zugänglich.



Die nach einer TV-Befahrung formulierbaren Aussagen zur Ursache der eingerutschten oder herabgefallenen Gesteinsblöcke, den daraus unter Umständen entstehenden Folgen oder Gefahren und die schlussendlich zu empfehlenden Maßnahmen können mit einem hohen Grad an Sicherheit gemacht werden, so dass in Abhängigkeit der jeweiligen Situation weitgehend objektive Entscheidungen getroffen werden können (siehe Kapitel 6).

Kategorie 7: Brunnen mit nennenswerten Erosionserscheinungen an Klüften und Spalten

Grundsätzlich wird das Vorfinden gut ausgebildeter Klüfte, die im Zuge der Brunnenbefahrung festgestellt werden, bei den WVU positiv gesehen, da man damit die Gewähr einer hohen Ergiebigkeit verbindet. Aufgrund des Drainagecharakters und der hohen Transmissivität bestätigt sich meist nach der optischen Untersuchung und den Messungen diese Erwartung. Lediglich Einzelklüfte, die als große klaffende Spalten ausgebildet sind oder solche, die die Bohrlochgeometrie maßgeblich verändern, werden in der allgemeinen Ansicht als bedenklich eingestuft. Auch Kluftsysteme, welche das Gebirge fein zerschneiden, werden kritisch beurteilt.

Die Gefahren, die in den genannten Fällen erwachsen können, sind die gleichen, die bei Brunnen vorkommen, welche den Kategorien 3, 4, 5 und 6 zuordenbar sind. - Die Bilder 11 und 12 zeigen eine Auswahl unterschiedlich kritischer Erscheinungsformen von tektonischen Lineamenten. Während aufgrund durchschlagender und klaffender steilstehender singulärer Klüfte im Querschnitt gesehen augenförmig veränderte Bohrlochsymmetrien in allen Brunnen harte, zeitbeständige Wandflächen hatten und keinerlei Einsturzgefahr mit sich brachten, ist das Aufeinandertreffen von annähernd saigeren Klüften mit Schichtfugen fast durchweg gekennzeichnet durch starke, vermutlich überall auch junge Ausbrüche und den damit einhergehenden weiteren Gefährdungen. - Gebirgszerrüttungszonen infolge sich kreuzender, engständiger Klüfte (in keinem der untersuchten Beispiele klaffend) sind Warnindikatoren für Bohrlochbereiche mit extremer Einsturzgefährdung. Dies konnte bei mehreren lithologischen Gegebenheiten aufgezeigt werden bzw. auch bei unterschiedlichen stratigraphischen Randbedingungen (Karbon, Perm, Trias, - s. Bild 11 und 12).

Bild 11: Augenförmiger Brunnenquerschnitt als Folge von Ausbrüchen an einer durchschlagenden Kluft in ansonsten stabilem Sandstein.



Bild 12: Zerschierung des Gebirgsverbandes im karbonischen Grundwasserleiter durch sich kreuzende Kluftsysteme. Wiederholte Abrutschungen infolge relativ flachen Einfallswinkels der Scherflächen.



Die genannten Kriterien der Ausbildungsformen von Klüften sind eine relativ verlässliche und weitgehend objektive Beurteilungshilfe. Die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf andere Brunnen ist gegeben und ausreichend sicher. Handlungsempfehlungen können demzufolge reichen von „keine weitere Maßnahmen erforderlich“ bis „Ausbau des Brunnens mit einer Verrohrung und Verkiesung anzuraten“.

Kategorie 8: Brunnen mit relevanter Sperrrohrhinterströmung oder freigespültem Sperrrohrfuß

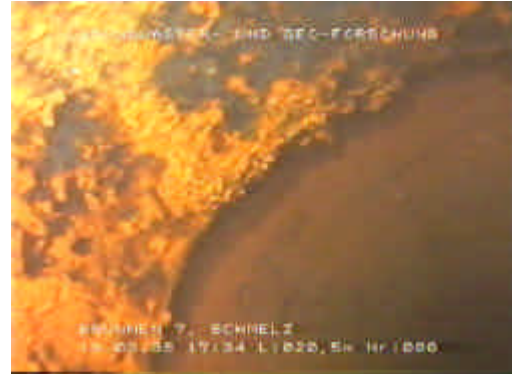
Diese Form der Alterungserscheinung hat in der Praxis die Zeitbeständigkeit unverfilterter Brunnen wahrscheinlich mit am maßgeblichsten nachteilig beeinflusst. Die Schadwirkung betrifft dabei sowohl die Standfestigkeit als auch die Qualitätsveränderung des Rohwassers. Die optische Begutachtung hat sich ebenso wie die geophysikalische Untersuchung als außerordentlich verlässliche Methode zum Feststellen von Defekten oder Auffälligkeiten am Sperrrohrfuß bewährt. - Brunnen jüngeren Datums (Betriebsdauer bis ca. 30 Jahre) sind offensichtlich weniger schadstellenbehaftet als ältere Brunnen. Ursache könnte neben der Betriebsdauer auch die Tatsache sein, dass die in früheren Zeiten bisweilen stofflich und ausführungsseitig noch nicht so perfektionierte Ringraumverfüllung Hinterströmungen des Sperrrohres nicht gänzlich und vor allem dauerhaft zu unterbinden vermochte. Je nach Tiefe der Absperrung kann oberflächennahes, bakteriologisch und vom Hydrochemismus problematischeres Grundwasser dem Brunnen zuströmen. Bei flachem Sperrrohrfuß kann außerdem das Festgestein aufgrund der Oberflächennähe stärker entfestigt sein, so dass der Festgesteinsgrundwasserleiter annähernd Eigenschaften eines Lockergesteingrundwasserleiters hat. Dort ist der Kornverbund nur noch mäßig, so dass die nach unten gerichtete Strömung ihre erosive Wirkung zur Geltung bringen kann. Es entstehen allmählich Ausspülungen. Diese können sich zu großen Kavernen ausbilden. Zunächst steht ein Teil des Sperrrohrfußes frei, später der ganze Sperrrohrfuß, so dass lediglich die Mantelreibung das Rohr in seiner Lage hält. Spitzenwiderstand gibt es dann nicht mehr.

Bei einem Fortschreiten der Situation kann sich für den Fall, dass die Gewichtskraft größer als die noch verbleibende Reibungskraft wird, das Sperrrohr lösen und in das offene Bohrloch fallen, wie dies beispielsweise bei einem der untersuchten Fälle geschehen ist. - Zahlreiche Zwischenstadien dieser Entwicklung sind bei den TV-Befahrungen der Datenmatrix dokumentiert.

Die Aussagesicherheit und die Übertragbarkeit der Erkenntnisse von den Beispielfällen auf andere Brunnen ist hoch bzw. gegeben. Die Bandbreite der Empfehlungen ist weit. Erste Freispülungen am Sperrrohrfuß geben über Jahre hinweg zu keinerlei Handlungszwängen Anlass. Völlig freistehende („schwebende“) Sperrrohre ohne große Sperrrohrfußkavernen im Liegenden erfordern auch nicht

unbedingt eine Sanierung, sofern nicht ein infolge der Potenzialdifferenzen im Grundwasserleiter auch im Ruhezustand des Brunnens meist erkennbarer deutlicher Zustrom aus dem Hangenden erkannt wird. Ist letzteres der Fall und unterstützen weitere geophysikalische Messwerte die Annahme einer massiven Sperrrohrhinterströmung, so sind die bekannten Sanierungsalternativen zu durchdenken, die etwa von der Tieferführung des Sperrrohres in geringerer Dimensionierung über das Ziehen der Altverrohrung bis zur Ringraumnachverdichtung führen können.

Bild 13: Dieser Brunnen zeigt einen völlig freigespülten Sperrrohrfuß. Das Sperrrohr wird nur noch über Mantelreibungskräfte in seiner Position gehalten. Die Hinterströmung kann sowohl optisch als auch anhand der geophysikalischen Messergebnisse nachgewiesen werden. Mit der Hinterströmung des Sperrrohrfußes beginnt in der Regel auch eine sehr viel schnellere Korrosion, die im Bild an den dunklen Stellen zu erkennen ist.



Kategorie 9, 10 und 11: Brunnen mit beträchtlichen Auflandungen, Brunnen mit Lochfraß im Sperrrohr, Brunnen mit Querschnittsverringerung durch Aufwachsungen

Die vorgenannten Kategorien werden an dieser Stelle zusammengefasst, da es sich in allen drei Fällen um Alterungserscheinungen handelt, die nicht für unverfilterte Brunnen typisch sind, sondern auch bei ausgebauten Brunnen vorkommen. - Auflandungen in unverfilterten Brunnen sind häufig erheblich mächtiger (bis mehrere Zehner Meter) vorzufinden als in vollständig verrohrten Brunnenbauwerken und auch oft grobstückig. Unterschiede existieren in einigen Punkten natürlich hinsichtlich der Art und Ausprägung einiger Phänomene sowie deren Konsequenzen. Auffällig sind auch große Unterschiede bei der Geschwindigkeit und dem Ausmaß von Aufwachsungen, die in beiden Brunnentypen vorkommen und sich bei der Verockerung widerspiegeln. Dort, wo die entsprechenden Rahmenbedingungen für Verockerungen gegeben sind (hervorzuheben sind erwartungsgemäß u. a. der Sauerstoffanteil und der Nitratgehalt sowie die Möglichkeit der Mischung von diesbezüglich unterschiedlichem Grundwasser aus dem oberflächennahen und tiefen Aquifer), ist die Intensität der Verockerung bei ausgebauten Brunnen *erheblich* höher!

Offener Lochfraß und kritische Korrosion am Sperrrohr kann als eine der folgeschwersten Alterungserscheinungen am unverfilterten Brunnen angesehen werden. Dabei dürfte in der Regel die verloren gehende Standfestigkeit des Brunnens im oberen Lockergesteinsbereich des Grundwasserleiters, die nur in Einzelfällen zum letztendlichen Lösen und Hinabfallen des Sperrrohres führt, weniger symptomatisch sein als die nachteiligen Qualitätsveränderungen des Rohwassers infolge Zustrom oberflächennahen Grundwassers. In Abhängigkeit vom Grad der Beeinflussung sind deshalb Aussagen wie „kein Handlungszwang“ vorstellbar, aber auch das Anraten zum Durchführen eines der Verfahren aus der großen Palette von Sanierungsmethoden, wie bspw. Einschubverrohrung, Abdichtungsmanschetten, Ziehen des alten Sperrrohres und Einbauen eines neuen, Ringraumnachverdichtung u. a.. - Die unter diesen Kategorien beschriebenen Erkenntnisse und Aussagen sind belastbar und ausreichend sicher, um eine Übertragung auf andere Brunnen zu vertreten. - Die Bilder 14 und 15 zeigen zwei ausgewählte Beispiele der oben beschriebenen Alterungserscheinungen in unverfilterten Brunnen.

Bild 14: Dicke Aufwachsungen verändern den Brunnenquerschnitt stark und behindern den Ausbau der U-Pumpe.

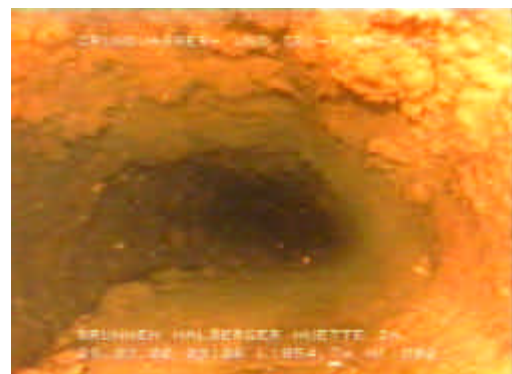


Bild 15: Beträchtliche Auflandung in Form von über längere Zeit sich im Brunnentiefsten angesammeltem Nachfall (stückig, grobsandig).



5 Numerische Simulation der Brunnenanströmung über hochpermeable Schicht-/Bankungsfugen und der Zuströmverhältnisse am Sperrrohrfuß

Sowohl anhand der optischen Beurteilung als auch mittels quantitativer geophysikalischer Messverfahren, wie Flowmeter-, Salinitäts- und Temperatur-Untersuchungen, ist ersichtlich, dass an Stellen, an denen ein Wechsel der Lithologie vorliegt, häufig auch Veränderungen der Durchlässigkeit existieren. Aber auch innerhalb einer lithologisch homogenen Schichtfolge sind immer wieder verschiedenskalige Störungen oder Unterbrechungen in der Sedimentation vorgekommen, welche sich in der Ablagerungsfolge in Form von „Horizontalnähten“ sowie Schicht- und Bankungsfugen zeigen. Viele Geophysiker haben für derartige Horizontalfugen den fälschlicherweise von Wasserwerkern geprägten Begriff „Horizontalkluft“ übernommen. - Auch an diesen Stellen sind bisweilen starke bis extreme Veränderungen der Durchlässigkeit im Vergleich zum Liegend- oder Hangendgestein ausgebildet. - Schließlich sei auf die Situation am Sperrrohrfuß hingewiesen, wo aufgrund des Vorhandenseins dieses meist betonhinterfüllten Stahlrohres sich auf wenigen Zentimetern in Vertikalrichtung eine massive Veränderung der Strömungsverhältnisse einstellt, was sich anhand des Verlaufs der Potenziallinien im Förderzustand des Brunnens deutlich macht.

Die in den obigen Absätzen beschriebenen Veränderungen der Durchlässigkeit oder der Randbedingungen haben definitiv, - allerdings noch zu quantifizierende -, Auswirkungen auf die Strömung zum Brunnen, d. h. auf die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers bzw. das durch eine Fläche strömende Durchflussvolumen und somit möglicher- oder gar wahrscheinlicherweise auch auf die Erosions- und Zeitbeständigkeit von Gestein und Brunnen. Die quantitative Betrachtung der zu Beginn dieses Kapitels beschriebenen Strömungssituationen in Bereichen mit starken Durchlässigkeitserhöhungen ist für die in nicht ausgebauten Festgesteinsbrunnen real vorkommenden Durchlässigkeitssprünge verschiedener Größenordnung zu Schichten geringer Mächtigkeit bzw. zu Schicht- und Bankungsfugen bisher noch nicht durchgeführt worden und von beträchtlicher Tragweite für die Prognose der Zeitbeständigkeit eines Brunnens. Aus diesem Grund sind derartige numerische Berechnungen in größerer Zahl im vorliegenden Projekt durchgeführt worden. Die wichtigsten Resultate dieser Berechnungen sind nachfolgend wiedergegeben.

Grundlage für diese numerischen Berechnungen sind die Auswertungen der vorgenommenen TV-Befahrungen, bei denen eine ansehnliche Zahl offensichtlich der Modellvorstellung des so genannten Leit- und Speicherschichten-Aquifers entspricht. Diese Modellvorstellung wird unter anderem in den **Informationen des GEOLOGISCHEN LANDESAMTES BADEN-WÜRTTEMBERG, Heft 6, 1994, [8]**, vorgestellt. Charakteristikum solcher Grundwasserleiter ist die Beschränkung der Grundwasserzuflüsse auf einzelne, kurze Teufenabschnitte mit hoher Durchlässigkeit, wohingegen der größere Teil des Aquifers aus Schichten niedriger Permeabilität besteht, die andererseits und im Gegensatz zu den hochpermeablen Zonen für die Grundwasserspeicherung maßgebend sind. - Unter Beachtung dieser Erkenntnisse wurde im Rahmen des Forschungsprojektes die Simulation der Anströmung eines unverrohrten Brunnens über geringmächtige Leitschichten und Schicht-/Bankungsfugen und eine Modellierung der Anströmung im Bereich des Sperrrohrfußes mittels zweidimensionalem radialsymmetrischem Modell sowie mittels dreidimensionalem Modell vorgenommen. - Unterschiedliche Modellkonfigurationen können aufgrund etlicher Ursachen, - z. B. infolge der Randbedingungen, des Rechenalgorithmusses oder der Rechengenauigkeit des Programms -, durchaus mehr oder weniger große Abweichungen untereinander und von der Realsituation zeigen. Dies hat u. a. **W. Kinzelbach, 1995, [9]**, an ein und derselben Aufgabe gezeigt,

welche nach mehreren Ansätzen modelltechnisch gelöst wurde und, wenn auch nur geringe, so doch nicht zuvor abschätzbare Differenzen in den Ergebnissen erbrachte. - Um die Wertigkeit und Belastbarkeit der Quantifizierungen, die mittels des radialsymmetrischen Modells erarbeitet wurden, zu überprüfen und einige der beeinflussbaren Parameter (insbesondere die Randbedingungen), welche das Rechenergebnis möglicherweise beeinträchtigen können, auszuschalten, wurden auch zahlreiche Rechenläufe mit einem dreidimensionalen Modell durchgeführt.

Die bei den verschiedenen Rechnungen mit dem dreidimensionalen Modell sich ergebenden Resultate bestätigen in vollem Umfang die Ergebnisse mit dem radialsymmetrischen Modell. Dies zeigen sowohl die Bahnlinienbetrachtungen und die Wasserbilanzen als auch die Hydroisohypsenverläufe. - So ist anhand von Zeitmarken (Isochronen), die bei einer Beispielrechnung im Abstand von annähernd zwei Monaten gesetzt werden, ersichtlich, dass das Wasser in den Speicherschichten fast 3,5 Jahre benötigt, bis es die rund 120 m große Entfernung zum Brunnen durchflossen hat, während in der Leitschicht das Wasser für die gleiche Entfernung lediglich ca. zwei Tage Fließzeit benötigt. - Die Wasserbilanz im genannten Beispiel zeigt die nach obigen Quantifizierungen ebenfalls erwartete Situation.

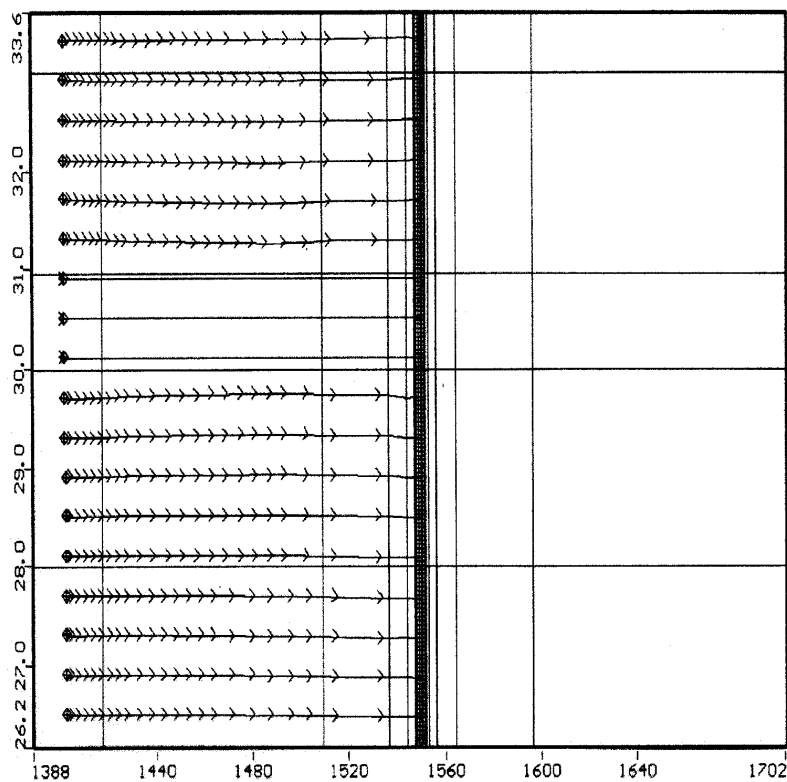


Bild 16: Exemplarischer Ausschnitt aus einer Ergebnisausgabe des dreidimensionalen Modells: Vertikalschnitt durch eines der Strömungsmodelle mit einem Brunnen in der Mitte. Darstellung von Bahnlinien und Zeitmarken in einer Leitschicht (zwischen 30 und 31 m - vgl. linke Skalierung) und in mehreren Speicherschichten (über und unter der Leitschicht gelegen). Der Abstand zwischen zwei Zeitmarken (Pfeilspitzen) beträgt $5 \cdot 10^6$ Sekunden = 57,8 Tage. Während in dieser Zeit Wasser in der Leitschicht die ganze Distanz zwischen linkem Rand und Brunnen durchfließt, erhöht sich in den Speicherschichten zwar mit Annäherung an den Brunnen die Fließgeschwindigkeit, das Wasser braucht dort aber einige hundert Tage, um die gleiche Entfernung zurückzulegen.

Die Pumprate des Brunnens in Höhe von $1.728 \text{ m}^3/\text{d} = 20 \text{ l/s}$ wird zu etwa 91 % = 18,1 l/s aus der Leitschicht gedeckt, welche lediglich rund 1,6 % der Gesamtmächtigkeit des simulierten Schichtenkomplexes ausmacht. Die Speicherschichten liefern zusammen nur 9 % = 1,9 l/s Wasser bei einer Mächtigkeit von mehr als 98 % des gesamten Schichtenpaketes. - Summarisch kann an dieser Stelle für die verschiedensten Modellläufe festgestellt werden, dass sich hinsichtlich Strömungsgeschwindigkeit und Wasserbilanz noch deutlich extremere Quantifizierungen als im obigen Beispiel ergeben. Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten des Grundwassers in Schichtfugen mit sehr hoher Durchlässigkeit liegen nach diesen Berechnungen in der Größenordnung von mehreren Dezimetern pro Sekunde! - Eine zwar nicht ganz so drastische von der Durchlässigkeit

abhängige Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit, die darüber hinaus verbunden ist mit einer auch mächtigkeitsabhängigen Erhöhung des Wasserzustroms in der betreffenden Schicht, kann man auch am Sperrrohrfuß beobachten.

Zudem ergeben sich in der Praxis wohl noch kritischere Lagen, wenn infolge schmaler Vertikalspalten zwischen der Ringraumverfüllung (in den älteren Brunnen meist Beton, welcher sich im unteren Ringraumbereich beim Einfüllen schon entmischt hat und dort häufig nur die Kiesbestandteile enthält) hinter dem Sperrrohr und dem anstehenden Fels eine Zusickerung von Grundwasser aus dem oberen entfestigten Fels vorkommt. Da dieser als Porengrundwasserleiter anzusehen ist, vermischen sich dort die Eigenschaften der Leit- und Speicherschichten. Der Aquifer speist in die Vertikalspalte ein, die dann wie ein dem Brunnen zugeführter Drainagestrang wirkt.

Alle Ergebnisse der Rechenläufe zeigen auch Konsequenzen für die Zeitbeständigkeit der Brunnen mit frei anstehenden Felswänden. - Vergleichbar ist die Situation in einer offenen Schicht- oder Bankungsfuge derjenigen am Boden eines Fließgewässers, wo, - abhängig von der Fließgeschwindigkeit des Wassers -, Erosions-, Transport- oder Sedimentationsvorgänge ablaufen. Die sicher bekannteste grafische Darstellung, in der die Zusammenhänge zwischen Korndurchmesser und Strömungsgeschwindigkeit dargestellt sind, ist die HJULSTRÖM-Kurve. - HJULSTRÖM, 1934, zitiert in **W. von ENGELHARDT**, 1973, [10], erarbeitete ein Diagramm, aus dem ersichtlich ist, ab welcher mittleren Strömungsgeschwindigkeit der Beginn der ersten Kornbewegung auf dem Untergrund stattfindet (Bild 17).

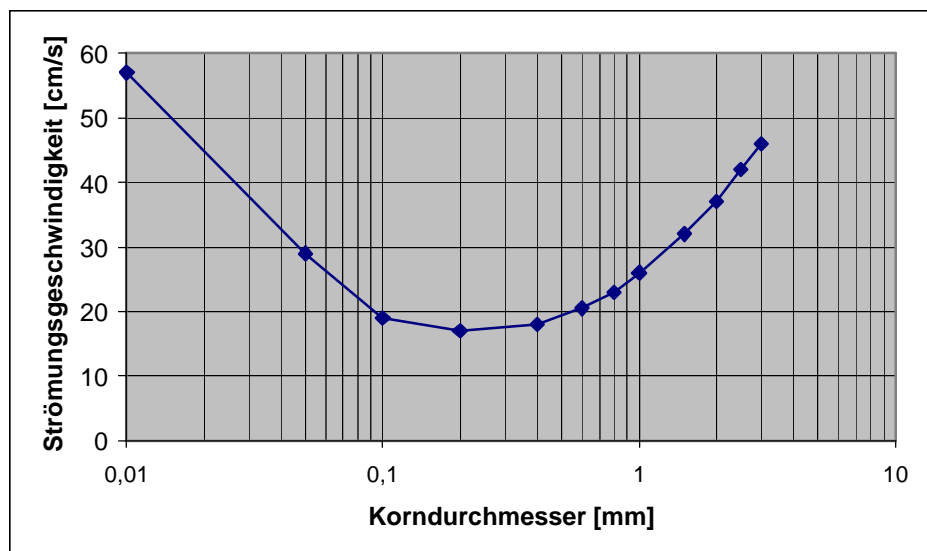


Bild 17: Zur Erosion von Bodenteilchen erforderliche Strömungsgeschwindigkeit nach HJULSTRÖM, 1934

Sowohl das HJULSTRÖM-Diagramm als auch von anderen Autoren publizierte Messwerte machen offenkundig, dass die in den Festgesteinsgrundwasserleitern Süddeutschlands wahrscheinlich am stärksten vertretenen Kornfraktionen im Fels bei den mittels numerischen Modellen berechneten Fließgeschwindigkeiten in Leitschichten und erst recht in Schicht- und Bankungsfugen ohne jeden Zweifel in Brunnennähe transportiert werden können. - Wenngleich die Sandkörner nicht wie in einem Flussbett als loses Schüttgut im Gestein vorliegen, ist die durch den ständig an der Oberfläche der Korngrenze zur Schichtfuge herrschende hohe Fließgeschwindigkeit des dort strömenden Grundwassers, einhergehend mit dem entsprechenden Erosionspotenzial (unterstützt durch Ungleichgewichte im Hydrochemismus und mitgeführtes Material), ein Faktor, der im Laufe längerer Zeiträume zu Veränderungen in der Geometrie der Schichtfuge führt. Am stärksten zeigen sich diese Veränderungen an der Mantelfläche des Brunnens. Mit zunehmender Entfernung vom Brunnen nimmt bei gleich bleibendem Wasservolumen Q die durchströmte Fläche F zu, so dass die Fließgeschwindigkeit v abnimmt. - Mit Hilfe der Modellergebnisse kann dann errechnet werden, wann, d. h. in welcher Entfernung vom Brunnen die kritische Transportgeschwindigkeit für bestimmte Korngrößen gemäß obiger Kurve unterschritten wird.

Gleichzeitig bedeutet dies, dass alleine aufgrund der in diesem Kapitel beschriebenen Zusammenhänge nicht jeder Brunnen seine Zeitbeständigkeit infolge Ausspülungen an der Brunnenwand verliert. Vielmehr müssen dafür ganz bestimmte, relativ eng abgrenzbare Konstellationen vorhanden sein, um eine schnelle und starke Alterung zu verursachen.

Diese Alterung macht sich in einem Freispülen der Schichtfugen und einer Auskehlung der Leitschichten bemerkbar, die schlussendlich in der bekannten Erhöhung der Ergiebigkeit mündet, jedoch wegen der räumlich und zeitlich begrenzten Erosion in den hochpermeablen Partien nach einer gewissen Zeit zum Stillstand kommt.

Eine pauschale Aussage, dass nichtverfilterte Festgesteinsbrunnen zwangsweise aufgrund von Ausspülungen in den zuflussrelevanten Tiefenniveaus Felsüberstände und Nachbrüche zeigen, ist demzufolge nicht möglich.

Wenn geeignetes Informationsmaterial zu einem betreffenden Brunnen existiert, z. B. Bohrkerne zwecks Korngrößenanalysen und Kornbindemittelbestimmungen, hydrochemische Kennwerte und geophysikalische Messwerte, selbstverständlich TV-Untersuchungen, dann sind über den in diesem Kapitel skizzierten Weg relativ belastbare Abschätzungen der Zeitbeständigkeit bzw. der Alterung unverrohrter Brunnen im Festgestein möglich.

6 Methodische Hilfe zur Bewertung der Ergebnisse der Brunnenuntersuchungen, zur weitgehend objektiven Abschätzung der Zeitbeständigkeit und zur Formulierung von Handlungsempfehlungen in Form eines EDV-Programms

Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Erkenntnisse, Fakten und Informationen sind eine gute Grundlage für einen Experten, um in einem speziellen Fall eine Übertragung auf sein Brunnen-„Individuum“ bzw. die Situation vorzunehmen, mit der er gerade konfrontiert ist. Kritische Analogiebetrachtungen sind für ihn in der Regel ein wichtiges Vorgehensprinzip bei der Problemlösung. Viele Mitarbeiter von Wasserversorgungsunternehmen haben häufig aber ein derart großes Aufgabenfeld, dass trotz ihres guten Einblicks in etliche Sparten der Hydro- und Geowissenschaften Spezialkenntnisse und tief greifende Erfahrungen im geologisch-hydrogeologischen, hydrochemischen, geophysikalischen oder ingenieurtechnischen Bereich nicht vorhanden sein können.

Für diese Personengruppe soll mit dem vorliegenden Ergebnisbericht und dem erarbeiteten Software-Programm eine methodische Hilfe bereitgestellt werden, mit der es ihnen ermöglicht wird, eine etwaige Beurteilung und Einschätzung von Untersuchungsergebnissen und weiteren Beobachtungen an unverfilterten Festgesteinsbrunnen vorzunehmen und situationsadäquate Maßnahmen zu finden. - Der Experte benötigt ein solches Instrument nur bedingt, ein Laie wird auch mit dieser Hilfe nicht umgehen können und zum Ziel finden, da er an vielen Stellen überfordert ist und bspw. alleine mit vielen Begriffen nichts anfangen kann. Mitarbeiter der WVU mit entsprechenden theoretischen Grundkenntnissen und Praxiserfahrungen sowie Kenntnissen ihrer Region, ihrer Brunnen, deren Verhaltensweisen und Historie hingegen sind als Zielgruppe angesehen worden.

Ähnlich dem Prinzip eines Bestimmungsbuches (bspw. für Mineralien, Pflanzen usw.) soll ihnen ein Werkzeug zur Hand gegeben werden, mit dessen Hilfe sie mehr oder weniger „automatisch“ zu einer angemessenen Entscheidung finden können oder zumindest ihre Entscheidungsgrundlage nachprüfbar dokumentieren können. - In der heutigen Zeit sind Bestimmungsbücher nach obigem Muster natürlich selten geworden und nicht für alle gewünschten Anwendungszwecke sinnvoll. Bestimmungsbücher stellen aber auch schon eine Art Expertensystem dar, wie sie heute für viele Problemstellungen zu Rate gezogen werden. Bei der Vielzahl von Einflussfaktoren, die bei der Entscheidungsfindung hinsichtlich der Bewertung der Zeitbeständigkeit eines unverfilterten Brunnens oder den Handlungsempfehlungen, die nach Brunnenuntersuchungen (speziell: TV-Untersuchungen) zu formulieren sind, eine Rolle spielen, ist der heute gebräuchliche Weg zur Problemlösung allerdings der Einsatz eines EDV-gestützten Expertensystems.

Der Ablauf von der Bewertung vorhandener Kenntnisse bis zur Entscheidung ob und wenn ja, welche Handlungsempfehlungen oder Maßnahmen anzugehen sind, läuft gemäß folgender Teilschritte ab:

1. Zunächst werden mehrere Fragebögen mittels des beschriebenen Software-Programms bearbeitet.

2. Im Anschluss daran werden die Benutzerantworten vom Programm dokumentiert und der Benutzer sollte die Informationen noch einmal kritisch überprüfen bzw. evtl. nochmals Änderungen der Eingaben vornehmen.
3. In diesem Schritt erstellt das Software-Programm auf Grundlage der ihm zur Verfügung gestellten Daten eine textliche Bestandsaufnahme in der Art eines beschreibenden Berichtes, quasi ein „automatisches Gutachten“. Es ist vom Benutzer sicherheitshalber auf Stimmigkeit oder Widersprüchlichkeit zu überprüfen, wenngleich an dieser Stelle noch kaum mit Unrichtigkeiten zu rechnen ist.
4. Durch programmimmanente Zuweisungen erstellt die Software eine textliche Handlungsempfehlung und schlägt Maßnahmen zur individuellen Brunnensituation vor. Dieser Baustein ist jedoch lediglich als Hilfe zu verstehen, enthält u. U. mehrere Vorschläge und ist vom Benutzer kritisch in seine eigenen Überlegungen zu integrieren.

Nachfolgend wird das EDV-Programm zur Einschätzung der Zeitbeständigkeit unverfilterter Brunnen im Festgestein und zur Einschätzung der Erforderlichkeit und Abgrenzung der Art von Handlungsmaßnahmen an einem Beispielfall vorgestellt. Dies ist gewissermaßen der unmittelbare praktische Anwendungsschritt („Handwerkszeug“), welcher aus dem hier vorgestellten F+E-Projekt hervorgegangen ist. Was detailliert diesem Baustein zu Grunde liegt, wurde auf den Vorseiten grob umrissen und wird im Anhang zu diesem Bericht im Einzelnen erläutert, um dem kritischen Anwender des Programms zusätzlich die Möglichkeit zu geben, seinen Entscheidungsweg (bzw. den des Programms) zu den gewünschten Einschätzungen und Entscheidungen nachzuvollziehen.

Jede beliebige Antwortkombination in den Programmmenüs führt zu einer individuellen Beschreibung der Brunnensituation und damit zu begründeten Handlungsempfehlungen. Zu betonen ist, dass nicht ausschließlich von der schlimmstmöglichen Situation ausgegangen, sondern auch das Problem der „Scheinalterung“ berücksichtigt wird. Somit kann durch diese Entscheidungshilfe gegenüber der bisherigen subjektiven Einschätzung kommerzieller Dienstleister ein Rahmen abgesteckt werden, innerhalb dessen sich die zu vollziehende Maßnahme bewegen sollte. - Diese EDV-gestützte Entscheidungshilfe erstrebt zwar Objektivität, jedoch hängt der Erfolg auch vom Anwender ab, der durch seine subjektive Wahl der Antworten erheblichen Einfluss auf die Handlungsempfehlung hat.

Das Programm „EDV-gestützter Entscheidungsschlüssel zum objektiven Bewerten von Alterungserscheinungen und Festlegen von Handlungsmaßnahmen bei unverfilterten Festgesteinsbrunnen“ besteht aus insgesamt zwölf verschiedenen Formularen: Einer Startseite, acht Fragebogenseiten und drei Seiten mit Auswertungen. (Bemerkung: Vor Starten des Programms bitte eine geeignet hohe Bildschirmauflösung einstellen, da ansonsten die Menüs nur teilweise zu sehen sind!). Alle Schaltflächen können auch über so genannte Schnell Tasten bedient werden. Dazu müssen die „Alt“-Taste und der entsprechende unterstrichene Buchstabe der Schaltfläche gleichzeitig gedrückt werden.

Wie bereits erwähnt, gibt es acht Fragebögen. Dies ergibt sich durch die Tatsache, dass die detaillierte Ergebnisabfrage Brunnen-TV sehr viele Fragen enthält. Aus Übersichtlichkeitsgründen wird deshalb dieser Themenblock in zwei Fragebögen (Teil 1 und Teil 2) aufgesplittet. Alle sechs anderen Fragebögen sind jeweils auf einer Seite dargestellt.

Ziel war es, die Fragebögen möglichst einfach und übersichtlich zu gestalten. - Zuerst wird in der Überschrift der jeweilige Themenblock angegeben, unter der sich dann die Fragen befinden. Bis auf die beiden gerade genannten Fragebögen sind die Fragen immer untereinander (dort nebeneinander) angeordnet. Die Fragen sind fragebogenübergreifend von 1 bis 39 durchnummeriert, um keine Verwechslungsmöglichkeiten zu bieten. Außerdem werden sie durch einen Rahmen voneinander abgegrenzt, der auch die jeweilig möglichen Antwortoptionen umfasst.

Unterhalb sind Schaltflächen angeordnet, die das Blättern zwischen den einzelnen Fragebögen ermöglichen. Außerdem besteht auf jedem Fragebogen die Möglichkeit, per Abbruch-Taste das Programm zu verlassen. Damit dies nicht versehentlich geschehen kann, ist ein Mitteilungsfenster dazwischen geschaltet, mit dem sicherheitshalber nachgefragt wird, ob das Programm auch wirklich abgebrochen werden soll, denn dabei gehen alle Daten verloren und es erscheint die Startseite.

Bevor jedoch zum nächsten Fragebogen weitergeblättert werden kann, müssen erst alle Fragen dieser Seite beantwortet sein. Ist dies nicht der Fall, so erscheint ein Mitteilungsfenster, das auf die erste nicht beantwortete Frage dieser Seite hinweist.

Die Fragen sind einfach per Mausklick in das entsprechende Optionsfeld zu beantworten. Wie bereits ausgeführt, kann pro Frage immer nur eine Antwort gegeben werden. Sollten mit dieser Antwort Widersprüche zu vorherigen Antworten bestehen, so wird dies in einem Fenster mitgeteilt und die entsprechende Antwortoption gesperrt. Bei einigen Antworten erscheint außerdem die Information, dass mit dieser Antwort mehrere Fragen nicht beantwortet werden können.

Der achte und letzte Fragebogen enthält auch die Schaltfläche Auswertung. Durch ihre Wahl wird der Bereich der Fragebögen verlassen und Veränderungen der Antworten sind nicht mehr möglich. - Der Bereich der Auswertung besteht aus insgesamt drei Seiten.

Zunächst erscheint eine Auflistung aller Fragen mit der jeweils gewählten Antwort. So besteht für den Anwender jederzeit die Möglichkeit, seine Antworten zu kontrollieren oder noch mal nachzuschauen, für welche Optionen er sich entschieden hat. Per Schaltfläche erscheint dann die eigentliche Auswertung.

Letztere beinhaltet ein „automatisches Gutachten“ sowie die Handlungsempfehlungen zur derzeitigen Brunnensituation und besitzt den gleichen Aufbau. Die Beschreibungen erscheinen als fortlaufender Text. Zusätzlich gibt es mehrere Schaltflächen, die das Umschalten zwischen Gutachten und Maßnahmen, das Aufrufen der Auflistung der Fragen und Antworten, das Drucken der Ergebnisse sowie das Abbrechen des Programms ermöglichen. Das „automatische Gutachten“ beschreibt ausführlich die derzeitige Brunnensituation und dient als Begründungsbasis für die formulierten Handlungsempfehlungen. Dazu werden die gegebenen Antworten vertextlicht und in Beziehung zueinander gesetzt. Die Sätze des Gutachtens sind möglichst kurz und einfach aufgebaut, um Verständlichkeit zu gewährleisten.

Die zu treffenden Maßnahmen werden auf der Seite der Handlungsempfehlungen vorgeschlagen. Dabei werden diese Empfehlungen entweder direkt oder über das „automatische Gutachten“ begründet. Jede Maßnahme kann jedoch nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit, die sich nach den Erkenntnissen der Befragung richtet, angegeben werden, da nicht alle einzelnen Fälle abgedeckt werden können. Wie hoch diese Wahrscheinlichkeit ist, wird über Verstärkungen oder Abschwächungen bestimmt, bzw. ob es sich um ein „k.o.-Kriterium“ handelt oder nicht. Allerdings werden meist mehrere verschiedene Maßnahmen vorgeschlagen, da die Auswertung in Blöcken erfolgt. Dies hat den Vorteil, dass jede einzelne Auffälligkeit mit der zugehörigen Handlungsempfehlung versehen ist, aber den Nachteil aus den verschiedenen Maßnahmen die richtige herauszufinden. Die Empfehlung einer einzigen, alle Probleme abdeckenden Maßnahme wäre zwar möglich, würde jedoch immer die Annahme der schlimmstmöglichen Situation voraussetzen. Dies trifft aber in den meisten Fällen nicht zu. Zum Beispiel lässt sich „Scheinalterung“ von „echten“ Alterungserscheinungen nur schwer unterscheiden. Daher ist zunächst in den meisten Fällen eine Überwachung der Entwicklung angebracht, ohne gleich eine Sanierung einzuleiten. Deshalb werden sicherheitshalber mehrere Möglichkeiten unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit angegeben, die zum gewünschten Erfolg führen können. Die Wahl der Maßnahme bleibt natürlich dem Anwender überlassen; dass es die richtige ist, soll von den EDV-Vorschlägen unterstützt werden.

Der Ausdruck dieser Ergebnisse geschieht ebenfalls über eine Schaltfläche. Dabei werden die Auflistung der Fragen und Antworten, das „automatische Gutachten“ und die vorgeschlagenen Maßnahmen ausgedruckt. Dies muss in einem Mitteilungsfenster bestätigt werden und ist die einzige Möglichkeit der Ergebnissicherung, da auf eine Abspeicherung in Dateien bewusst verzichtet wurde.

Nach dem Starten der Software erscheint die Startseite, durch Mausklick auf die Schaltfläche ‚Start‘ der nachfolgende erste Fragebogen mit der Überschrift „Fragen zum Schichtenaufbau“.

Formular 1

Fragen zum Schichtenaufbau

Frage 1
Es gab in der Driftzeit eine Karbonierung, sind die Ergebnisse der Analysen textlich und grafisch valide?
 ja nein

Frage 2
Auf einer neuen Darstellung der Schichten sind gemäß DIN 4022/4023 vorgenommene bzw. anlässlich der ersten Anfertigung dieser Karte nicht im Feldbuch über eine eher individuelle Beschreibung?
 ja nein

Frage 3
Der Einwegwasserleiter besteht aus
 gelüfteten Mergeln, Melanophiten oder Kalken Sandstein sonstigen Metak.

Frage 4
Es weisen die Fragen bzgl. Spürverlust, Kernverlust, besonders gute bzw. schlechte Bohrbarkeit oder ähnliche Aufzählungen während der Ausführung der Bohrbohrer?
 ja nein

Weiter zum nächsten Fragebogen abbrechen

Dort sind die ersten vier Fragen zu beantworten. Die ersten beiden davon werden in dem hier exerzierten Beispiel mit „Ja“ beantwortet, d. h. der Grundwasserleiter besteht aus Sandstein, was durch die beiden ersten Antworten gesichert ist und es existieren Aussagen über Kernverlust und schlechte Bohrbarkeit. Frage 4 wird also ebenfalls mit „Ja“ beantwortet.

Über die Schaltfläche „Weiter zum nächsten Fragebogen“ wird der zweite Fragebogen „Optische Untersuchungen“ geöffnet (Formular 2, s. u.). Hier sind die Fragen 5 bis 7 zu beantworten. Optische Untersuchungen wurden im Beispielfall vor längerer Zeit (> 10 Jahre) und kürzlich erneut durchgeführt, wobei von beiden Untersuchungen sowohl Videoband als auch eine schriftliche Kurzdokumentation vorhanden sind. Die damalige Kamera ließ nur Axialsicht zu und entspricht dem zu Folge nicht dem heutigen Stand der Technik. Dies wurde bei der neuerlichen Untersuchung berücksichtigt, so dass Frage 6 mit „Ja“ beantwortet werden kann. Die festgestellten Alterungserscheinungen werden vom Untersuchungsteam hier als kritisch erachtet.

Formular 2

Optische Untersuchungen

Frage 5
Gibt es

Auszeichnungen einer oder mehrerer TV-Befahrungen

neben dem Videoband eine schriftliche Fachdokumentation bzw. ein Befahrungsprotokoll der TV-Untersuchung

neben dem Videoband zum aufwändigeren und detaillierten Einzelbild mit separater Dokumentation über beleuchteten Auflichter und einer Wertung / Handlungsempfehlung

nein, es gibt keine Auszeichnungen einer TV-Befahrung

Frage 6
Die Technik der TV-Anlage erlaubt neben einer Axial- auch Schrägsicht- und/oder Radialsicht?

Ja Nein

Frage 7
TV-Untersuchungssystem und/oder Mitarbeiter des WÜD nehmen in den Ergebnissen der optischen Befahrung folgende Hinweise bzgl. Standardechnik/Zeitraumzustand des Brunnens (Subjektive Einschätzung oder analoger Messung)?

Ja Nein

Weiter zum nächsten Fragebogen Zurück zum letzten Fragebogen Abbrechen

Als nächstes ist der Fragebogen 3 zur „Brunnen- bzw. Geohydraulik“ (s. Formular 3 auf der Folgeseite) mit insgesamt fünf Fragen anstehend. Die Fragen 8 und 9 werden für das Beispiel mit „Ja“ beantwortet, da nach der Brunnenherstellung sowohl Pump- als auch ein Leistungspumpversuch gemacht wurden und deren Daten in diesem Beispiel vorliegen. Allerdings wurden keine neuerlichen Pumpversuche vorgenommen. Der Brunnenmeister schätzt die Situation jedoch so ein, dass sich die Ergiebigkeit des Brunnens erhöht hat. Diese Einschätzung wird auch bei Frage 12 angegeben.

Es folgt Fragebogen 4 „Hydrochemische Charakteristika“ (s. Formular 4, ebenfalls Folgeseite). Außer einem leichten Ansteigen eines Analysenparameters über Jahre hinweg ist im Beispielfall die hydrochemische Situation bedenkenlos, d. h. alle Fragen außer Nr. 13 werden mit „Nein“ beantwortet.

Folgeseiten: Formular 3 (oben) und 4 (unten)

Fragebogen 3

Brunnen- bzw. Geohydraulik

Frage 8
Es liegen ausgewählte Daten eines hydrologischen Pumpversuchs an der Zeit der Startmehrfachung vor? ja nein

Frage 9
Es liegen Daten und Erwartungen einer Leistungspumpversuchs aus der längeren Vergangenheit? ja nein

Frage 10
Es liegen ausgewählte Daten eines natürlichen hydraulischen Pumpversuchs vor? ja nein

Frage 11
Es liegen ausgewählte Daten eines natürlichen Leistungspumpversuchs oder eines Pumpversuchs zur Überwachung/Wirkung des Brunnen/Wasserspiegels? ja nein

Frage 12
Aquifertypen und / oder Brunnenbetriebsdaten führen und / üngeren Daten wachen stark voneinander ab?
 Ergebnisse stark erhöht Ergebnisse stark verringert Keine bzw. geringe Abweichung oder keine Aussage möglich

Start | KapREI(V)Programm1.doc | p4Stimmen - Microsoft Vis... | Fragebogen 3

Fragebogen 4

Hydrochemische Charakteristika

Frage 13
Anfang diagrammatische oder tabellarischer Darstellungen gibt es schon vor langer Zeit einen gleichmäßigen Trend (d.h. ein Anzeichen) eines oder mehrerer Analysenparameter? ja nein

Frage 14
Etwas sind bakteriologisch auffällige Befunde aufgetreten? ja nein

Frage 15
Etwas sind Inhaltsstoffe in Grundwasseranalysaten vorhanden, die häufig von landwirtschaftlicher Nachnutzung herfließen, wie bspw. Pestizide oder bislang unzufällige Konzentrationen erhöhen sich zufällig wie z. B. Nitrat? ja nein

Frage 16
Bislang unzufällige Konzentrationen anthropogener Substanzen erhöhen sich zufällig oder treten erstmals auf, wie z. B. Kohlenwasserstoffe, DKW, PAK, Schwermetalle u. a. ? ja nein

Frage 17
Es wird/werden Grenzwert/e der Trinkwasserordnung überschritten? ja nein

Frage 18
Nebenproben in tiefen eindeutige Oberflächenabflüsse? ja nein

Start | KapREI(V)Programm1.doc | p4Stimmen - Microsoft Vis... | Fragebogen 4

In Fragebogen 5 „Geophysikalische Messresultate“ (s. nachfolgendes Formular 5) wird bestätigt, dass es im vorliegenden Fall neben dem Feldplot eine schriftliche Kurzdokumentation gibt, in der die Daten zu allen in Frage 20 aufgezählten Verfahren enthalten sind. Zusammenhänge mit der TV-Befahrung oder mit lithologischen Gegebenheiten sind jedoch nicht zu erkennen.

Formular 5

In den Fragebögen 6 und 7 „Detaillierte Ergebnisabfrage Brunnen-TV“ (s. Formular 6 und 7) auf der Folgeseite werden die durch die TV-Befahrung gewonnenen Erkenntnisse präzisiert. Folgende Auffälligkeiten wurden im Brunnen (Beispiel) festgestellt: eine große Sperrrohrfußkaverne mit nur noch teilweise aufsitzendem Sperrrohr, Schichtfugen mit großen Ausspülungen, jedoch ohne nennenswerte Felsüberstände sowie eine bedeutende Auflandung aus sandigen Sedimenten. Außerdem wurde eine nicht steil stehende Kluft entdeckt. Alle anderen Fragen sind mit „Nein“ oder „nicht vorhanden“ zu beantworten. Aufgrund der großen Ausspülung und der großen Sperrrohrfußkaverne wurde die Situation am Brunnen als kritisch eingeschätzt (Frage 7).

Folgesseite: Formular 6 (oben) und 7 (unten)

Fragebogen 6

Detaillierte Ergebnisabfrage Brunnen-TV (Teil 1)

<p>Frage 20 Schnittmarkierung:</p> <p><input type="checkbox"/> nicht vorhanden</p> <p><input type="checkbox"/> existieren vorhanden</p> <p><input type="checkbox"/> eindeutig vorhanden, jedoch klein</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> groß ausgebildet</p> <p><input type="checkbox"/> sehr groß ausgebildet, vereinfacht 1:1m3</p>	<p>Frage 21 Hinweise auf Sperrschichtmarkierung:</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> keine Hinweise auf Sperrschichten</p> <p><input type="checkbox"/> vorhanden, jedoch gering und schwierig festzustellen</p> <p><input type="checkbox"/> stark und gut erkennbar</p>	<p>Frage 24 Anzeichen des Sperrschichtes auf dem Foto:</p> <p><input type="checkbox"/> vollständig über dem ganzen Umfang</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> nur bedingt teilweise</p> <p><input type="checkbox"/> gar nicht wahr</p> <p><input type="checkbox"/> wegen Aufwachsungen u.ä. nicht mehr bestellbar</p>	<p>Frage 25 Risse und Spalten:</p> <p><input type="checkbox"/> fehlend</p> <p><input type="checkbox"/> Mehrere Risse stehen eng nebeneinander oder kreuzweise</p> <p><input type="checkbox"/> Die Risse sind nicht steil (30 Grad Einfallswinkel)</p> <p><input type="checkbox"/> Die Gänge mit in der oberen Brunnenhülle fehlend, durchschlagend und/oder mit Ausbrüchen auf</p>	<p>Frage 26 Schichtflugen, Bankungsflugen:</p> <p><input type="checkbox"/> nicht vorhanden oder sehr schwach ausgebildet</p> <p><input type="checkbox"/> in größeren Zyklen über das Schichtniveau hin und her auf geschichteter, nicht aber starker Ausprägung horizontaler</p> <p><input type="checkbox"/> eine oder mehrere mit sehr großen Ausprägungen/ Ausbrüchen, jedoch ohne erkennbare Festkörperstände</p> <p><input type="checkbox"/> eine oder mehrere mit sehr großen Ausprägungen/ Ausbrüchen und erheblichen Festkörperständen</p> <p><input type="checkbox"/> eine oder mehrere mit sehr großen Ausprägungen/ Ausbrüchen und erheblichen Festkörperständen und teilweise offene Horizontalklüfte/Spalte oder erkennbarer Grundwasserzustill</p> <p><input type="checkbox"/> eine oder mehrere mit sehr großen Ausprägungen/ Ausbrüchen und erheblichen Festkörperständen und teilweise offene Horizontalklüfte/Spalte oder erkennbarer Grundwasserzustill jedoch Ausbildung der vertikalen Grundwasserzustillungen in der oberen Brunnenhülle</p>
---	---	---	---	--

Start | J:\sp5EDV\Programme\doc... | pflBrunnen - Microsoft Vis... | Fragebogen 6 | 17.11.

Fragebogen 7

Detaillierte Ergebnisabfrage Brunnen-TV (Teil 2)

<p>Frage 27 Kurzweilend große Ausprägungen:</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> nicht vorhanden</p> <p><input type="checkbox"/> eine oder mehrere mit sehr großen Ausprägungen/ Ausbrüchen, jedoch ohne erkennbare Festkörperstände</p> <p><input type="checkbox"/> eine oder mehrere mit sehr großen Ausprägungen/ Ausbrüchen und erheblichen Festkörperständen</p> <p><input type="checkbox"/> eine oder mehrere mit sehr großen Ausprägungen/ Ausbrüchen und erheblichen Festkörperständen sowie offensichtlich bestehende Zusammenhang zur Lithologie oder zum Grundwasserzustill</p> <p><input type="checkbox"/> eine oder mehrere mit sehr großen Ausprägungen/ Ausbrüchen und erheblichen Festkörperständen sowie offensichtlich bestehende Zusammenhang zur Lithologie oder zum Grundwasserzustill jedoch Ausbildung der subjektiv problematisch eingeschätzten Klüfte in der oberen Brunnenhülle</p>	<p>Frage 28 Abänderungen und/oder Auflockerungen an lithologischen Gesteinsschichten zu nachstehender Befestigungselemente geführt?</p> <p><input type="checkbox"/> ja</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> nein</p>	<p>Frage 29 Nachteil von Bodenaustauschen aus dem Hangenden auf im Teil oder Vollerschicht im Blockschichten?</p> <p><input type="checkbox"/> ja</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> nein</p>	<p>Frage 30 Auflagerungen Brunnenhülle:</p> <p><input type="checkbox"/> nicht vorhanden oder unbedeutend</p> <p><input type="checkbox"/> bedeutende bzw. nachträgliche Auflagerung vermutlich sonstige problematische oder stützende bodenständige Nachfall</p> <p><input type="checkbox"/> bedeutende bzw. nachträgliche Auflagerung vermutlich sehr hohe lange Formel anhängen</p>	<p>Frage 31 Risse und Schwerkraftfüllung:</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> fehlend</p> <p><input type="checkbox"/> über die ganze Wassersäule dabei und relativ gleichmäßig aufsteigend</p> <p><input type="checkbox"/> nur in unteren Bereichen und bestimmten Ursachen zustand</p>	<p>Frage 32 Offene Luftröhre oder teilweise Korrosion erkennbar?</p> <p><input type="checkbox"/> ja</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> nein</p>
---	---	---	---	---	--

Start | J:\sp5EDV\Programme\doc... | pflBrunnen - Microsoft Vis... | Fragebogen 7 | 14.11.

Somit muss nur noch ein letzter Fragebogen 8 „Feststellungen zur Zeitveränderlichkeit“ ausgefüllt werden (s. nachfolgendes Formular 8). Analog zur Einschätzung des Untersuchungsteams werden die festgestellten Auffälligkeiten als extrem stark, vermutlich folgebehaftet eingestuft. Wiederholungsuntersuchungen haben jeweils stattgefunden, der Zeitraum zwischen den TV-Befahrungen betrug mehr als zehn Jahre. Die Auffälligkeiten sind im Zeitraum zwischen den Untersuchungen entstanden, so dass Frage 37 mit „Ja“ beantwortet wird. Diese Veränderungen sind jedoch nicht (zumindest nicht wesentlich) mit den Veränderungen hydraulischer oder hydrochemischer Kennwerte korreliert, d. h. es besteht kein erkennbarer Zusammenhang zwischen der vermuteten Ergiebigkeitserhöhung bzw. dem Ansteigen des hydrochemischen Analysenparameters und den festgestellten Alterungserscheinungen. Relativ zu Brunnen der näheren Umgebung wird die Situation hier deutlich kritischer eingeschätzt, auch wenn die gemessene Querschnittsvergrößerung nicht so dramatisch ausfällt, wie in Frage 39 angegeben ist.

Formular 8

Feststellungen zur Zeitveränderlichkeit

Frage 33
Die festgestellten Alterungserscheinungen werden subjektiv oder auf Grundlage der Beobachtung der Fragebogen 6 und 7 eingeschätzt als:

extrem auffällig und stark, vermutlich auch folgebehaftet deutlich ersichtlich, in ihrer Wirkung jedoch nicht abschätzbar nur bei genauer Betrachtung erkennbar, in Übersichtsansicht nach keiner Schädigung zu erwarten

Frage 34
Die TV-Erfahrung ist eine Wiederholungsuntersuchung, d.h. eine vergleichbare Befahrung wurde zuvor - in einem nach Frage 36 angegebenen Zeitraum - schon einmal vorgenommen? ja nein

Frage 35
Geochemische Messungen sind mindestens zu einem mehr als ein Jahr auseinanderliegenden Zeitpunkt ausgeführt worden? ja nein

Frage 36
Der zeitliche Abstand zwischen den beiden zuletzt durchgeführten TV-Untersuchungen beträgt:

< 5 Jahre 5 bis 10 Jahre > 10 Jahre nur eine oder keine Untersuchung gemacht

Frage 37
3m) anhand der letzten beiden oder aller Untersuchungen sind keine Veränderungen erkennbar, die eindeutig dem Zeitraum zwischen diesen Untersuchungen zuzuordnen sind? ja nein

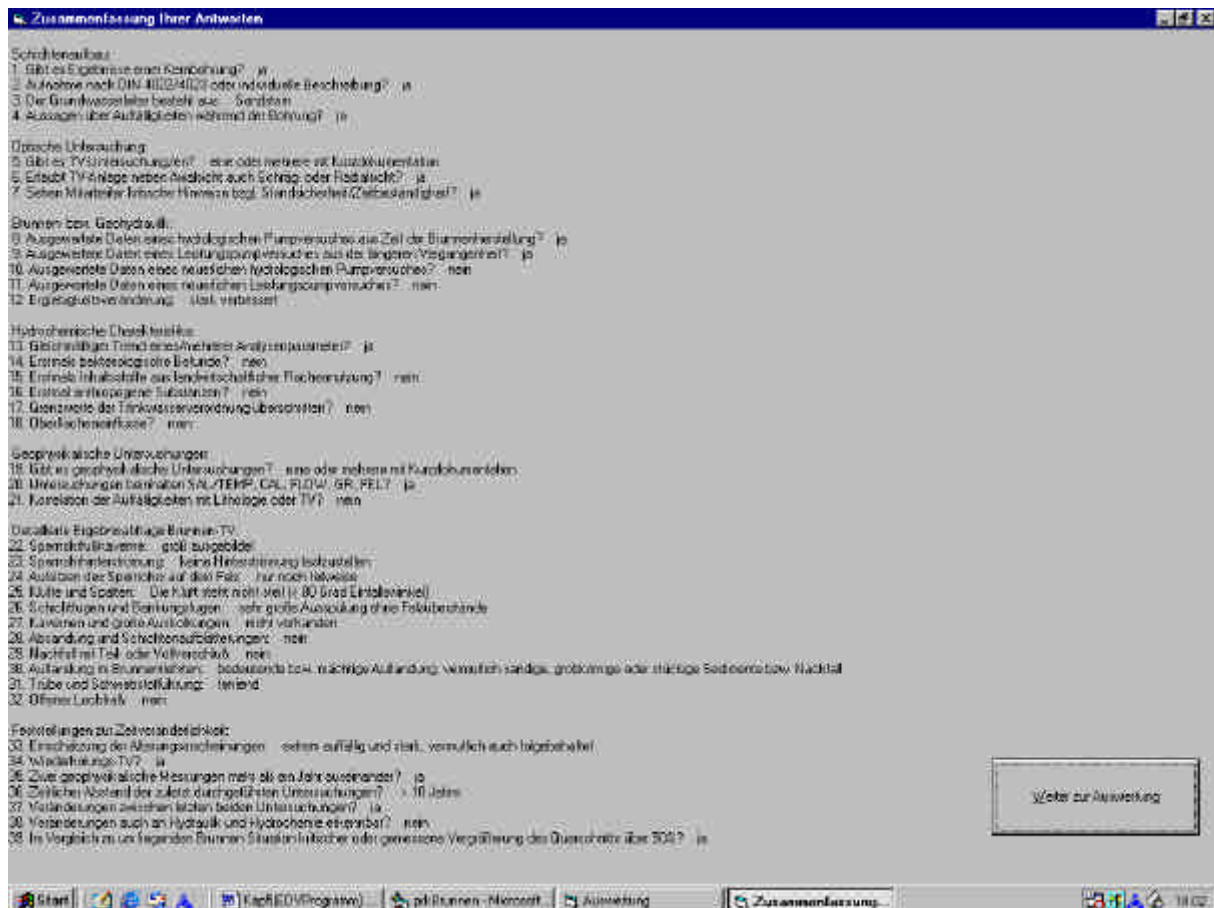
Frage 38
Veränderungen zwischen den beiden letzten Untersuchungen sind auch wenn sie anhand hydrologischer und/oder hydrochemischer Frontenreste? ja nein

Frage 39
Relativ zu Brunnen der Umgebung oder solchen mit gleicher Lithologie wird die Situation hier deutlich kritischer eingeschätzt und/oder gemessene Vergrößerungen des Querschnitts überlegen in den letzten 5 Jahren des BGR-Arbeits? ja nein

Systematik der Antworten Zurück zum letzten Fragebogen Beenden

Nachdem nun alle Fragen beantwortet wurden, kann vom Programm die Auswertung erstellt werden. Wird jedoch in den Menüs zurückgeblättert, so verschwinden die gegebenen Antworten von Fragebogen 8, da Änderungen vorher gegebener Antworten die Antwortmöglichkeiten der Fragen 33 bis 39 einschränken bzw. erweitern könnten.

Die Auswertung beginnt mit der Auflistung der Fragen und den zugehörigen Antworten (s. nachfolgende Abbildung). Diese sind in Kurzform wiedergegeben.



Obige Abbildung: Vom Programm vorgenommene Auflistung der Fragen und Antworten in Kurzform.

Durch „Klick“ auf die Schaltfläche erscheint das „automatische Gutachten“ (s. nachfolgende Abbildung). Dies ist die ausführliche Dokumentation der Fragen und Antworten mit einigen Kommentaren. - Der erste Kommentar betrifft die bei der Ausführung der Bohrarbeiten festgestellten Auffälligkeiten, die darauf hindeuten könnten, dass bereits kurz nach der Bohrung Veränderungen aufgetreten sein können, die sich vermutlich weiterentwickeln können. Dies wird aus dem aus Sandstein bestehenden Grundwasserleiter geschlossen.

Eine erste Handlungsempfehlung ist ebenfalls enthalten. Diese betrifft das Ansteigen eines Analysenparameters. Es sollte zumindest abgeklärt werden, welche Ursachen zu Grunde liegen. Die nächste Folgerung bezieht sich auf die Ergiebigkeitserhöhung, die durch das Freispülen der vorhandenen Kluft bedingt sein könnte. Dies kann jedoch nur vermutet werden, da die Ursache für die Ergiebigkeitserhöhung auch ganz anderer Natur sein kann. Alle restlichen Textteile geben nur die gewählten Antworten wieder und sind nicht mit weiteren Folgerungen verknüpft.



Obige Abbildung: „Automatisches Gutachten“ (Auswertung).

Über eine weitere Schaltfläche gelangt man zu den vorgeschlagenen Maßnahmen (s. nachfolgende letzte Abbildung). Diese betreffen folgende Sachverhalte:

Zunächst wird ein Pumpversuch vorgeschlagen, um die Einschätzung der Ergiebigkeitserhöhung zu sichern. Die Auflandung kann durch Abpumpen beseitigt werden. Langfristig könnte eine Sanierung Abhilfe verschaffen, indem die Ursache der Auflandung durch einen Ausbau beseitigt wird. Damit wäre die Neubildung eingedämmt. Das Ansteigen des Analysenparameters soll weiterhin regelmäßig beobachtet werden. Die Kluft sollte ebenfalls regelmäßig beobachtet werden, da Nachfallgefahr bestehen könnte. Die Sperrrohrfußkaverne und das nur noch teilweise aufsitzende Sperrrohr sind eventuell genauer zu untersuchen, da hier die Ursache für die Ergiebigkeitserhöhung liegen könnte. Ist dies der Fall, so ist eine Sanierung in Form eines neuen Sperrrohres einschließlich tieferer Abdichtung sinnvoll. Insgesamt ergeben sich also im hier bearbeiteten Beispiel keine zwingenden Sanierungsgründe, obwohl das Untersuchungsteam die Situation als kritisch erachtete.



Obige Abbildung: Vorgeschlagene Maßnahmen (Auswertung) als Entscheidungshilfe für weitere eigene Überlegungen.

Per Schaltfläche kann noch ein Ausdruck der Auswertung als Ergebnissicherung erfolgen, bevor das Programm beendet wird. - Die Leistungsgrenzen der EDV-gestützten Entscheidungshilfe werden bei der Arbeit mit der Software deutlich.

- Es muss ein Computer mit dem Betriebssystem Windows vorhanden sein.
- Die tatsächliche Brunnensituation kann nicht bis ins kleinste Detail erfasst werden. Daher sind die Handlungsempfehlungen mit Wahrscheinlichkeiten formuliert.
- Die textlichen Formulierungen des Gutachtens und der vorgeschlagenen Maßnahmen besitzen einen ähnlichen Aufbau der Satzstruktur. Durch die Einteilung in auszuwertende Blöcke kann es auch zu Wiederholungen von Handlungsempfehlungen kommen.
- Es werden immer mehrere mögliche Maßnahmen angegeben, die je nach Situation richtig sein können. Die Festlegung auf eine Handlungsempfehlung ist nicht möglich.
- Die Richtigkeit der Auswertung ist von der genauen Beantwortung der Fragen abhängig. Daher sind zur Bedienung der Software Fachkenntnisse sinnvoll, Laien könnten schnell von den Fragestellungen überfordert sein.
- Dieses Programm kann nur als Ratgeber zur Entscheidungsfindung dienen, die Wahl der Maßnahme bleibt dem WVU überlassen.

7 Literaturverzeichnis

- [1] **DVGW-Regelwerk:** „Brunnenregenerierung“, Technische Mitteilungen, Merkblatt W 130, ISSN 0176-3504, Juli 2001
- [2] **Matthess, G.:** „Lehrbuch der Hydrogeologie, Band 4, Grundwassererschließung, - Grundlagen, Brunnenbau, Grundwasserschutz, Wasserrecht“; - Berlin; Stuttgart: Borntraeger, 2000, ISBN 3-443-01014-8
- [3] **Bieske, E.:** „Bohrbrunnen“; 7. Auflage, - München; Wien: Oldenbourg, 1992, ISBN 3-486-26126-6
- [4] **Baudisch, R.:** „Verstopfungen von Brunnenfiltern und Unterwasserpumpen durch Aluminiumoxide“ in: bbr - Wasser und Rohrbau, Verlagsgesellschaft R. Müller, Köln, Heft 5, Seite 270 - 274, 1989
- [5] **Böhler, E.:** „Rostwasserprobleme - Ursachen und Gegenmaßnahmen“ in: Sicherung der Trinkwassergüte bei der Wasserverteilung und Wasserverwendung, Technologiezentrum Wasser (TZW) des DVGW in Karlsruhe, 2. TZW-Kolloquium, Dezember 1997
- [6] **Kuch, A.:** „Untersuchungen zum Mechanismus der Aufeisung in Trinkwasserverteilungssystemen“. Dissertationsschrift; Universität Fridericiana, Karlsruhe, 1984
- [7] **Kuch, A., Sontheimer, H., Wagner, I.:** „Die Messung der Aufeisung im Trinkwasser - Ein neues Verfahren zur Beurteilung von Deckschichten in schwarzen Stahlrohren“ in: Werkstoffe und Korrosion, Heft 34, S. 107 - 111, 1983
- [8] **Strayle, G., Stober, I., Schloz, W.:** „Ergiebigkeitsuntersuchungen in Festgesteinsaquiferen“ Informationen des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg, Heft 6, ISSN 0940-0834, Freiburg i. Br., 1994
- [9] **Kinzelbach, W., Rausch, R.:** „Grundwassermodellierung - Eine Einführung mit Übungen“, Gebr. Borntraeger, Berlin, Stuttgart, ISBN 3-443-01032-6, 1995
- [10] **Hjulström, 1934**, zitiert in: **von Engelhardt, W.:** „Die Bildung von Sedimenten und Sedimentgesteinen“, Sediment-Petrologie Teil III, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), 1973
- [11] **DVGW-Regelwerk:** „Geophysikalische Untersuchungen in Bohrlöchern und Brunnen zur Erschließung von Grundwasser - Zusammenstellung von Methoden“, Technische Mitteilungen, Merkblatt W 110, ISSN 0176-3504, Juni 1990
- [12] **DVGW-Regelwerk:** „Sanierung und Rückbau von Bohrungen, Grundwassermeßstellen und Brunnen“, Technische Regel, Arbeitsblatt W 135, ISSN 0176-3504, November 1998
- [13] **DVGW-Regelwerk:** „Bau und Ausbau von Vertikalfilterbrunnen“, Technische Regeln, Arbeitsblatt W 123, ISSN 0176-3504, September 2001

Anhang: Detailliertere inhaltliche Erläuterung des EDV-Programms

In Fragebogen I geht es um Fakten, Bestandsaufnahme und Beurteilungsbasis. Er unterteilt sich in die Bereiche qualitativ-beschreibende und quantitativ differenzierbare Informationen, wobei der erste Teil weiter in Fragen zum Schichtenaufbau am Ort des Brunnens und in Fragen zur optischen Untersuchung aufgeteilt ist. Die quantitativ differenzierbaren Informationen beinhalten Fragen zu Brunnen- bzw. Geohydraulik, hydrochemischen Charakteristika und geophysikalischen Messresultaten, also Bereiche in denen objektive Daten gesammelt werden können.

Danach wird in Fragebogen II eine detaillierte Ergebnisabfrage der Brunnen-TV-Befahrung vorgenommen.

Schließlich werden die Feststellungen zur Zeitveränderlichkeit des Brunnens in Fragebogen III festgehalten.

Somit sind alle wichtigen und aussagekräftigen Gebiete angesprochen, um eine breite Beurteilungsbasis für Handlungsempfehlungen zu gewährleisten. Die Relevanz der verschiedenen Fragen und zu gebenden Antworten ist nicht gleich hoch, vielmehr wird hier deutlich differenziert:

„k.o.-Kriterien“:

Am bedeutendsten sind Fragen, die so genannte „k.o.-Kriterien“ herausfiltern. Dies sind Sachverhalte, deren alleiniges Auftreten ausreicht, um gewisse Maßnahmen zu erzwingen. Solche Kriterien gibt es streng genommen zwar nicht, jedoch können einige Auffälligkeiten annähernd als „k.o.-Kriterien“ gehandelt bezeichnet werden. Beispielsweise führen schnelle Veränderungen des Hydrochemismus oder des baulichen Zustandes zu relativ sicheren Entscheidungen und den damit verbundenen Maßnahmen. Ebenso kritisch sind Lochfraß am Sperrrohr oder ein nicht mehr auf dem Festgestein aufsitzender Sperrrohrfuß mit Hinterströmung anzusehen. Folgende Fragen können als solche Warnhinweise dienen:

Eine bejahende Antwort bei der Frage 4 (s. unten folgende Fragenliste) nach Kernverlusten oder Bohrbarkeit während der Ausführung der Bohrarbeiten kann als ein solcher Warnhinweis gesehen werden. Allerdings nicht im obigen Sinne, denn Aussagen über Spül- oder Kernverlust beim Bohren können darauf schließen lassen, dass es sich bei festgestellten Auffälligkeiten im Brunnen nicht um Alterungserscheinungen handeln muss. Dies ist also ein Kriterium, um „Scheinalterungen“ feststellen zu können. Darunter versteht man Erscheinungen, die nicht auf einen Alterungsprozess des Brunnens schließen lassen, sondern vielmehr kurz nach der Fertigstellung des Brunnens entstanden sind und sich womöglich nicht oder nur noch kaum weiterentwickeln. Dies muss anhand weiterer Antworten und eventuell weiterer Untersuchungen überprüft werden.

Einen ersten wichtigen Warnhinweis liefert die Einschätzung des TV-Untersuchungsteams oder der Mitarbeiter des WVU. Doch diese Einschätzung ist subjektiver Art und stützt sich meist auf kritische Hinweise aus der TV-Befahrung. Daher sollten diese bei der detaillierten Befragung zur optischen Untersuchung angesprochen werden. Ansonsten könnte es sich auch um eine Fehleinschätzung der Brunnensituation handeln. Die nächsten „k.o.-Kriterien“ sind zutreffende Antworten auf die Fragen 16 und 18 (s. u.), da schwerwiegende Veränderungen der hydrochemischen Charakteristika des Brunnenwassers einen Weiterbetrieb stark gefährden können. Ursachenforschung ist in jedem Fall zu betreiben, meist sind diese Probleme mit Auffälligkeiten am Sperrrohr begründbar. Obwohl das Überschreiten der Grenzwerte der Trinkwasserverordnung sofortige Handlungen bedingt, wird Frage 17 nicht als „k.o.-Kriterium“ angesehen, da dies nur eine Verstärkung bereits vorhandener Auffälligkeiten im Bereich der Hydrochemie ist. Diese Frage kann also nicht mit „Ja“ beantwortet werden, wenn die Fragen 13 - 16 und 18 mit „Nein“ beantwortet wurden.

Weitere Warnhinweise liefert nur eine genaue Auswertung einer TV-Befahrung des Brunnens. Zunächst sind hier kritische Erscheinungen am Sperrrohr zu erwähnen. Diese sind eine groß bzw. sehr groß ausgebildete Sperrrohrfußkaverne oder eine starke und gut erkennbare Sperrrohrhinterströmung. Außerdem führen offener Lochfraß oder kritische Korrosion am Sperrrohr sofort zu Sanierungszwang. Da dies im Fragebogen nicht berücksichtigt wird, ist eine entsprechende Frage zu formulieren.

In der Brunnenbohrung stellen besonders in der oberen Brunnenhälfte befindliche, mit sehr großen Ausspülungen oder Ausbrüchen und erheblichen Felsüberständen auftretende Schicht- und Bankungsfugen bzw. Auskolkungen und Kavernen eventuell verbunden mit Grundwasserzufluss eine

starke Gefährdung dar. Ebenso kritisch ist eine massive Bohrlocherweiterung infolge von Absandung oder Aufblätterung an lithologischen Grenzen anzusehen, da Einsturzgefahr bestehen könnte.

Im Bereich der Zeitveränderlichkeit gibt es kein „k.o.-Kriterium“, nur mehrere Antworten gemeinsam können eine Handlungsmaßnahme erforderlich machen. Beispielsweise wären dies extrem auffällige Alterungserscheinungen bei einem zeitlichen Untersuchungsabstand von weniger als fünf Jahren und einer festgestellten Veränderung in diesem Zeitraum. Die Feststellung der Veränderung im Zeitraum zwischen den beiden letzten Untersuchungen muss durch eine zusätzliche Frage abgedeckt werden. Jede einzelne dieser Auffälligkeiten kann ohne weitere Verstärkung eine Handlungsmaßnahme begründen.

Kriterien unterschiedlicher Gewichtung:

Neben den so genannten „k.o.-Kriterien“ gibt es auch solche Fragen, die nur im Zusammenspiel mit anderen zu gewissen Empfehlungen führen. Andere wiederum dienen nur zur Erfragung der Grundlage, mit deren Hilfe die Fragen beantwortet werden. Für eine sinnvolle EDV-Realisierung ist es notwendig, die Antworten in Kriterien mit hoher, mittlerer und geringer Wirkung zu unterteilen.

Die Fragen 1 und 2 dienen beide zur Überprüfung der oben erwähnten Grundlage. Sie sind somit Kriterien geringerer Wirkung und können spätere Aussagen belastbarer machen oder abschwächen. Erste Hinweise bzgl. der Brunnensituation liefern die Fragen 3 und 4. Besteht der Grundwasserleiter aus geklüfteten Magmatiten, Metamorphiten oder Kalkstein, so gibt dies bereits eine kleine Entwarnung, da vorhandene Auffälligkeiten vermutlich schon beim Bohren entstanden sind. Sandstein hingegen ist eher als Warnhinweis zu betrachten.

Lithologische Auffälligkeiten im Schichtenprofil zusammen mit einem Grundwasserleiter aus Sandstein führen bereits zu einem ersten Verdacht, während Daten über Wasserführung und Wasserzutritt die Belastbarkeit späterer Aussagen erhöhen.

Die Wirkung von Frage 4 in Bezug auf Scheinalterung wurde bereits angesprochen.

Die Fragen zur optischen Untersuchung dienen bis auf Frage 7 vor allem der Feststellung der Grundlage und Belastbarkeit. Besonders Stand der Technik und Ausführlichkeit der Dokumentation werden hinterfragt. Fanden allerdings keine TV-Untersuchungen statt, so lässt sich ein Großteil der Fragen nicht beantworten und belastbare Aussagen und Empfehlungen sind kaum möglich.

Sehr ähnlich sind die Fragen zur Brunnen- bzw. Geohydraulik aufgebaut. Einige Fragen sichern lediglich die Grundlage zur Antwort in Frage 12. Diese bietet als einzige die Möglichkeit eine nichtsichtbare Verockerung zu diagnostizieren, falls sich die Ergiebigkeit des Brunnens verringert hat. Deshalb werden die Antwortmöglichkeiten dieser Frage stärker differenziert.

Die Wichtigkeit der hydrochemischen Situation des Brunnens wurde bereits angesprochen. Neben den beiden „k.o.-Kriterien“ sind die Fragen 8 - 10 besonders zur Verdachtsverstärkung oder zur Bestätigung anderer Argumente gedacht. Gemeinsam mit Frage 17 erzwingen sie jedoch Handlungsbedarf und damit verbundene Maßnahmen.

Alle Fragen zu den geophysikalischen Messresultaten lassen sich durch Belastbarkeitsaussagen begründen. Ähnlich zu den optischen Untersuchungen geht es hier um die Überprüfung des gewünschten Standards und der Ausführlichkeit der Dokumentation. Wurde keine geophysikalische Untersuchungskampagne durchgeführt, so lassen sich wiederum einige Fragen nicht beantworten.

Die kritischen Hinweise der detaillierten Befragung wurden bereits angesprochen, so dass diese nicht noch einmal genannt werden müssen. Das Feststellen eines nicht mehr aufsitzenden Sperrrohres kann z. B. eine Hinterströmung vermuten lassen, eine solche muss jedoch nicht der Fall sein. Dies wäre dann genauer nachzuprüfen. Ist der Zustand am Sperrrohrfuß aber wegen Aufwachsungen nicht beurteilbar, so sollte eine Regenerierungsmaßnahme mit anschließender TV-Befahrung durchgeführt werden. Nicht vorhandene Auffälligkeiten sind natürlich immer als Entwarnung zu sehen.

Klüfte und Spalten, Schicht- und Bankungsfugen sowie Kavernen und große Auskolkungen können je nach Auftreten beurteilt werden. So ist in der Regel die Folge der Antwortmöglichkeiten von oben nach unten verbunden mit einer Gefahrenzunahme bzgl. Standsicherheit und Zeitbeständigkeit des Brunnens.

Nachfall ist meist eine Folge der gerade erwähnten Auffälligkeiten und kann nur in Verbindung mit anderen Feststellungen vorkommen. Tritt er jedoch massiv auf, so ist er als eine Verstärkung anzusehen, die einen vollständigen Ausbau des Brunnens notwendiger macht.

Auflandungen, Trübe und Schwebstoffführung sind eigentlich unproblematische Erscheinungen, die meist sichtbare Ursachen haben, welche vorher schon beschrieben wurden. Eine Auflandung im Brunnentiefsten kann durch Abpumpen entfernt werden, vorbeugend können jedoch auch Sanierungsmaßnahmen angedacht werden. Trübe und Schwebstoffführung sind dagegen relativ schwierig zu beseitigen, eventuell können Sanierungsmaßnahmen weiterhelfen.

Die Fragen zur Zeitveränderlichkeit sind, abgesehen von den beiden vorher angesprochenen Fragen, eher Kriterien geringerer Wirkung. So können bei entsprechenden Antworten belastbarere Vorschläge zu Sanierungsmaßnahmen gemacht werden.

Insgesamt gibt es 7 Fragebögen mit zusammen 39 Fragen. Diese sind in den nachfolgenden Tabellen 1 - 7 aufgeführt.

Tabelle 1: Fragen zum Schichtenaufbau

1	Es gab an der Örtlichkeit eine Kernbohrung, von der die Ergebnisse der Aufnahme textlich und grafisch vorliegen?	Ja Nein
2	Aufnahme sowie Darstellung der Schichten sind gemäß DIN 4022/4023 vorgenommen bzw. in inhaltlich sehr enger Anlehnung an diese. Sollte dies nicht der Fall sein: Gibt es eine eher individuelle Beschreibung?	Ja Nein
3	Der Grundwasserleiter besteht aus:	geklüfteten Magmatiten, Metamorphiten oder Kalkstein Sandstein sonstigem Material
4	Es existieren Aussagen bzgl. Spülverlust, Kernverlust, besonders guter bzw. schlechter Bohrbarkeit oder ähnlicher Auffälligkeiten während der Ausführung der Bohrarbeiten.	Ja Nein

Tabelle 2: Optische Untersuchungen

5	Gibt es:	nein, es gibt keine TV-Befahrung Aufzeichnungen einer oder mehrerer TV-Befahrungen neben dem Videoband eine schriftliche Kurzdokumentation bzw. ein Befahrungsprotokoll der TV-Untersuchung neben dem Videoband einen ausführlichen und detaillierten Ergebnisbericht mit expliziter Dokumentation aller tiefenbezogenen Auffälligkeiten und einer Wertung/Handlungsempfehlung
6	Die Technik der TV-Anlage erlaubt neben einer Axialsicht auch Schrägsicht und/oder Radialsicht?	Ja Nein
7	TV-Untersuchungsteam und/oder Mitarbeiter des WVU sehen in den Ergebnissen der optischen Befahrung kritische Hinweise bzgl. Standsicherheit/Zeitbeständigkeit des Brunnens (Subjektive Einschätzung oder Analogieschlüsse)?	Ja Nein

Tabelle 3: Brunnen- bzw. Geohydraulik

8	Es liegen ausgewertete Daten eines hydrologischen Pumpversuches aus der Zeit der Brunnenherstellung vor?	Ja Nein
9	Es existieren Daten und Auswertungen eines Leistungspumpversuches aus der längeren Vergangenheit?	Ja Nein
10	Es liegen ausgewertete Daten eines neuerlichen hydraulischen Pumpversuches vor?	Ja Nein
11	Es existieren ausgewertete Daten eines neuerlichen Leistungspumpversuches oder eines Pumpversuches zur Überwachung/Absenkung des Brunnens/Wasserspiegels?	Ja Nein
12	Aquiferparameter und/oder Brunnenbetriebsdaten früheren und jüngeren Datums weichen stark voneinander ab:	Ergiebigkeit stark erhöht Ergiebigkeit stark verringert keine bzw. geringe Abweichung oder keine Aussage möglich

Tabelle 4: Hydrochemische Charakteristika

13	Anhand diagrammatischer oder tabellarischer Darstellungen gibt es schon seit langer Zeit einen gleichmäßigen Trend (i. d. R. ein Ansteigen) eines oder mehrerer Analysenparameter?	Ja Nein
14	Erstmals sind bakteriologisch auffällige Befunde aufgetreten?	Ja Nein
15	Erstmals sind Inhaltsstoffe im Brunnenwasser analysiert worden, die häufig von landwirtschaftlicher Flächennutzung herrühren, wie bspw. Pestizide oder bislang unauffällige Konzentrationen erhöhen sich auffällig wie z. B. Nitrat?	Ja Nein
16	Bislang unauffällige Konzentrationen anthropogener Substanzen erhöhen sich auffällig oder treten erstmals auf, wie z. B. Kohlenwasserstoffe, CKW, PAK, Schwermetalle u. a.?	Ja Nein
17	Es wird/werden Grenzwert/e der Trinkwasserverordnung überschritten?	Ja Nein
18	Wasserproben indizieren eindeutige Oberflächeneinflüsse?	Ja Nein

Tabelle 5: Geophysikalische Messresultate

19	Es gibt:	nein, keine geophysikalische Untersuchung eine oder mehrere geophysikalische Untersuchungskampagnen im betreffenden Brunnen außer dem Feldplot eine schriftliche Kurzdokumentation der Untersuchungen außer dem Feldplot einen ausführlichen und detaillierten Ergebnisbericht mit expliziter Diskussion aller Messkurven und einer Wertung bzw. Handlungsempfehlung
20	Die geophysikalischen Untersuchungen beinhalten zumindest SAL/TEMP, CAL, FLOW, GR und FEL?	Ja Nein
21	Festgestellte Auffälligkeiten lassen sich mit den Resultaten der TV-Befahrung und/oder lithologischen Gegebenheiten korrelieren?	Ja Nein

Tabelle 6: Detaillierte Ergebnisabfrage Brunnen-TV

22	Sperrrohrfußkaverne	nicht vorhanden ansatzweise vorhanden eindeutig vorhanden, jedoch klein groß ausgebildet sehr groß ausgebildet, vermutlich >1m3
23	Hinweise auf Sperrrohrhinterströmung	keine Hinterströmung festzustellen vorhanden, jedoch gering und schwierig festzustellen stark und gut erkennbar
24	Aufsitzen des Sperrrohres auf dem Fels	vollständig über den ganzen Umfang nur noch teilweise gar nicht mehr wegen Aufwachsungen o. ä. nicht mehr beurteilbar
25	Klüfte und Spalten	fehlend mehrere Klüfte stehen eng nebeneinander oder kreuzen sich die Kluft steht nicht steil (< 80° Einfallswinkel) die Kluft tritt in der oberen Brunnenhälfte klaffend, durchschlagend und mit Ausbrüchen auf
26	Schichtfugen, Bankungsfugen	nicht vorhanden oder sehr schwach ausgebildet in größerer Zahl über das Schichtenprofil in annähernd gleichmäßiger, nicht allzu starker Ausprägung festzustellen eine oder mehrere mit sehr großen Ausspülungen/Ausbrüchen, jedoch ohne nennenswerte Felsüberstände eine oder mehrere mit sehr großen Ausspülungen/Ausbrüchen und erheblichen Felsüberständen eine oder mehrere mit sehr großen Ausspülungen/Ausbrüchen und erheblichen Felsüberständen und teilweise offene Horizontalfuge/-spalte oder erkennbarer Grundwasserzufluss eine oder mehrere mit sehr großen Ausspülungen/Ausbrüchen und erheblichen Felsüberständen und teilweise offene Horizontalfuge/-spalte oder erkennbarer Grundwasserzufluss. Jedoch Ausbildung der subjektiv problematisch eingeschätzten Schichtfugen in der oberen Brunnenhälfte
27	Kavernen und große Auskolkungen	fehlend eine oder mehrere mit sehr großen Ausspülungen/Ausbrüchen, jedoch ohne nennenswerte Felsüberstände eine oder mehrere mit sehr großen Ausspülungen/Ausbrüchen und erheblichen Felsüberständen eine oder mehrere mit sehr großen Ausspülungen/Ausbrüchen und erheblichen Felsüberständen sowie offensichtlich bestehender Zusammenhang zur Lithologie oder zum Grundwasserzufluss eine oder mehrere mit sehr großen Ausspülungen/Ausbrüchen und erheblichen Felsüberständen sowie offensichtlich bestehender Zusammenhang zur Lithologie oder zum Grundwasserzufluss. Jedoch Ausbildung der subjektiv problematisch eingeschätzten Kaverne in der oberen Brunnenhälfte
28	Absandungen und /oder Aufblätterungen an lithologischen Grenzen haben zur massiven Bohrlocherweiterung geführt?	Ja Nein
29	Nachfall von Gesteinsausbrüchen aus dem Hangenden hat zu Teil- oder Vollverschluss im Bohrloch geführt?	Ja Nein
30	Auflandung im Brunnentiefsten	nicht vorhanden bedeutende bzw. mächtige Auflandung vermutlich sandige, grobkörnige oder stückige Sedimente bzw. Nachfall bedeutende bzw. mächtige Auflandung vermutlich schluffig-tonige Feinstkornablagerungen
31	Trübe und Schwebstoffführung	fehlend über die ganze Wassersäule stärker und relativ gleichmäßig auftretend nur horizontgebunden und bestimmten Ursachen zuordenbar
32	Offener Lochfraß oder kritische Korrosion feststellbar?	Ja Nein

Tabelle 7: Feststellungen zur Zeitveränderlichkeit

33	Die feststellbaren Alterungserscheinungen werden subjektiv oder auf Grundlage der Bearbeitung der Fragebögen 6 und 7 angesehen als:	extrem auffällig und stark, vermutlich auch folgebehaftet deutlich ersichtlich, in ihrer Wirkung jedoch nicht abschätzbar nur bei genauer Betrachtung erkennbar, in überschaubarer Zeit noch keine Schadwirkung zu erwarten
34	Die TV-Befahrung ist eine Wiederholungsuntersuchung, d. h. eine vergleichbare Befahrung wurde zuvor - in einem nach Frage 36 spezifizierten Zeitraum - schon einmal vorgenommen?	Ja Nein
35	Geophysikalische Messungen sind mindestens zu zwei mehr als ein Jahr auseinander liegenden Zeitpunkten ausgeführt worden?	Ja Nein
36	Der zeitliche Abstand zwischen den beiden zuletzt durchgeführten TV-Untersuchungen betrug:	< 5 Jahre 5 bis 10 Jahre > 10 Jahre nur eine oder keine Untersuchung gemacht
37	Sind anhand der letzten beiden optischen Untersuchungen stärkere Veränderungen erkennbar, die eindeutig dem Zeitraum zwischen diesen Untersuchungen zuzuordnen sind?	Ja Nein
38	Veränderungen zwischen den beiden letzten Untersuchungen sind auch erkennbar anhand hydraulischer und/oder hydrochemischer Kennwerte?	Ja Nein
39	Relativ zu Brunnen der Umgebung oder solchen mit gleicher Lithologie wird die Situation hier deutlich kritischer angesehen und/oder gemessene Vergrößerungen des Querschnitts übersteigen in den letzten 5 Jahren den 50%-Wert?	Ja Nein

Zuordnen fachlich begründeter Schlussfolgerungen und konkreter Maßnahmen bzw. Handlungsempfehlungen zu den Antworten bzw. Schlüsselnummern der Fragebögen

Bevor die Umsetzung in Programmform in Angriff genommen werden kann, muss zuerst unter Beachtung ökonomischer Gesichtspunkte eine Zuordnung von Entscheidungen und Maßnahmen zu den aus den Fragebögen erhaltenen Antworten bzw. Schlüsselnummern vorgenommen werden. Außerdem muss festgelegt werden, wie mit Verstärkungen und Bestätigungen als auch mit Widersprüchen umzugehen ist.

Prinzipiell denkbare Entscheidungen und technische Maßnahmen

Bevor Zuordnungen erfolgen können, muss ein Maßnahmenkatalog erstellt werden, in dem alle denkbaren Entscheidungen enthalten sind. Dieser Katalog wird zunächst als reine Auflistung abgebildet, bevor die einzelnen Maßnahmen ausführlich angesprochen werden.

1. Kein Handlungsbedarf
2. Kein momentaner Handlungsbedarf
3. Betriebsart/Fördermodalitäten ändern (z. B. länger, weniger pro Zeit)
4. Zunächst Regenerierung erforderlich
5. Nochmalige Untersuchung (z. B. TV, Geophysik, Hydrochemie) sinnvoll
6. Erstmalige Untersuchung (z. B. TV, Geophysik, Hydrochemie, Pumpversuch) sinnvoll
7. Entsandern, Entfernen von Auflandungen
8. Allgemeines Anraten einer weiteren Beobachtung (z. B. häufiger, normal, weniger häufig)
9. Allgemeines Anraten einer Sanierung
10. Einbau einer verlorenen Rohrtour im unteren Brunnenteil
11. Einbau einer vollständigen Verrohrung mit Ringraumhinterfüllung (Neuausbau)
12. Reparatur/Austausch des Sperrrohres
13. Einbau eines Sperrrohres einschließlich tieferer Abdichtung
14. Erweitern/Überbohren des vorhandenen Bohrlochs und Neuausbau
15. Aufgabe/Verlagerung des Brunnens aus technischen, hydrogeologischen oder ökonomischen Gesichtspunkten

Maßnahme 1: Kein Handlungsbedarf

Diese Empfehlung bedeutet, dass sich der Brunnen in einwandfreiem Zustand befindet und vermutlich langfristig nicht mit einschränkenden Alterserscheinungen zu rechnen ist. Der Brunnen kann so weiterbetrieben werden wie bisher.

Maßnahme 2: Kein momentaner Handlungsbedarf

Hierbei handelt es sich um einen Brunnen mit geringen Alterungserscheinungen, die momentan keine Gefährdung für den Weiterbetrieb darstellen. Langfristig kann sich diese Situation jedoch verschlechtern, so dass dann Sanierungen notwendig werden könnten.

Maßnahme 3: Betriebsart/Fördermodalitäten ändern (länger, weniger pro Zeit)

Diese Empfehlung wird gegeben, wenn durch eine geringere Entnahme über einen längeren Zeitraum eine Verbesserung der Situation erzielt werden kann. Folgende Begebenheiten können zu dieser Handlungsmaßnahme führen: Sandführung kann durch eine zu hohe Förderleistung verursacht werden, da an der Pumpe eine hohe Sogwirkung entsteht. Dieser Vorgang kann auch zu Absandungen und Schichtenaufblätterungen und der damit verbundenen Bohrlocherweiterung oder zu feststellbaren Oberflächeneinflüssen führen.

Maßnahme 4: Zunächst Regenerierung erforderlich

Eine Regenerierung ist nach dem DVGW-Regelwerk, Merkblatt W 130, „Brunnenregenerierung“, „das Entfernen leistungsmindernder Ablagerungen aus dem Brunnenringraum und dem angrenzenden Grundwasserleiter zur Wiederherstellung der hydraulischen Funktion“. Allerdings muss der Ringraum nicht beachtet werden, da er bei unverfilterten Brunnen nicht existiert. Mögliche Gründe für diese Maßnahme könnten Verockerungen, erkennbar durch verringerte Ergiebigkeit, oder mächtige Auflandungen sein. Das Entfernen von Aufwachsungen zum Erzielen besserer Erkenntnisse ist laut Definition eigentlich eine Reinigung, soll aus Einfachheitsgründen jedoch diesem Punkt zugeordnet werden. Die einzelnen Regenerierungsverfahren werden in oben genanntem Merkblatt detailliert mit Vor- und Nachteilen beschrieben.

Maßnahme 5: Nochmalige Untersuchung (TV, Geophysik, Hydrochemie) sinnvoll

Entsprechen die vor Ort durchgeführten Untersuchungen nicht dem gewünschten Standard, so sind erneute Messungen oder Befahrungen notwendig, die den erforderlichen Stand der Technik erfüllen. Andererseits kann in gewissen Situationen eine nochmalige Untersuchung, die der speziellen Gegebenheit angemessen ist, unterstützende Wirkung bei der Entscheidungsfindung haben. Dies ist besonders bei der Abklärung der Ursachen für Änderungen der hydrochemischen Charakteristika oder bei Auffälligkeiten am Sperrrohr der Fall. Im Bereich der Geophysik bietet das DVGW-Regelwerk, Merkblatt W 110 „Geophysikalische Untersuchungen in Bohrlöchern und Brunnen zur Erschließung von Grundwasser“ eine detaillierte Zusammenstellung der wichtigsten Verfahren und ihrer Anwendungsmöglichkeiten.

Maßnahme 6: Erstmalige Untersuchung (TV, Geophysik, Hydrochemie, Pumpversuch) sinnvoll

Wurden diverse Untersuchungen nicht durchgeführt, sollten diese nachgeholt werden, um eine fundierte Entscheidungsgrundlage zu bieten. Ohne TV-Befahrung sind z. B. kaum belastbare Aussagen über den Zustand der Brunnenbohrung möglich.

Maßnahme 7: Entsanden, Entfernen von Auflandungen

Diese Handlungsempfehlung wurde bereits unter Maßnahme 4 angesprochen. Nähere Hinweise zu den entsprechenden Methoden/Verfahren liefert das DVGW-Merkblatt W 119.

Maßnahme 8: Allgemeines Anraten einer weiteren Beobachtung (häufiger, normal, weniger häufig)

Verschiedene Feststellungen von Alterungserscheinungen bedingen keine sofortige Handlung, sondern erfordern lediglich erhöhte Aufmerksamkeit. In solchen Fällen wird eine regelmäßige Beobachtung angeraten, die je nach Art und Ausprägung der Alterungserscheinung unterschiedlich oft stattfinden sollte. Es kann jedoch nur eine Aussage zur Häufigkeit dieser Beobachtungen gemacht werden; die genauen Zeiträume hat der Betreiber je nach Situation und Mitteln selbst festzulegen.

Maßnahme 9: Allgemeines Anraten einer Sanierung

„Eine Sanierung ist das Vorbereiten und Durchführen baulicher Maßnahmen zur Verbesserung bzw. Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit von Brunnen.“ (DVGW-Regelwerk, Merkblatt W 130). Die gängigen Verfahren werden im DVGW-Regelwerk, Arbeitsblatt W 135 ausführlich beschrieben. Diese Maßnahme wird vorgeschlagen, wenn sich Auffälligkeiten ergeben, die den Betrieb des Brunnens

nachhaltig beeinflussen. Es besteht aber auch die Möglichkeit, vorbeugend Sanierungsmaßnahmen durchzuführen. Meist werden diese Handlungsempfehlungen konkretisiert und erscheinen unter einer der Maßnahmen 10 bis 14. Sanierungsbedarf besteht besonders beim gemeinsamen Auftreten von Auffälligkeiten am Sperrrohr und Veränderungen der Hydrochemie.

Maßnahme 10: Einbau einer verlorenen Rohrtour im unteren Brunnenteil

Sind im Brunnen Absandungen und Schichtenaufblätterungen zu beobachten, die immer wieder zu mächtigen Auflandungen führen, so kann der Einbau einer verlorenen Rohrtour möglicherweise Abhilfe verschaffen. Dabei handelt es sich um eine Art Sperrrohr im unteren Brunnenabschnitt ohne Verbindung zur Erdoberfläche. Durch diese Maßnahme kann die ständige Absandung mit der verbundenen Neuauflandung eingedämmt und somit ein häufiges Abpumpen erspart werden. Auch wenn die Absandung keine bedenklichen Ausmaße erreicht, kann ein derartiger, vorbeugender Ausbau aus ökonomischer Sicht sinnvoll sein.

Maßnahme 11: Einbau einer vollständigen Verrohrung mit Ringraumhinterfüllung (Neuausbau)

Diese Maßnahme wird bei Auffälligkeiten empfohlen, welche die Standsicherheit bzw. Zeitbeständigkeit des Brunnens gefährden. Beispiele hierfür sind Schicht- und Bankungsfugen mit sehr großen Ausspülungen, erheblichen Felsüberständen und offener Horizontalfuge oder erkennbarem Grundwasserzufluss in der oberen Brunnenhälfte. Kavernen und Auskolkungen derselben Art stellen ebenfalls ein großes Sicherheitsrisiko dar. Aber auch Absandung, Trübe und Schwebstoffführung oder mächtige Auflandungen in Verbindung mit Schicht- und Bankungsfugen oder Kavernen und Auskolkungen können zu dieser Handlungsempfehlung führen. Die gängigen Ausbauarten werden im DVGW-Regelwerk, Arbeitsblatt W 123 „Bau und Ausbau von Vertikalfilterbrunnen“ ausführlich mit Vor- und Nachteilen beschrieben.

Maßnahme 12: Reparatur/Austausch des Sperrrohres

Ursache dieser Handlungsempfehlung sind meistens Veränderungen der hydrochemischen Charakteristika zusammen mit Auffälligkeiten am Sperrrohr. Denn fehlendes Aufsitzen des Sperrrohres, Sperrrohrfußkaverne oder gar Hinterströmung könnten Grund für die chemischen Änderungen oder festgestellte Oberflächeneinflüsse sein. Lochfraß oder fortgeschrittene Korrosion am Sperrrohr sollten sofort behoben werden.

Maßnahme 13: Einbau eines Sperrrohres einschließlich tieferer Abdichtung

Je nachdem wo sich die kritische Stelle befindet, ist es sinnvoll, das Sperrrohr nicht nur auszutauschen, sondern ein längeres Rohr einzubauen, um eine tiefere Abdichtung zu erzielen. Dies lohnt sich besonders bei Auffälligkeiten in der Nähe des Sperrrohrfußes, seien es Klüfte und Spalten, Schicht- und Bankungsfugen oder Kavernen und Auskolkungen, falls diese Ursache für Wasserzutritt und hydrochemische Einflüsse sind. Unter Umständen kann hierdurch ein Neuausbau verhindert werden.

Maßnahme 14: Erweitern/Überbohren des vorhandenen Bohrlochs und Neuausbau

Diese sehr aufwendige und damit teure Maßnahme wird sehr selten empfohlen. Nur wenn Nachfall von Gesteinsausbrüchen zu Teil- oder Vollverschluss geführt hat, könnte eine solche Empfehlung sinnvoll sein.

Maßnahme 15: Aufgabe/Verlagerung des Brunnens aus technischen, hydrogeologischen oder ökonomischen Gesichtspunkten

Dies ist die Empfehlung, die die schwerwiegendsten Konsequenzen für den Brunnenbetreiber nach sich ziehen kann. Diese Maßnahme wird nur aufgrund dem gemeinsamen Zutreffen mehrerer „k.o.-Kriterien“ aus verschiedenen Bereichen gegeben. So reichen z. B. Lochfraß, starke Hinterströmung am Sperrrohr und auffallende Veränderungen der hydrochemischen Charakteristika (wie Oberflächeneinflüsse) nicht für diese Handlungsempfehlung aus, obwohl es sich bei jeder einzelnen dieser Tatsachen, um ein „k.o.-Kriterium“ handelt. Sind jedoch zusätzlich Kavernen und Auskolkungen mit sehr großen Ausbrüchen und Felsüberständen vorhanden und eventuell auch Nachfall mit Teilverschluss, so wird eine Aufgabe des Brunnens wahrscheinlicher. Trotz einer solchen Empfehlung sollte der Brunnenbetreiber sich die Entscheidung gründlich überlegen und untersuchen, ob es nicht doch andere Möglichkeiten gibt. Die notwendigen Rückbaumaßnahmen können nach einem der im DVGW-Regelwerk, Arbeitsblatt W 135, dargestellten Verfahren vollzogen werden.

Natürlich ist dieser Maßnahmenkatalog nicht allumfassend und kann nicht jede einzelne Regenerierungs- oder Sanierungsmaßnahme enthalten. Dies würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen und wäre in dieser Ausführlichkeit auch nicht machbar. Für den Anwender soll über diese

Handlungsempfehlung eine Entscheidungsgrundlage gelegt werden, mit deren Hilfe er seine subjektiven Eindrücke des Brunnenzustandes bestätigen oder widerlegen kann, um die richtige/n Entscheidung/en zu fällen. Da nicht alle Kombinationsmöglichkeiten der Fragebögen abgedeckt werden können, sind auch mehrere Empfehlungen möglich. Die Wahl der Maßnahme unter den vorgeschlagenen Alternativen bleibt immer dem Betreiber überlassen.

Beachtung ökonomischer Gesichtspunkte

Für die WVU ist es von großer Bedeutung, die Kosten für den Betrieb des Brunnens zu optimieren. Dieses Bestreben bedeutet für die Handlungsempfehlungen, dass diese sich ebenfalls nach ökonomischen Gesichtspunkten zu richten haben. So erscheint es in Anbetracht der Kosten einer Sanierungsmaßnahme sinnvoll, zunächst weitere, eingehende Untersuchungen vorzuschlagen, um zu klären, ob diese Maßnahme auch tatsächlich notwendig ist oder es sich doch um eine „Scheinalterung“ handelt und die Standsicherheit bzw. Zeitbeständigkeit des Brunnens nicht gefährdet ist. Eine solche Einstufung ist schwer zu gewährleisten, da die einzelnen Verfahren unterschiedlich teuer sind und die Preise auch je nach Anbieter variieren können. Daher wird ganz allgemein eine Reihenfolge angenommen, die vom billigsten bis zum teuersten Verfahren reicht, ohne dass dies in jedem Einzelfall zutreffen muss. Diese Rangfolge lautet:

Kein Handlungsbedarf → erst-/nochmalige Untersuchungen → Entfernen von Auflandungen → Regenerierungsmaßnahmen → Sanierungsmaßnahmen → Aufgabe des Brunnens, verbunden mit Rück- oder Neubaumaßnahmen

Aufgrund dieser Einteilung und der Beurteilung des Brunnenzustandes durch Auswertung der Fragebögen kann dann eine Maßnahme zugeordnet werden, die größtmöglichen Erfolg verspricht, gleichzeitig aber auch die geringsten Kosten verursacht. Ist jedoch die Situation im Brunnen nicht eindeutig, können auch mehrere Maßnahmen vorgeschlagen werden, unter denen der Betreiber seiner Einschätzung nach die richtige wählen kann. So werden z. B. bei Änderungen des Hydrochemismus die Maßnahmen 5 (nochmalige Untersuchung) und 9 (allgemeine Sanierung) vorgeschlagen. Die nochmalige Untersuchung dient zur Abklärung der Ursachen für die festgestellte Änderung. Sind diese jedoch bekannt, kann auch gleich eine Sanierung durchgeführt werden, falls diese erforderlich ist. Diese Entscheidung und die Wahl der notwendigen Mittel kann dem WVU nicht abgenommen werden. Diese Wahl kann von der EDV-gestützten Entscheidungshilfe erleichtert oder unterstützt werden.

Tabellarische Zuordnung von Antworten bzw. Schlüsselnummern zu Entscheidungen und Maßnahmen

Nachdem die Datenbasis durch die Beantwortung der Fragebögen vorhanden und die möglichen Maßnahmen festgelegt sind, wird die Schnittstelle zwischen diesen beiden Bereichen vorgestellt. Hier werden die erhaltenen Antworten bzw. Schlüsselnummern den geeigneten Maßnahmen und Handlungsempfehlungen zugeordnet.

Der Gedanke, jedem Code seine zugehörige Handlungsempfehlung zuzuordnen, ist sofort zu verwerfen, denn bei 39 Fragen mit mindestens zwei Antwortmöglichkeiten entstehen mehr als 2^{39} (etwa 550 Billionen!) Kombinationen. Auch die Vorstellung, sich nur an den 10 „k.o.-Kriterien“ zu orientieren und diesen sowie den entstehenden Kombinationen Maßnahmen zuzuordnen (2^{10} bzw. 1024 Möglichkeiten) wurde nicht realisiert. Zwei Gründe sind anzuführen:

Erstens ermöglicht jedes dieser Kriterien für sich allein bereits eine Handlungsempfehlung. Durch das Vorhandensein mehrerer dieser Auffälligkeiten wird die Wahl der Maßnahme nur geringfügig beeinflusst, lediglich die Empfehlung „Aufgabe des Brunnenstandortes“ wird wahrscheinlicher.

Zweitens fehlt eine Verknüpfung zu verstärkenden oder abschwächenden Antworten. Die Beachtung dieser Zusammenhänge würde erneut zu einer übergroßen Zahl an Zuordnungen führen. Nichtbeachtung würde andererseits die Anzahl der Fragen auf zehn reduzieren. Dadurch wäre jedoch die Datenbasis so gering, dass die Aussagekraft mehr als zweifelhaft wäre, da Alterungserscheinungen wie Verockerungen oder auch „Scheinalterungen“ nicht feststellbar wären.

Die obige Betrachtung zeigt, dass eine Verknüpfung der „k.o.-Kriterien“ nur in wenigen Fällen nötig ist. Vielmehr gilt es, die Beziehungen der einzelnen Fragen untereinander zu beachten. Dabei spielt die Wichtigkeit der Antwort nur eine untergeordnete Rolle, denn die gemeinsame Aussagekraft ist von

Bedeutung. Hierzu werden die Fragen mit ihren verschiedenen Antwortmöglichkeiten der Reihe nach durchgegangen, auf Verknüpfungsmöglichkeiten mit vorhergehenden Fragen untersucht und die geeigneten Maßnahmen festgehalten. Dieses Verfahren ermöglicht eine relativ ausführliche Bearbeitung, ohne jede einzelne Kombinationsmöglichkeit zu berücksichtigen. Das Ergebnis dieser Methode ist für die Maßnahmen 2 bis 14 in der nachfolgenden Tabelle 8 festgehalten.

Tabelle 8: Zuordnung von Antworten und Maßnahmen

Antworten	Zugeordnete Maßnahmen
$3^2 + 12^1$ (*); 18^1 ; 28^1	3
12^2 ; $12^2 + 7^1$; 24^4 ; 30^2 ; 30^3	4
6^2 (\ 5^4); $13^1 + 17^1$; 14^1 ; 15^1 ; 20^2 (\ 19^4); 22^2 ; 22^3 ; $22^4 + 12^1$; $22^5 + 12^1$; $22^4 + 14^1$; $22^4 + 15^1$; $22^5 + 14^1$; $22^5 + 15^1$; 23^2 ; $23^2 + 20^1$; 24^2 ; 24^3 ; $25^4 + 7^1$; $18^1 + 17^1$; 18^1	5
5^4 ; $8^1 + 10^2$; $9^1 + 11^2$; 14^1 ; 15^1 ; $14^1 + 17^1$; $15^1 + 17^1$; 19^4 ; 23^2 ; $23^2 + 20^1$; 24^2 ; 24^3	6
12^2 (?); $12^2 + 7^1$; 30^2 ; 30^3	7
13^1 ; 14^1 ; 15^1 ; 16^1 ; $13^1 + 17^1$; $14^1 + 17^1$; $15^1 + 17^1$; $16^1 + 17^1$; 22^2 ; 22^3 ; 22^4 ; 22^5 ; $22^4 + 14^1$; $22^4 + 15^1$; $22^4 + 16^1$; $22^5 + 14^1$; $22^5 + 15^1$; $22^5 + 16^1$; 24^2 ; 24^3 ; $24^2 + 14^1$; $24^2 + 15^1$; $24^2 + 16^1$; $24^3 + 14^1$; $24^3 + 15^1$; $24^3 + 16^1$; 25^4 ; $25^4 + 4^1$; 25^2 ; 25^3 ; $26^2 + 4^1$; $26^3 + 4^1$; $26^4 + 4^1$; $26^5 + 4^1$; 26^3 ; 26^4 ; 26^5 ; 27^2 ; 27^3 ; 27^4 ; $27^2 + 4^1$; $27^3 + 4^1$; $27^4 + 4^1$	8
$22^4 + 12^1$ (?); $22^5 + 12^1$ (?); $22^4 + 16^1$; $22^5 + 16^1$; $22^4 + 12^1 + 16^1$; $22^5 + 12^1 + 16^1$; $22^4 + 14^1 + 12^1$; $22^4 + 15^1 + 12^1$; $22^5 + 12^1 + 14^1$; $22^5 + 12^1 + 15^1$; 23^3 ; $23^3 + 16^1$; $23^3 + 12^1$; $24^2 + 12^1$; $24^3 + 12^1$; $24^2 + 16^1$; $24^3 + 16^1$; $24^2 + 16^1 + 12^1$; $24^3 + 16^1 + 12^1$; $24^2 + 12^1 + 14^1$; $24^3 + 12^1 + 14^1$; $24^2 + 12^1 + 15^1$; $24^3 + 12^1 + 15^1$; $25^4 + 12^1 + 14^1$; $25^4 + 12^1 + 15^1$; $25^4 + 12^1 + 16^1$; $25^2 + 12^1 + 14^1$ (?); $25^2 + 12^1 + 15^1$ (?); $25^2 + 12^1 + 16^1$ (?); $25^3 + 12^1 + 14^1$ (?); $25^3 + 12^1 + 15^1$ (?); $25^3 + 12^1 + 16^1$ (?); 26^6 (?); $26^6 + 12^1 + 4^2$; 27^5 ; 28^1 ; 30^3 (?); 30^2 ; 31^3	9
$30^2 + 26^2$ (?); $30^2 + 26^3$ (?); $30^2 + 26^4$ (?); $30^2 + 26^5$ (?); $30^2 + 26^6$ (?); $30^2 + 27^2$ (?); $30^2 + 27^3$ (?); $30^2 + 27^4$ (?); $30^2 + 27^5$ (?); 28^1	10
$25^4 + 12^1$ (?); $25^4 + 12^1 + 14^1$; $25^4 + 12^1 + 15^1$; $25^4 + 12^1 + 16^1$; $25^2 + 12^1$ (?); $25^2 + 12^1 + 14^1$; $25^2 + 12^1 + 15^1$; $25^2 + 12^1 + 16^1$; $25^3 + 12^1$ (?); $25^3 + 12^1 + 14^1$; $25^3 + 12^1 + 15^1$; $25^3 + 12^1 + 16^1$; 26^6 (?); $26^6 + 12^1 + 4^2$; 27^5 ; 28^1 ; $30^2 + 26^2$; $30^2 + 26^3$; $30^2 + 26^4$; $30^2 + 26^5$; $30^2 + 26^6$; $30^2 + 27^2$; $30^2 + 27^3$; $30^2 + 27^4$; $30^2 + 27^5$; 31^2 ; 30^3	11
16^1 (?); $16^1 + 17^1$ (?); 18^1 ; $18^1 + 17^1$; $22^4 + 12^1$ (?); $22^5 + 12^1$ (?); $22^4 + 12^1 + 14^1$ (?); $22^5 + 12^1 + 14^1$ (?); $22^4 + 12^1 + 15^1$ (?); $22^5 + 12^1 + 15^1$ (?); $22^4 + 12^1 + 16^1$; $22^5 + 12^1 + 16^1$; 23^3 ; $23^3 + 16^1$; $23^3 + 12^1$; $24^2 + 12^1$; $24^3 + 12^1$; $24^2 + 12^1 + 14^1$; $24^3 + 12^1 + 14^1$; $24^2 + 12^1 + 15^1$; $24^3 + 12^1 + 15^1$; $24^2 + 12^1 + 16^1$; $24^3 + 12^1 + 16^1$; 32^1	12
16^1 (?); $16^1 + 17^1$ (?); 18^1 (?); $18^1 + 17^1$; $22^4 + 12^1$ (?); $22^5 + 12^1$ (?); $22^4 + 12^1 + 14^1$ (?); $22^5 + 12^1 + 14^1$ (?); $22^4 + 12^1 + 15^1$ (?); $22^5 + 12^1 + 15^1$ (?); $22^4 + 12^1 + 16^1$; $22^5 + 12^1 + 16^1$; $23^3 + 16^1$; $23^3 + 12^1$; $24^2 + 12^1$; $24^3 + 12^1$; $24^2 + 12^1 + 14^1$; $24^3 + 12^1 + 14^1$; $24^2 + 12^1 + 15^1$; $24^3 + 12^1 + 15^1$; $24^2 + 12^1 + 16^1$; $24^3 + 12^1 + 16^1$; $25^4 + 12^1 + 14^1$; $25^4 + 12^1 + 15^1$; $25^4 + 12^1 + 16^1$; $25^2 + 12^1 + 14^1$ (?); $25^2 + 12^1 + 15^1$ (?); $25^2 + 12^1 + 16^1$ (?); $25^3 + 12^1 + 14^1$ (?); $25^3 + 12^1 + 15^1$ (?); $25^3 + 12^1 + 16^1$ (?); $26^6 + 14^1$ (?); $26^6 + 15^1$ (?); $26^6 + 16^1$ (?); $27^5 + 14^1$ (?); $27^5 + 15^1$ (?); $27^5 + 16^1$ (?); 31^3 (?)	13
29^1	14
Legende: 5^4 → Basis entspricht der Fragennummer, Exponent der gewählten Antwort (in der entsprechenden Tabelle von oben nach unten gezählt) (?) → eventuell kommt diese Maßnahme in Frage (\...) → ohne diese Antwort (*) → bei Sandführung	

Maßnahme 2 wird vorgeschlagen, wenn es nur geringe Auffälligkeiten, Maßnahme 1, wenn es keine Auffälligkeiten gibt. Dies betrifft sowohl die verschiedenen Untersuchungen des Brunnens als auch die Einschätzung der Zeitbeständigkeit. Eine Aufgabe des Brunnens kommt nur bei mehreren festgestellten „k.o.-Kriterien“ in Frage. Dies ist der Fall, wenn die Zeitbeständigkeit des Brunnens als kritisch eingeschätzt wird und aus den Bereichen Hydrochemie (Fragen 16 und 18, Zusatzfrage 17), Sperrrohr (Fragen 22 - 24), Brunnenbohrung (Fragen 25 - 27, Zusatzfrage 29), kritische Einschätzung der Situation (Frage 7), Absandung bzw. Auflandung (Fragen 28 und 30) und Trübe (Frage 31) mindestens fünf Punkte zutreffen, wobei aus jedem Bereich maximal ein Punkt gewertet wird, es sei denn, die Zusatzfrage ist ebenfalls mit „Ja“ beantwortet, was diesem Bereich zwei Punkte ermöglicht.

Dieses Verfahren soll sicherstellen, dass in fast allen Bereichen des Brunnens kritische Auffälligkeiten vorhanden sind, die in ihrer Masse den Weiterbetrieb erheblich behindern können.

Die in obiger Tabelle abgebildeten und die danach beschriebenen Zuordnungen besitzen je nach Maßnahme unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten, welche über die Formulierung der entsprechenden Empfehlung ausgedrückt werden.

Umgang mit Verstärkungen/Bestätigungen sowie widersprüchlichen Antworten/Zuordnungen

In der obigen Tabelle existieren bei der ersten Betrachtung auch einige scheinbare Ungereimtheiten. So steht beispielsweise als Begründung für Maßnahme 12 einmal die starke und gut erkennbare Hinterströmung allein (23^3), dann aber auch noch in Zusammenhang mit der erhöhten Ergiebigkeit ($23^3 + 12^1$) oder mit festgestellten anthropogenen Substanzen im Brunnenwasser ($23^3 + 16^1$). Wozu diese beiden letzten Gegebenheiten noch aufführen, wenn doch bereits die Sperrrohrhinterströmung für sich diese Handlungsempfehlung rechtfertigt? - Der aus der Tabelle nicht feststellbare Unterschied schlägt sich in der Empfehlungsformulierung nieder. In diesem Fall haben die Ergiebigkeitserhöhung oder das Auftreten anthropogener Substanzen verstärkende Wirkung. Sie bestätigen die Vermutung einer Reparatur des Sperrrohres und erhöhen damit die Wahrscheinlichkeit dieser Maßnahme, d. h. es kann durch diese Verstärkung bzw. Bestätigung mit größerer Sicherheit angenommen werden, dass die Auffälligkeiten mit dieser Maßnahme behoben werden können.

Nicht alle dieser Verstärkungen sind in der Tabelle abgebildet. Einige Antworten dienen eher zur Überprüfung einer fundierten Ausgangssituation. Ist diese nicht vorhanden, so haben die zu treffenden Einschätzungen eher zweifelhafte Aussagekraft. Diese Fragen können also je nach Antwort die Handlungsempfehlung bestätigen, manchmal gar verstärken oder aber abschwächen. Diese Funktion wird meist textlich in der Auswertung erwähnt und kann dem Anwender helfen, sich ein Bild der herrschenden Situation zu machen. Beispiele für solche Bestätigungen sind die Fragen zum Schichtenaufbau zur Überprüfung der Aussage zum Grundwasserleiter oder die Fragen zu den Pumpversuchen zur Sicherung der Angaben über die Ergiebigkeitsänderung.

Der Umgang mit Verstärkungen und Bestätigungen schlägt sich also vor allem in der Formulierung der Handlungsempfehlung nieder, indem eine Maßnahme mit größerer Wahrscheinlichkeit zum Erfolg führen kann. Es heißt dann z. B. nicht mehr „eventuell könnte diese Maßnahme den gewünschten Erfolg erzielen“ sondern „wahrscheinlich (oder sogar sehr wahrscheinlich) ist diese Maßnahme angebracht“.

Bei der Beantwortung der Fragen kann es auch passieren, dass der Anwender widersprüchliche Antworten angibt. Dies führt dann in der Auswertung zu gegensätzlichen Aussagen, da z. B. einerseits die Situation kritisch eingeschätzt wird, andererseits jedoch völlig unbedenklich ist. Dies kann schnell zur Verwirrung oder gar zu Unverständnis führen. Um diese Situation zu vermeiden, soll versucht werden, widersprüchliche Angaben schon gleich bei der Beantwortung der Fragen auszuschließen, d. h. sobald eine Antwort gegeben wird, die zu einem Widerspruch mit einer vorherigen Antwort führt, soll diese Antwort gesperrt werden. Um dies zu realisieren, müssen die konträren Antworten herausgefiltert werden. Es werden also Fragen gesucht, deren Antworten voneinander abhängen oder aufeinander aufbauen.

Wenn keine TV-Befahrung stattgefunden hat (Antwort 5^4), kann der Fragebogen zur detaillierten Ergebnisabfrage Brunnen-TV (Fragen 22 - 32) nicht beantwortet werden. Ebenso können die Antworten zu den Fragen 6 und 7 sowie den Fragen zur Wiederholungsuntersuchung (Frage 34) und zur Veränderung zwischen den letzten beiden Untersuchungen (Frage 37) nur „Nein“ lauten. Dies bedeutet auch, dass keine Untersuchung gemacht wurde (Antwort 36^4). Ähnlich verhält es sich bei nicht stattgefundener geophysikalischer Untersuchungskampagne (Antwort 19^4). Auch hier sind die Antworten der Fragen 20 (gewünschter Standard), 21 (Korrelation zu anderen Resultaten) und 35 (Wiederholungsuntersuchung) mit „Nein“ vorgegeben. - Die Grenzwerte der Trinkwasserverordnung (Antwort 17^1) können nur überschritten werden, wenn auch auffällige hydrochemische Charakteristika („Ja“ bei den Fragen 13 - 16 und 18) vorhanden sind. - Ebenso kann nur eine starke und gut erkennbare Sperrrohrhinterströmung (Antwort 24^3) festgestellt werden, wenn zumindest eine eindeutige Sperrrohrfußkaverne (Antwort 22^{3-5}) existiert.

Außerdem kann Frage 33 (subjektive Einschätzung der Alterungserscheinungen) zu Widersprüchen führen. Denn sollen die Erscheinungen nur bei genauer Betrachtung erkennbar sein (Antwort 33^3), darf auch keine Auffälligkeit bei der detaillierten Brunnen-TV Untersuchung angegeben sein (Fragen

22 - 32), zusätzlich ist die Antwort 37¹ (starke Veränderung zwischen Untersuchungen) auszuschließen. Werden die Alterungserscheinungen jedoch als extrem auffällig und stark, vermutlich auch folgebefahft angesehen, so muss dies auch aus der detaillierten Brunnen-TV Befragung ersichtlich sein (mindestens eine der Fragen 22 - 32 mit „Ja“ bzw. mit entsprechender Auffälligkeit beantwortet).

Die Antworten der Fragen 34 (Wiederholungsuntersuchung), 36 (zeitlicher Abstand der Untersuchungen) und 37 (starke Veränderung zwischen Untersuchungen) sind eng miteinander verknüpft. Ein „Nein“ bei Frage 34 legt zwar schon die Antworten von 36 und 37 fest. Es muss aber immer überprüft werden, ob die Antworten zueinander passen. Denn auf Antwort 37¹ kann nicht 34² folgen, falls die Fragen nicht der Reihe nach beantwortet werden. - Auch Frage 38 (Korrelation der Veränderungen mit Hydraulik oder Hydrochemie) baut auf mehreren Fragen auf: Zunächst muss es überhaupt Veränderungen geben (37¹), zusätzlich muss sich jedoch entweder die Brunnenhydraulik verändert haben (12¹ oder 12²) oder es müssen hydrochemische Auffälligkeiten vorhanden sein (13 - 18 nicht alle mit Antwort „Nein“), sonst kann diese Frage nicht mit „Ja“ beantwortet werden. - Zuletzt ist die Antwort 39¹ (kritischere Situation als bei anderen Brunnen) davon abhängig, dass auch Alterserscheinungen zumindest deutlich ersichtlich sind (33¹ oder 33²).