

Analyse bestehender Grundwassermessstellennetze im Festgestein und qualitätssichernde Maßnahmen

*M.Sc. RWTH Hannah Hinckel, Dipl. Geol. Dr. rer. nat. Michael Altenbockum,
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Thomas R. Rüde, Aachen*

Inhaltübersicht

		Rdnr.
1	Einleitung	1, 2
2	Vorgehensweise	3 – 12
3	Bisher publizierte Methoden zur Optimierung eines Messstellennetzes im Kluftgrundwasserleiter	13 – 17
4	Methoden zur Überprüfung eines bestehenden Messstellennetzes	18 – 21
5	Analyse der Messstellenverteilung	22 – 24
6	Praxisbeispiel an einem Altstandort	25 – 63
6.1	Geologische Standortssituation	25 – 43
6.1.1	Erkenntnisse aus der Literatur – allgemeine Geologie	27 – 32
6.1.2	Geologische Kartierung	33 – 37
6.1.3	Auswertung bestehender Bohrkernansprachen	38 – 43
6.2	Überprüfung des bestehenden Messstellennetzes	44 – 56
6.2.1	Recherche aus Altgutachten	46 – 51
6.2.2	Vor-Ort Überprüfung der Messstellen	52 – 56
6.3	Analyse der Messstellenverteilung	57 – 63
7	Qualitätssichernde Maßnahmen	64 – 75
8	Ableitung einer schematischen Vorgehensweise zur Analyse und Optimierung eines bestehenden Messstellennetzes	76, 77
9	Fazit	78 – 86
10	Literaturverzeichnis	

Schlagwortübersicht nach Rdnr.

Festgestein 1, 7, 12, 14, 74, 78 f., 86	Kluftgrundwasserleiter 1, 13, 15 f., 72,
Grundwassermessstellennetz 1, 8 – 10,	75, 78, 82
14, 44, 79, 83 – 86	

1 Einleitung

- 1 Für die Analyse und Plausibilitätsprüfung eines bestehenden Grundwassermessstellennetzes im Festgestein ist derzeit keine allgemeingültige Vorgehensweise bekannt. Es gibt verschiedene Ansätze zur Überprüfung der Abbildbarkeit eines Schadensfalls anhand der bestehenden Grundwassermessstellen, wobei diese Ansätze nicht speziell für einen Kluftaquifer entwickelt wurden und sich oftmals nicht auf einen solchen übertragen lassen. So haben die geologischen Eigenschaften des Untergrundes bei vielen dieser Methoden keinen Einfluss, wobei die Ausbreitung des Trennflächengefüges, die Kluftöffnung und deren Wasserwegsamkeit eine entscheidende Rolle bei der Schadstoffausbreitung in einem Kluftgrundwasserleiter spielen. Neben den chemischen und physikalischen Eigenschaften des Schadstoffes stellen demnach die geologischen und hydrogeologischen Untergrundgegebenheiten einen wichtigen Faktor bei der Beurteilung der Qualität eines bestehenden Messstellennetzes im Festgestein dar.
- 2 Im Rahmen einer Masterarbeit [1] wurden diese Einflussfaktoren auf die Qualität und Plausibilität eines Grundwassermessstellennetzes anhand eines Altstandortes untersucht. Daraus wurde ein Schema zur Vorgehensweise bei der Überprüfung eines bestehenden Messstellennetzes im Kluftgestein abgeleitet, welches sich auch an anderen Standorten anwenden lässt. Im Folgenden sind die wichtigsten Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst.

2 Vorgehensweise

- 3 Durch Langguth & Voigt [2] wurden bereits einige Aspekte zur Überprüfung eines bestehenden Messstellennetzes beschrieben. Diese sind allerdings allgemeingültig und nicht explizit für einen Festgesteinsaquifer entwickelt. Hier werden die Aktenrecherche sowie die Überprüfung mittels geophysikalischer Bohrlochverfahren genannt.
- 4 Insbesondere für einen Kluftaquifer benötigt das genannte Schema jedoch noch Ergänzungen. Nach Langguth & Voigt sind zwingend erforderliche Unterlagen Schichtenverzeichnisse, Ausbaudokumentationen und hydrochemische Analysen, ohne die eine Plausibilitätsprüfung eines Messstellennetzes nicht möglich ist. Fehlen diese Unterlagen ist es möglich zumindest den Ausbau der Grundwassermessstelle mittels geophysikalischer Bohrlochmessungen zu ermitteln.
- 5 Ein wichtiger Bestandteil bei der Überprüfung eines Messstellennetzes ist daher die Aktensichtung, um einen Überblick über die vorhandenen Daten zu bekommen und bereits mögliche Defizite ableiten zu können, an die das

weitere Vorgehen angepasst werden muss. Nach der Aktenrecherche, bei welcher bereits erste Unstimmigkeiten auffallen können, ist eine Überprüfung der einzelnen Grundwassermessstellen vor Ort notwendig. Hierdurch können erste Mängel an den Messstellen identifiziert werden. Nicht nur offensichtliche Defekte fallen hierbei auf, es können auch erste Aussagen über eine mögliche Verschlammung der Grundwassermessstellen getroffen werden.

Nach der Defizitanalyse aus der Aktenrecherche und der Vor-Ort Überprüfung der Grundwassermessstellen können die Maßnahmen für das weitere Vorgehen abgeleitet werden. In ausgewählten Grundwassermessstellen sind geophysikalische Bohrlochverfahren hilfreich, um den Ausbau der Messstelle zu überprüfen oder mögliche Zuflusszonen zu identifizieren. Durch diese Maßnahmen werden zusätzliche Informationen über die Grundwassermessstellen generiert. 6

Im Festgestein spielt zudem die geologische Erkundung eine wesentliche Rolle. Das Messstellennetz muss an den vorherrschenden Kluftrichtungen ausgerichtet sein, da sonst kein repräsentatives Abbild der vorherrschenden Grundwasserverhältnisse vorliegt. Dafür spielt die geologische Kartierung, das Erstellen von Profilschnitten und, bei schwierigen geologischen Verhältnissen, das Erstellen eines dreidimensionalen strukturgeologischen Modells zum besseren Verständnis des Untergrundes eine wichtige Rolle. Erst nach Abschluss einer umfangreichen geologischen Erkundung kann eine qualitative Aussage über die Plausibilität und Eignung des Messstellennetzes für eine Grundwassersanierung getroffen werden. Dabei ist es wichtig beurteilen zu können, ob die Grundwassermessstellen auf vorhandene Klüfte und somit die Hauptwasserwege treffen, oder nur das Porenwasser repräsentieren. Falls die Grundwassermessstellen in keiner Weise an den vorherrschenden Klüften angeordnet sind, ist ein Neubau ausgewählter Grundwassermessstellen erforderlich, die dann das Kluftsystem widerspiegeln. 7

In der bereits erwähnten durch Langguth & Voigt [2] genannten Vorgehensweise wird zudem nicht auf eine mögliche Kontamination des Grundwassers eingegangen. Bei einem Altstandort sollten jedoch Art und Eigenschaften des vorliegenden Schadstoffes bei der Beurteilung des Grundwassermessstellennetzes berücksichtigt werden. Es hat einen Einfluss auf den Ausbau der Grundwassermessstellen, ob der Schadstoff gelöst oder in Phase vorliegt und welche Dichte dieser aufweist, da dies den zu betrachtenden und untersuchenden Bereich des Aquifers beeinflussen kann. 8

Bei dem in Kap. 6 als Praxisbeispiel betrachteten Schadensfall handelt es sich um eine LCKW Kontamination. Die meisten auf dem Standort vorhan- 9

denen LCKW, außer Vinylchlorid, weisen eine höhere Dichte als Wasser auf. Deshalb sind diese als DNAPL (dense non aqueous phase liquid) zu bezeichnen. Diese Verbindungen neigen aufgrund ihrer Dichte dazu als separate Phase durch den Grundwasserkörper abzusinken, bis sie beim Erreichen einer geringer durchlässigen Schicht Pools ausbilden oder bis sie ihre Residualsättigung erreicht haben. Des Weiteren haben diese Stoffe eine geringe Grenzflächenspannung zu Wasser, wodurch sie relativ leicht in mit Wasser benetzte Porenräume eindringen können. Diese Eigenschaften führen dazu, dass sich LCKW in Abhängigkeit der Heterogenität des Untergrundes sowohl als Phase horizontal und vertikal ausbreiten können als auch gelöst und gasförmig eine hohe Mobilität aufweisen [3]. Aufgrund dieses Ausbreitungsverhaltens ist es wichtig die vorliegende Form des Schadstoffes zu untersuchen, da diese auch einen Einfluss auf die Qualität und Verwendbarkeit des vorhandenen Grundwassermessstellennetzes hat. Liegt der Schadstoff als Phase vor und die Ausbildung eines Pools am Grund des Aquifers ist wahrscheinlich, so werden Grundwassermessstellen benötigt, die auch diesen Teil des Grundwasserleiters abbilden. Wohingegen ein gasförmiges oder gelöstes Auftreten zunächst keine Notwendigkeit für die gezielte Untersuchung des tiefen Bereichs des Aquifers und der Sohle darstellt.

- 10 Die wichtigsten Aspekte bei der Analyse und Plausibilitätsprüfung eines Grundwassermessstellennetzes lassen sich folgendermaßen zusammenfassen
- 11
 - Aktenrecherche
 - Vor-Ort Überprüfung der Messstellen
 - Geologische und hydrogeologische Erkundung
 - Untersuchung und Analyse des Schadstoffes
 - Analyse der Messstellenverteilung
- 12 Diese Aspekte werden bei der beschriebenen Vorgehensweise von Langguth & Voigt [2] ergänzt und anhand eines Praxisbeispiels überprüft. Abschließend wird aus dem Vorgehen und den gewonnenen Erkenntnissen bei der Analyse und Plausibilitätsprüfung dieses Grundwassermessstellennetzes ein allgemeingültiges Schema für ein Messstellennetz im Festgestein abgeleitet.

3 Bisher publizierte Methoden zur Optimierung eines Messstellennetzes im Klufftgrundwasserleiter

- 13 In der Literatur lassen sich zahlreiche Artikel zu unterschiedlichen Verfahren der Optimierung eines bestehenden Messstellennetzes finden. Diese

vorhandenen Ansätze lassen sich jedoch nicht direkt auf einen Kluftgrundwasserleiter anwenden.

Die meisten dieser Verfahren nutzen die gleichmäßige Ausbreitung des Schadstoffes im Untergrund als Grundlage für eine Modellierung. Die Analyse des Messstellennetzes erfolgt anhand der Ausbreitung der Schadstofffahne und deren Abbildbarkeit durch eine Modellierung mit den vorhandenen Messstellen. Auch wenn dies nicht explizit erwähnt wird, sind diese Methoden nur auf einen Porengrundwasserleiter anwendbar. In einem Kluftaquifer sind die Anzahl der Klüfte, die Öffnungsweite und deren Wasserwegsamkeit entscheidend, wobei diese Parameter bei den bisherigen Ansätzen keinen Einfluss haben. Für die Analyse und Plausibilitätsprüfung eines Grundwassermessstellennetzes im Festgestein ist eine Vorgehensweise notwendig, die auch den geologischen Aufbau des Untergrundes berücksichtigt, da dieser eine entscheidende Rolle in einem geklüfteten Aquifer spielt. 14

Auch durch Nativ et al. [4] wird die Heterogenität des Gesteines als eine der größten Herausforderungen im Kluftgestein beschrieben. Die geringe Durchlässigkeit der Matrix und die Klüfte, die den präferentiellen Fließweg darstellen, erfordern eine andere Anordnung der Messstellen im Kluft- als im Porengrundwasserleiter. Während im Porengrundwasserleiter die Messstellen entlang des hydraulischen Gradienten angeordnet werden, ist im Kluftgrundwasserleiter eine kluftorientierte Anordnung erforderlich. Nur hierdurch kann ein Anschluss an die bevorzugten Fließwege gewährleistet werden, welcher notwendig ist, um die realen Untergrundverhältnisse abzubilden. Grundwassermessstellen, welche nur in der Matrix oder in Mikroklüften verfiltert sind und nur langsam vom Grundwasser gespeist werden, können schnell leer gepumpt werden und repräsentieren unter Umständen nicht den tatsächlichen Schadstoffgehalt [4]. Deshalb ist es wichtig das hydraulisch wirksame Kluftsystem zu identifizieren und die Filterstrecke an der wasserreichsten Kluft zu orientieren, sofern diese beim Bohren angetroffen wird [5]. Diese Kluftschar kann mit Hilfe eines Flowmeters identifiziert werden. 15

Nur wenige Studien haben sich explizit mit Grundwassermessstellen in Kluftaquiferen befasst. Diese Studien haben zumeist das Ziel der optimalen Orientierung bei der Neuerrichtung eines Brunnens oder einer Grundwassermessstelle und nicht der Überprüfung und Beurteilung der Qualität bereits bestehender Messstellen. Park et al. [6] haben mit ihrer semianalytischen Methode zur Ermittlung der Brunnenergibigkeit in einem Kluftgrundwasserleiter gezeigt, dass die Bestimmung des Zusammenhanges der geologischen Strukturen und des Grundwasserflusses nicht einfach ist. Hierfür sind viele Informationen über die hydraulischen Eigenschaften des 16

Aquifers und die Strömungsvorgänge notwendig. In den meisten realen Fällen sind nicht alle hydraulischen Parameter bekannt, weshalb sich diese Methode nur selten anwenden lässt. Diese Studie zeigt, dass für eine optimale Grundwassermessstelle in einem Kluftaquifer Informationen über die Geometrie der Klüfte, die hydraulischen Eigenschaften der Klüfte und der porösen Matrix sowie die Richtung des Grundwasserzuflusses bekannt sein müssen [6]. Für die Analyse und Beurteilung eines bestehenden Messstellennetzes sind diese Parameter ebenfalls von großer Bedeutung.

- 17 In der Praxis werden Messstellen beim Errichten optimaler Weise an bei der Bohrung angetroffene Klüfte orientiert. Bei der Analyse eines bestehenden Messstellennetzes lässt sich diese Methode jedoch nicht anwenden und ist ohne detaillierte Dokumentation schwer nachzuverfolgen. Die Zuflusszonen innerhalb des Filterbereiches der Messstelle lassen sich nachträglich allerdings mit einem Flowmeter bestimmen.

4 Methoden zur Überprüfung eines bestehenden Messstellennetzes

- 18 Bei der Übernahme von Projekten mit laufenden Sanierungsmaßnahmen oder der Verwendung schon bestehender Grundwassermessstellen für ein neues Projekt bedarf es einer genauen Qualitäts- und Plausibilitätsprüfung der Messstellen auf die Eignung im Rahmen der (neuen) Fragestellung. Für diese Prüfung sind die Daten aus Altgutachten zu ermitteln, evaluieren und validieren. In einem ersten Schritt können dann unter Umständen bereits einige Grundwassermessstellen aufgrund ihrer Lage oder bereits bekannter Mängel für das weitere Vorgehen ausgeschlossen werden.
- 19 Anschließend erfolgt eine Überprüfung der für das Vorhaben relevanten Grundwassermessstellen im Gelände. Bei dieser Vor-Ort-Überprüfung des Messstellennetzes werden die verbleibenden Grundwassermessstellen auf äußere Defekte, Unstimmigkeiten in den ermittelten Daten und notwendige Reparatur- und Regenerierungsmaßnahmen untersucht. Nachfolgend ist ein kurzes Schema für das Vorgehen im Gelände aufgeführt.
- 20
- Sichtprüfung
 - Entspricht die aus den Altgutachten ermittelte Lage der tatsächlichen?
 - Neuvermessung erforderlich?
 - Bestimmung der Endteufe mittels Teufenlot
 - Bei Differenz der Soll- und Ist-Teufe mögliche Ursachen ermitteln
 - Schlammrückstände am Lot?
 - ist eine mögliche Kürzung der Messstelle oder dergleichen denkbar?

Hierdurch werden mittels einfacher Methoden im Gelände Grundwassermessstellen ausgeschlossen, die nicht den Qualitätsansprüchen für das weitere Vorgehen entsprechen. Die verbleibenden Messstellen, welche keine Mängel aufweisen oder durch einfache Maßnahmen wieder Instand gesetzt werden können, werden anschließend bezüglich ihrer Verteilung und der Abbildung der hydraulischen Situation im gesamten Untersuchungsgebiet analysiert. Durch diese Vorgehensweise wird die Anzahl der Grundwassermessstellen, die für eine geplante Sanierungsmaßnahme in Betracht gezogen werden können allmählich angepasst, wodurch anschließend ein qualitätsgesichertes Messstellennetz für die weitere Projektarbeit entsteht. 21

5 Analyse der Messstellenverteilung

Bei der Verwendung eines Messstellennetzes im Kluftgestein ist es, wie auch im Porengrundwasserleiter, wichtig, dass alle relevanten geologischen Einheiten in ausreichendem Maße abgebildet werden. Eine Besonderheit stellt hier jedoch die Klüftung des Gesteins dar. Die Messstellen müssen nicht nur im entsprechenden geologischen Horizont verfiltert sein, sondern auch eine Anbindung an das Kluftnetz aufweisen, um die Verhältnisse im Untergrund realitätsnah abbilden zu können. Deshalb ist eine geologische Erkundung des Untersuchungsgebietes vor der Überprüfung und Beurteilung des Messstellennetzes unabdingbar. Je nach Komplexität der Standortgeologie und der Qualität bereits vorliegender Unterlagen können eine geologische Kartierung und das Erstellen von Profilschnitten notwendig sein. 22

Für die Beurteilung des Messstellennetzes bei einer geplanten oder bereits bestehenden Sanierungsmaßnahme ist es wichtig eine Idee des Ausmaßes des Schadensfalles zu haben. Ohne die Kenntnis in welche geologischen Schichten der Schadstoff vorgedrungen ist und welche chemisch-physikalischen Eigenschaften dieser aufweist, ist eine Beurteilung des Messstellennetzes nur schwer möglich. So ist beispielsweise bei einem Schadstoff mit einer höheren Dichte als Wasser, welcher sich an der Basis des Aquifers anreichert, die Notwendigkeit von Grundwassermessstellen mit einer Filterstrecke im tieferen Bereich des Aquifers weitaus höher als bei einem Schadstoff der dazu neigt auf dem Grundwasser aufzuschwimmen. Je nach geologischen Gegebenheiten und Schadstoffeigenschaften werden also unterschiedliche Anforderungen an das Messstellennetz gestellt. 23

Für den Einzelfall muss dementsprechend geprüft werden, ob die für die weitere Projektarbeit verwendbaren Grundwassermessstellen geeignet sind sowohl die hydraulische Situation als auch das Ausbreitungsverhalten des Schadstoffes realistisch abzubilden. Sollte dies nicht der Fall sein, ist eine gezielte Erweiterung des Messstellennetzes in Erwägung zu ziehen. 24

6 Praxisbeispiel an einem Altstandort

6.1 Geologische Standortsituation

- 25 Zur Ableitung und Überprüfung einer allgemeinen Vorgehensweise zur Plausibilitätsprüfung eines bestehenden Messstellennetzes im Kluftgestein wurde ein Altstandort in Rheinland-Pfalz gewählt.
- 26 Zur Erkundung der geologischen Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Oftmals können schon viele detaillierte Informationen aus vorhandener Literatur gewonnen werden. Die dabei errungenen Erkenntnisse über das vorhandene Kluftsystem (Einfallsrichtung, Kluftöffnung, Häufigkeit der Klüfte etc.) müssen jedoch für das im Speziellen betrachtete Untersuchungsgebiet überprüft werden. Hierfür stellt die geologische Kartierung, neben der Auswertung vorhandener Bohrkernansprachen, eine gute Möglichkeit dar, um die geologischen und strukturgeologischen Standortgegebenheiten genauer betrachten zu können.

6.1.1 Erkenntnisse aus der Literatur – allgemeine Geologie

- 27 Im Untersuchungsgebiet sind größtenteils triassische Gesteine des Unteren Buntsandsteins aufgeschlossen, deren Differenzierung in Obere und Untere Trifels-Schichten erfolgt. Im nördlichen Teil des Standortes treten auch ältere, permische Gesteine an die Oberfläche. Teilweise werden die Gesteine durch pleistozäne Löß-Ablagerungen überdeckt. Die Schichten des Buntsandsteins können, durch Verwerfungen bedingt, lokal mehr oder weniger stark gestört sein. Die ältesten Ablagerungen im Untersuchungsgebiet sind aus dem Zechstein (Perm).
- 28 Die Pfalz kann paläogeographisch betrachtet als Randsaum des Zechstein-Beckens betrachtet werden. Hierbei dominieren Flussablagerungen, da es nur bei globalen Meeresspiegelhöchstständen zur Ablagerung deutlich mariner, fossilführender Sedimente in der südlichen Pfalz kam [7]. Im Norden der Pfalz werden diese Ereignisse durch eine Winkeldiskordanz zwischen Rotliegend und der Basis des Zechsteins abgebildet. Nach Nordwesten und Westen hin werden immer ältere Gesteine des Rotliegend von den Stauf-Schichten überlagert.
- 29 Das heutige Verbreitungsmuster der Stauf-Schichten stellt nur eine Erosionsgrenze dar, da diese diskordante Überlagerung ursprünglich auch nach Norden hin vorhanden war [8]. Dementsprechend stark variiert auch die Mächtigkeit dieser Schichtpakete. In der Literatur sind Mächtigkeiten zwischen 70 m und 155,4 m dokumentiert. Dieses Verteilungsmuster macht synsedimentäre Bewegungen sehr wahrscheinlich und legt die Existenz

mehrerer, durch nordwest-südost streichender Querstörungen voneinander abgegrenzter, Einzelschollen nahe [7]. Die starke Variation der Mächtigkeitangaben in der Literatur zeigt die Wichtigkeit der genauen Betrachtung der geologischen Verhältnisse am Standort, da sonst keine Analyse der Grundwassermessstellenverteilung möglich ist.

Die Abfolge der Stauf-Schichten lässt sich lithostratigraphisch in Obere und Untere Stauf-Schichten gliedern. Die Unteren Stauf-Schichten werden an der Basis aus dem sogenannten „Grundkonglomerat“ gebildet. Dies sind mehrere 10er Meter mächtige Sandsteine, die mit Rötelschiefer-Tonstein Geröllern durchsetzt sind [7]. Auf diesen Basisbereich folgen intensiv rötlich gefärbte Fein- bis Mittelsandsteine, die lagenweise auch grobsandig sind. Diese „Formsande“ weisen kaum Geröllstücke auf, sind relativ homogen und haben einen hohen Schluffanteil. Zudem ist eine geringe Verbandsfestigkeit charakteristisch für diese massiv erscheinenden Sandsteine [8]. Diese „Formsande“ treten sowohl am Top der Oberen als auch der Unteren Stauf-Schichten auf. Zum Liegenden hin sind jeweils zunehmend Konglomerate anzutreffen. Die Oberen Stauf-Schichten überlagern die Unteren diskordant [8]. Die Mächtigkeiten der Stauf-Schichten variieren sehr stark. Die Gesamtmächtigkeiten liegen zwischen 70 m und 270 m [8].

Die rein fluviatil entstandenen Trifels-Schichten sind teilweise geröllführende Mittel- bis Grobsandsteine mit einem kieseligen Bindemittel [8]. Am Standort lassen sich die Trifels-Schichten lokal in die Oberen und Unteren Trifels-Schichten unterteilen. Die Trennung erfolgt anhand einer wenige Dezimeter mächtigen, nicht flächig ausgebildeten Tonschicht. Diese wird als Zwischenschicht bezeichnet und konnte in einigen Kernbohrungen identifiziert werden. Diese geringer durchlässige Schicht kann je nach Ausbildung einen entscheidenden Einfluss auf die hydraulischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet haben.

Für die Unteren Trifels-Schichten sind dünnplattig bis feinschichtig ausgebildete, tonig-schluffige Sande mit einzelnen Gerölllagen charakteristisch. Die auflagernden Oberen Trifels-Schichten sind mehrere Meter mächtig und durch kompakte, schräggeschichtete, teilweise geröllführende Sandsteine charakterisiert. Die Gesamtmächtigkeit der Trifels-Schichten variiert sehr stark, mit einer maximalen Mächtigkeit von etwa 150 m und einer generellen Zunahme der Mächtigkeit nach Südosten hin [8].

6.1.2 Geologische Kartierung

Im Rahmen der geologischen Kartierung wurden an insgesamt sieben Aufschlüssen strukturgeologische Daten erhoben. In **Abb. 1** sind die Kluffrosen

der Streichrichtungen dieser Aufschlüsse auf der geologischen Karte des Untersuchungsgebietes dargestellt. Bei genauer Betrachtung dieser Karte fällt schnell auf, dass die meisten Kluftrichtungen dieselbe Orientierung wie die Störungen in diesem Gebiet aufweisen, oder beinahe senkrecht zu diesen verlaufen.

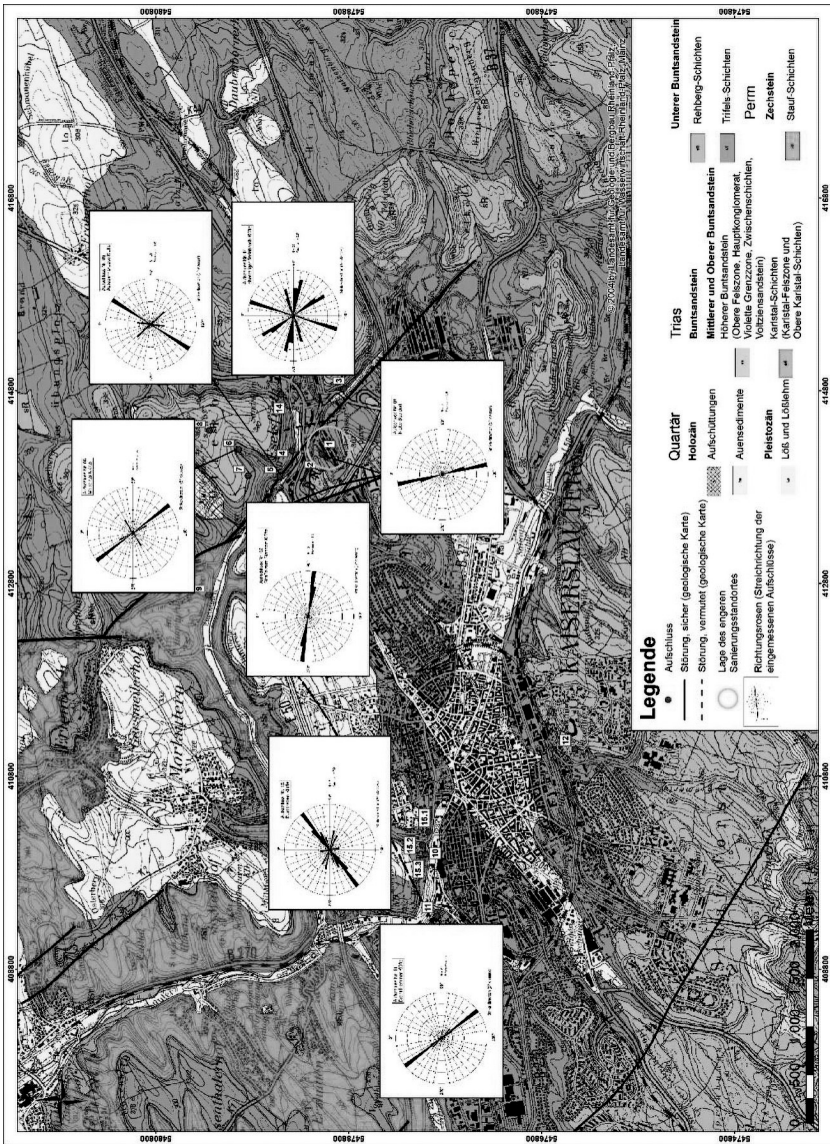
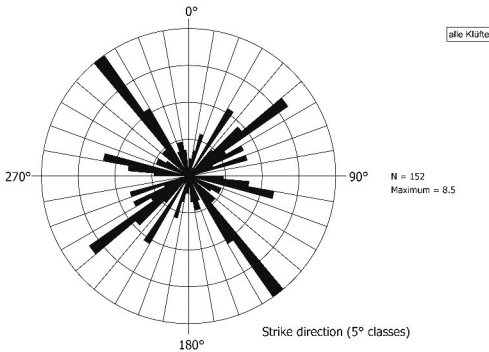


Abb. 1: Geologische Karte mit Kluffrosen der Streichrichtungen [1]

- 35 In der Gesamtbetrachtung der Streichrichtungen aller Klüfte in **Abb. 2** wird deutlich, dass es viele verschiedene auftretende Kluftrichtungen gibt. Von den insgesamt neun auftretenden Richtungen treten allerdings zwei deutlich hervor.



36 **Abb. 2:** Kluftrose der Streichrichtung aller Klüfte [1]

- 37 Die herzynisch (NW-SE) streichende Kluftrichtung ist sehr deutlich ausgeprägt und in beinahe jedem Aufschluss vorzufinden. Des Weiteren tritt die SW-NE streichende Richtung der Oberoligozänen Kompressionsrichtung, welche senkrecht zu der herzynischen Richtung steht, deutlich hervor. Diese beiden Kluftrichtungen bilden ein orthogonales Kluftsystem aus, welches auch visuell an vielen Aufschlüssen identifiziert werden kann. Zudem wird deutlich, dass sich die Kluftsysteme schichtübergreifend ausgebildet haben. So ist die herzynische Richtung sowohl in den Stauf-, als auch in den Trifels-Schichten ausgebildet. Die Kluftsysteme unterscheiden sich hierbei jedoch in ihrem Einfallswinkel, welcher in den Trifels-Schichten deutlich steiler ist.

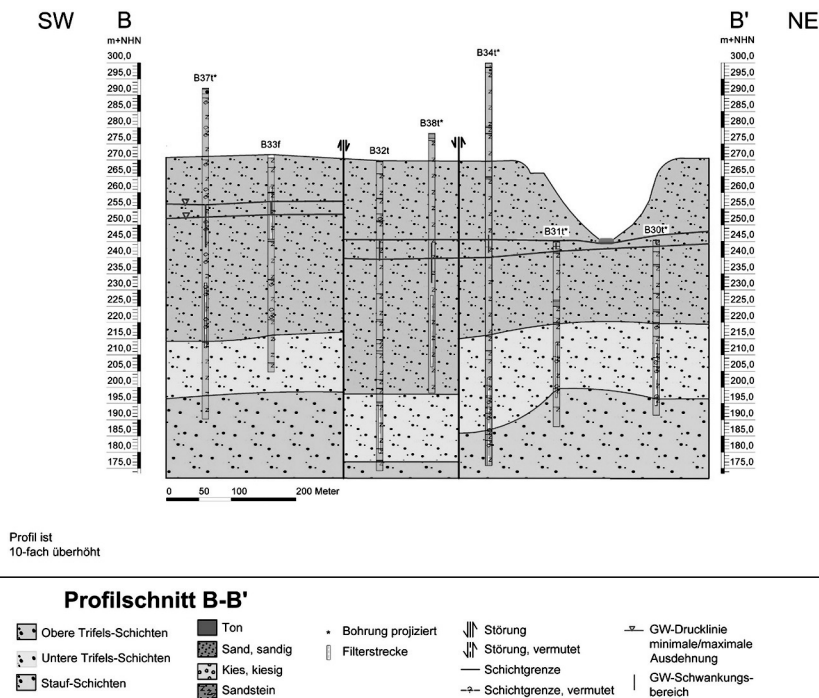
6.1.3 Auswertung bestehender Bohrkernansprachen

- 38 Die ältesten Gesteine im näheren Sanierungsgebiet sind die Stauf-Schichten. Eine Mächtigkeit von 70 m bis 95 m kann anhand der Literatur [8] nur angenommen werden, da keine der im Rahmen der Sanierungsmaßnahme abgeteufte Bohrungen die Stauf-Schichten durchteuft hat. In einigen Bohrungen im Untersuchungsgebiet wurden die oberen Stauf-Schichten angeschnitten und als dunkelroter, stark kaverner Feinsandstein angesprochen. Hierbei handelt es sich vermutlich um „Formsande“.
- 39 Ausweislich der vorliegenden Bohrkernansprachen weisen die Unteren Trifels-Schichten eine Mächtigkeit von 25 m bis 40 m am Standort auf. Die toni-

ge Zwischenschicht, die die Oberen und Unteren Trifels-Schichten voneinander abgrenzt, ist wie bereits erwähnt, nicht überall ausgebildet. In einigen Messstellen konnte diese mit einer Mächtigkeit zwischen 30 und 80 cm identifiziert werden. In den Bohrkernen wurde, wie in den Stauf-Schichten, eine kavernöse Struktur vorgefunden, jedoch ist diese nicht so stark ausgeprägt. Zudem treten vereinzelt Tonlinsen auf. Im Untersuchungsgebiet wurde eine Gesamtmächtigkeit der Trifels-Schichten von knapp 116 m dokumentiert.

40 Sofern einige Bohrungen als Kernbohrungen abgeteuft wurden, kann es zudem sinnvoll sein Profilschnitte zu erstellen. Diese vereinfachen es die geologischen Verhältnisse in Relation zu den Grundwassermessstellen und deren Filterstrecken einzuordnen. Des Weiteren können diese bei der Identifizierung von Störungen helfen und bei der Darstellung langjähriger Grundwasserstände Hinweise auf den möglichen Einfluss der Störungen auf die hydraulische Situation geben.

41 Für das Praxisbeispiel wurden solche Profilschnitte erstellt und dabei erkannt, dass eine der durch das Untersuchungsgebiet verlaufenden Störungen als hydraulische Barriere wirkt. Dies wird aus **Abb. 3** deutlich.



42 **Abb. 3:** Profilschnitt B-B' durch das Untersuchungsgebiet [1]

43 Durch das Zusammenspiel der unterschiedlichen Möglichkeiten Informationen über die geologische Situation zu gewinnen, kann abschließend ein detailliertes Bild über die Standortsituation erlangt werden. Wodurch anschließend die Bewertung und Analyse der Grundwassermessstellen hinsichtlich der Abbildbarkeit der Untergrundverhältnisse begonnen werden kann.

6.2 Überprüfung des bestehenden Messstellennetzes

44 Das Grundwassermessstellennetz im Untersuchungsgebiet ist historisch gewachsen, wodurch die Messstellen und die zugehörigen Unterlagen teilweise über 20 Jahre alt sind. Für die Plausibilitätsprüfung liegen mehrere Altgutachten vor, aus denen die Daten ermittelt, evaluiert und validiert werden müssen. In einem ersten Schritt können hierbei bereits einige Grundwasser-

messstellen aufgrund ihrer Lage für das weitere Vorgehen ausgeschlossen werden, wodurch sich die Anzahl der Grundwassermessstellen für die weitere Überprüfung reduziert.

Bei der darauf folgenden Vor-Ort-Überprüfung des Messstellennetzes werden die verbleibenden Grundwassermessstellen auf äußere Defekte, Unstimmigkeiten in den ermittelten Daten und notwendige Reparatur- und Regenerierungsmaßnahmen untersucht. Das hierfür angewendete Vorgehen wurde bereits in Kapitel 5 beschrieben.

6.2.1 Recherche aus Altgutachten

In Abb 4 sind die Messstellen in der näheren Umgebung des Standortes dargestellt.

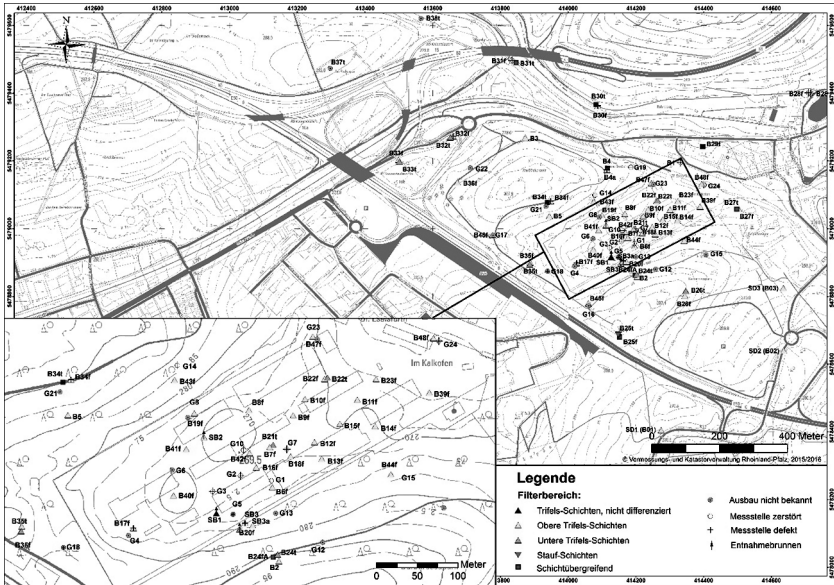
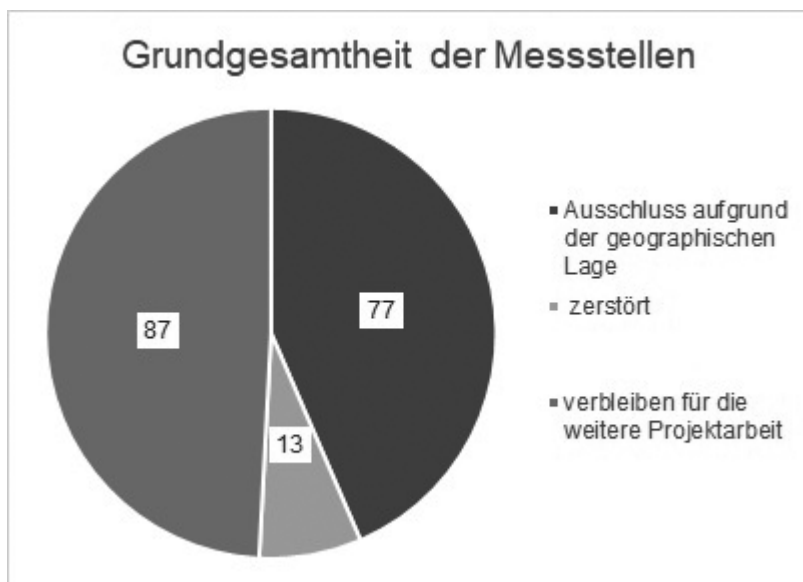


Abb. 4: Messstellenkarte [1]

Im Umfeld des Standortes gibt es insgesamt etwa 175 Grundwassermessstellen. Von diesen sind jedoch aufgrund der geographischen Lage nicht alle für die weitere Betrachtung von Relevanz. Für die Bewertung und Überprüfung des Messstellennetzes werden nur die Messstellen auf dem Standort und in der unmittelbaren Umgebung betrachtet. Hierdurch wird die Anzahl der

Messstellen auf ca. 100 Stück begrenzt, wobei bei 13 dieser Messstellen bereits aus Altgutachten bekannt ist, dass sie zerstört sind. **Abb. 5** zeigt, dass nach einer ersten Überprüfung der Lage der Grundwassermessstellen und den Informationen aus vorhandenen Unterlagen noch etwa 50 % der Grundgesamtheit für die weitere Bearbeitung verbleiben.



49 **Abb. 5:** Grundgesamtheit der Messstellen (verändert nach [1])

- 50 Des Weiteren sind nicht zu allen Messstellen Schichtenverzeichnisse und Ausbaudaten vorhanden, wodurch die spätere Analyse der Messstellenverteilung beeinflusst wird. Die Recherche bezüglich der Lage und des Ausbaus der Messstellen aus den Altgutachten ergab teilweise widersprüchliche Angaben. Aufgrund dieser Widersprüche ist es notwendig alle potenziell nutzbaren Messstellen neu zu vermessen. Für die Auswertung und Evaluation der bisher vorhandenen Daten sind die Werte der Rohr- und Geländeoberkante von größerer Bedeutung als die Rechts- und Hochwerte. Diese sind wichtig, um die Grundwassermessstellen bezüglich ihrer Filterstrecke einer stratigraphischen Einheit zuordnen zu können und somit verschiedene Klassen der Grundwassermessstellen zu bilden.
- 51 Auch die Messstellenbezeichnung, mit der Unterteilung in flache und tiefe Messstellen, ist teilweise irreführend. Die Kürzel t (tief) bzw. f (flach) am En-

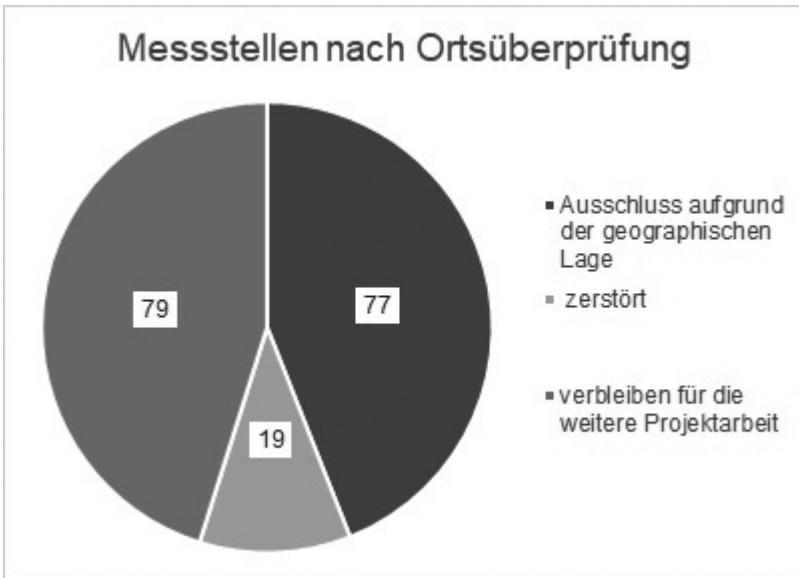
de der Messstellenbezeichnung impliziert bei den Trifels-Schichten eine Verfilterung in den Unteren bzw. Oberen Trifels-Schichten. Bei manchen Messstellen trifft dies auch zu, jedoch ist eine genaue Überprüfung der Ausbaudaten erforderlich. Hier fällt auf, dass diese Unterteilung bei manchen Messstellen irreführend ist, da diese ohne Differenzierung innerhalb der Trifels-Schichten verfiltert sind und die Endung t bzw. f eine falsche Annahme impliziert. Daher sollte, falls vorhanden, die Differenzierung der Messstellen anhand der Bezeichnung stets genauestens überprüft werden.

6.2.2 Vor-Ort Überprüfung der Messstellen

In **Abb. 4** sind alle zu betrachtenden Messstellen dargestellt. Hierbei sind defekte und zerstörte Messstellen gekennzeichnet. Zudem erfolgt eine Symbolisierung anhand der Filterstrecke, sofern Schichten- und Ausbaudaten vorhanden sind und diese eindeutig interpretiert werden können. Dabei spielt bereits die Qualität der Bohrkernansprache bei der Errichtung der Messstelle eine wichtige Rolle. Eine präzise und detaillierte Beschreibung der Gesteine ist unabdingbar, da es sonst nicht möglich ist die unterschiedlichen Gesteinsformationen voneinander zu unterscheiden und eine nachträgliche Zuordnung zur jeweiligen Formation nicht mehr möglich ist. 52

Die Überprüfung der Messstellen vor Ort ist wichtig, um die Qualität und das weitere Vorgehen im Umgang mit den Messstellen festzulegen. So wurden die Messstellen bei der Begehung nicht nur auf äußere Defekte wie beispielsweise kaputte oder fehlende Messstellenkappen untersucht, sondern auch die Endteufe der Messstellen mittels eines Teufenlots ermittelt. Hierbei ist bei einigen Messstellen aufgefallen, dass die angegebene ursprüngliche Endteufe nicht mit der gemessenen übereinstimmt. Die Differenz zwischen Soll- und Ist-Teufe ist möglicherweise auf eine Verschlammung der Messstellen zurückzuführen. Um diese Messstellen für die weitere Projektarbeit nutzen zu können, ist eine Regenerierung durch Klarpumpen bzw. Klarspülen zu empfehlen. 53

Nach der Vor-Ort-Überprüfung verbleiben noch 79 Grundwassermessstellen für die weitere Plausibilitätsprüfung des Messstellennetzes. Dies entspricht etwa 45 % der Grundgesamtheit der betrachteten Grundwassermessstellen (vgl. **Abb. 6**). 54



55 **Abb. 6:** Messstellenanzahl nach Vor-Ort-Überprüfung (verändert nach [1])

56 Bei der weiteren Analyse des Messstellennetzes muss überprüft und entschieden werden, ob es notwendig ist alle Messstellen, die verschlammte sind oder andere Mängel aufweisen, zu regenerieren oder ob einige dieser Messstellen fachgerecht rückgebaut werden können. Jede Grundwassermessstelle stellt die Möglichkeit eines hydraulischen Kurzschlusses dar. Besonders bei einem Schadensfall ist es wichtig, die Interaktion zwischen den einzelnen Grundwasserstockwerken zu vermeiden, da sonst eine Verschleppung des Schadstoffes stattfinden kann.

6.3 Analyse der Messstellenverteilung

57 **Abb. 7** zeigt, dass aufgrund der vorhandenen Informationen über den Messstellenausbau und die bei der Bohrung angetroffene Schichtenfolge noch 66 Grundwassermessstellen der ursprünglich 175 betrachteten für die weitere Projektarbeit verbleiben. Die weitere Analyse und Plausibilitätsprüfung des Messstellennetzes wird somit an diesen, den bisherigen Qualitätsanforderungen genügenden, 38 % der Grundgesamtheit der Messstellen im Untersuchungsgebiet durchgeführt.

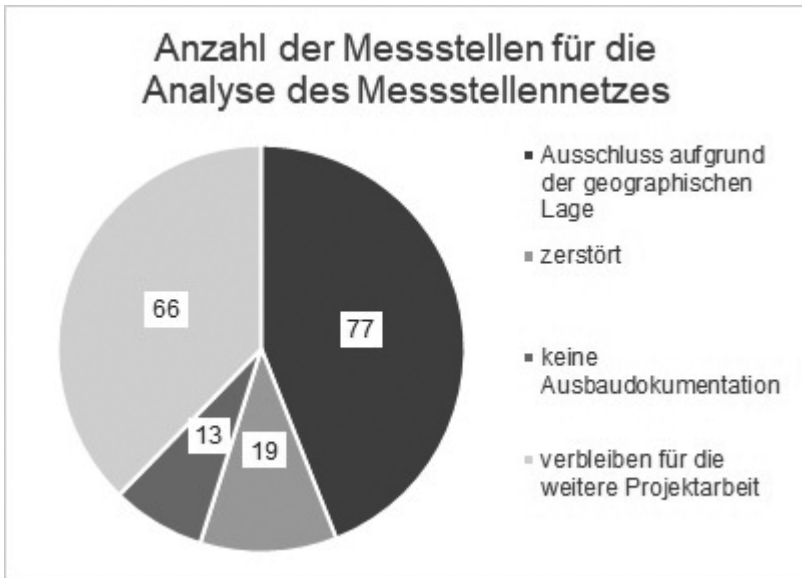
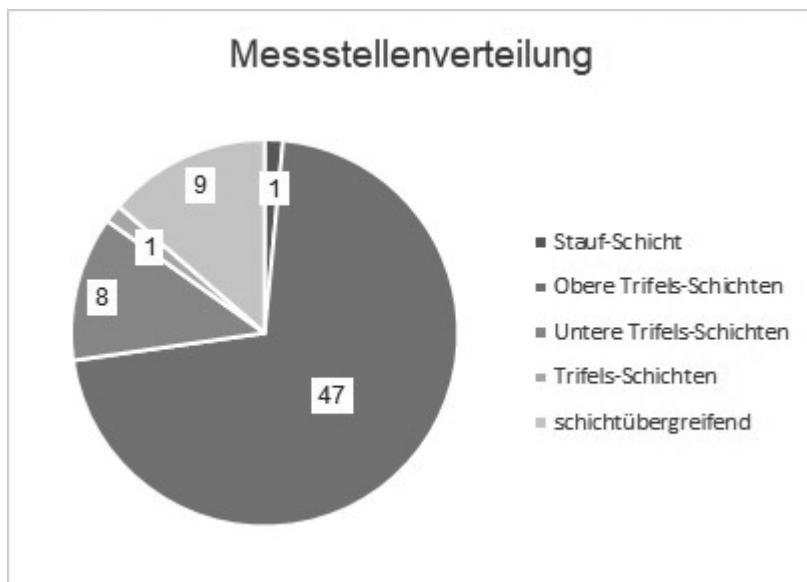


Abb. 7: Messstellenanzahl der Grundgesamtheit für die Analyse (verändert nach [1]) 58

Diese Messstellen wurden anhand der Filterstrecke den unterschiedlichen Gesteinseinheiten im Untersuchungsgebiet zugeordnet. Diese Zuordnung ist sinnvoll, um überprüfen zu können, inwiefern die Messstellen den Grundwasserleiter hydraulisch abbilden. Am Standort erfolgt eine Unterteilung in Stauf- und Trifels-Schichten, sowie schichtübergreifend verfiltert. Sofern es möglich ist, wird innerhalb der Trifels-Schichten zwischen Oberen und Unteren Trifels-Schichten differenziert. **Abb. 8** zeigt die Verteilung der 66 Grundwassermessstellen, welche eindeutig einer geologischen Einheit zugeordnet werden können. 59



60 **Abb. 8:** Grundwassermessstellenverteilung [1]

- 61 Rund 71 % der nach der Qualitätsprüfung verbliebenen Grundwassermessstellen sind in den Oberen Trifels-Schichten verfiltert und nur eine Messstelle ausschließlich in den Stauf-Schichten.
- 62 Die Messstellenanzahl in den Oberen Trifels-Schichten scheint in Anbetracht der Verhältnisse ausreichend, um eine qualitative Aussage über die hydraulischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet treffen zu können. Die Anzahl der notwendigen Messstellen ist hierbei von der Größe des Untersuchungsgebietes und der flächendeckenden Verbreitung dieser abhängig. Ob die Anzahl von sieben Messstellen in den Unteren Trifels-Schichten genügt, um die hydraulischen Verhältnisse widerzuspiegeln, muss im weiteren Projektverlauf überprüft werden. Zumal die Grundwassermessstellen nicht flächendeckend verbreitet und die Ausbreitung der trennenden Zwischenschicht und deren Wirkung als hydraulische Barriere auf dem Standort noch nicht abschließend geklärt ist. Hierfür würden sich im weiteren Verlauf der Untersuchungen zunächst Langzeitpumpversuche anbieten.
- 63 Nach einer ersten Überprüfung ist festzuhalten, dass die bestehenden Messstellen den gesamten Aquifer abbilden. Inwieweit mit diesem Messstellennetz, unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Kluft und

Matrix, belastbare Aussagen über die hydrogeologischen Gegebenheiten getroffen werden können, muss im weiteren Projektverlauf noch geprüft werden.

7 Qualitätssichernde Maßnahmen

Geophysikalische Bohrlochmessungen sind ein wichtiges Verfahren bei der Erkundung von Altlasten sowie des geologischen Aufbaus des Untergrundes. In Bohrungen und Grundwassermessstellen können durch geophysikalische Messungen unterschiedliche Parameter ermittelt werden. Hierzu zählen physikalische Größen (Dichte, spezifischer elektrischer Widerstand etc.), geometrische Größen (Kaliber, Raumstellung von Klüften etc.) und der Zustand der Messstelle (Verrohrung, Filter etc.), wobei die Wahl der Versuchsmethode immer von dem Zustand und dem vorhandenen Ausbau abhängig ist [9]. 64

Bei der Analyse und Bewertung vorhandener Grundwassermessstellen wird insbesondere auf den technischen Zustand eingegangen. Mit diesen Methoden ist es möglich, bestehende Wissenslücken über den Zustand der Grundwassermessstellen zu schließen. 65

Die Kamerabefahrung ist eine optische Untersuchungsmethode zur Inspektion von Brunnen und Messstellen mittels einer Videokamera. Hiermit können der Zustand, mögliche Beschädigungen und die Notwendigkeit von Regenerierungsmaßnahmen identifiziert werden [9]. Diese Methode erlaubt qualitative Aussagen über den Zustand und die genaue Lage der Verrohrung, sowie der Filterstrecken und ist somit besonders bei Messstellen mit unbekanntem oder unplausiblen Ausbau hilfreich [10]. 66

Die Fluidmessung der Temperatur und Leitfähigkeit erfolgt als erste Messung in einer Messstelle, um ein ungestörtes Profil über die wassererfüllte Mächtigkeit im Ruhezustand ohne Verwirbelungen zu erhalten. Mit dieser Methode lassen sich mögliche vertikale Grundwasserströmungen im Ringraum sowie Wasser Zu- und Abflüsse, wenn diese die Temperatur bzw. Leitfähigkeit des Wassers ändern, lokalisieren [10]. Durch diese Messung zeigen sich Grundwasserzuflüsse durch einen Sprung im Temperatur und Leitfähigkeitsprofil, sofern diese die Temperatur beeinflussen. 67

Um die Grundwassersanierungsmaßnahme auf einem Standort optimieren zu können, ist es wichtig detaillierte Informationen über die Sanierungsbrunnen zu erhalten. So kann es hilfreich sein die Zuflusszonen zu identifizieren und den Zustand der Brunnen aufgrund des Alters und des langen Sanierungsbetriebes zu überprüfen. 68

- 69 Mit Flowmeter-Messungen können vertikale Fließgeschwindigkeiten in einem Bohrloch aufgezeichnet werden und darüber Zuflusszonen lokalisiert werden. Im offenen Bohrloch können Fließwege lokalisiert werden. In einer ausgebauten Grundwassermessstelle können dagegen auch Rückschlüsse auf verstopfte Filterabschnitte gezogen werden.
- 70 Unter anderem mit diesen geophysikalischen Maßnahmen lässt sich die Qualität der vorhandenen Messstellen überprüfen, so dass anschließend Maßnahmen ergriffen werden können, um die Qualität des Messstellennetzes zu verbessern und zu optimieren.
- 71 Sollten neue Grundwassermessstellen errichtet werden, können diese als Kernbohrungen abgeteufelt werden. Mit Hilfe dieser Informationen können anschließend weitere Profilschnitte erstellen oder die bereits vorhandenen ergänzt werden und diese, falls notwendig, in ein dreidimensionales Modell des Untergrundes überführt werden. Nach der Abteufung von Bohrungen können geophysikalische Bohrlochmessungen im offenen Bohrloch durchgeführt werden. Neben den bereits beschriebenen Messungen mit dem Flowmeter bieten sich optische oder akustische Scanner an. Mittels OBI oder ABF, je nach Wassererfüllung, können Trennflächen, Klüfte und Störungen innerhalb des Bohrloches detektiert und quantitativ ausgewertet werden. Hierbei kann auch die Raumlage der Trennflächen ermittelt werden [10]. Diese Messungen in Kombination mit dem Flowmeter können es ermöglichen die hauptwasserwegsamten Klüfte zu identifizieren.
- 72 Zur Ableitung einer hydrogeologischen Modellvorstellung können Pumpversuche sinnvoll sein. Diese müssen allerdings so konzeptioniert werden, dass eine Auswertung für den Kluftgrundwasserleiter möglich ist. Nach Altenbockum [11] liefert das, für einen Porengrundwasserleiter entwickelte, Auswertungsverfahren nach Theis (1940) unter bestimmten Rahmenbedingungen vergleichbare Ergebnisse wie das nach Warren & Root (1963) entwickelte Verfahren für einen Kluftgrundwasserleiter. Diesem Verfahren liegt die Annahme eines Doppelkontinuums zugrunde, welches sowohl die Porosität der Matrix als auch die des Kluftsystems beachtet. Diese Kontinua gehen in den dimensionslosen Transferfaktor ein, welcher für die Modellfunktion nach Warren & Root entscheidend ist. Wird dieser sehr klein, hat er keinen Einfluss mehr auf die Modellanpassung. In diesem Falle wird ein Grenzfall der Modellfunktion von Warren & Root erreicht und diese entspricht dem Verlauf der Theis-Funktion. Für diesen Grenzfall muss die Durchlässigkeit der Matrix im Doppelkontinuum vergleichsweise sehr gering zu der des Kluftsystems sein. Zur Beurteilung der Übertragbarkeit dieses Ansatzes sind weitere Versuche zur Bestimmung der Matrixdurchlässigkeit und der Durchlässigkeit des Kluftsystems notwendig. Mit Hilfe von

TRIAxIAL-Zellenversuchen kann die Matrixdurchlässigkeit ermittelt werden und mittels Flowmeter Untersuchungen abgeschätzt werden, wie sich die Durchlässigkeit des Kluftsystems im Vergleich dazu verhält. Ergibt sich hierbei auch ein sehr kleiner Transferfaktor, so könnten die Aussagen von Altenbockum [11] auf das Untersuchungsgebiet übertragen werden und die ermittelten Werte der Durchlässigkeit nach THEIS hätten ihre Gültigkeit. Andernfalls ist bei der Auswertung des Pumpversuchs eine Methode für das Kluftsystem, wie die nach Warren & Root oder Moench anzuwenden.

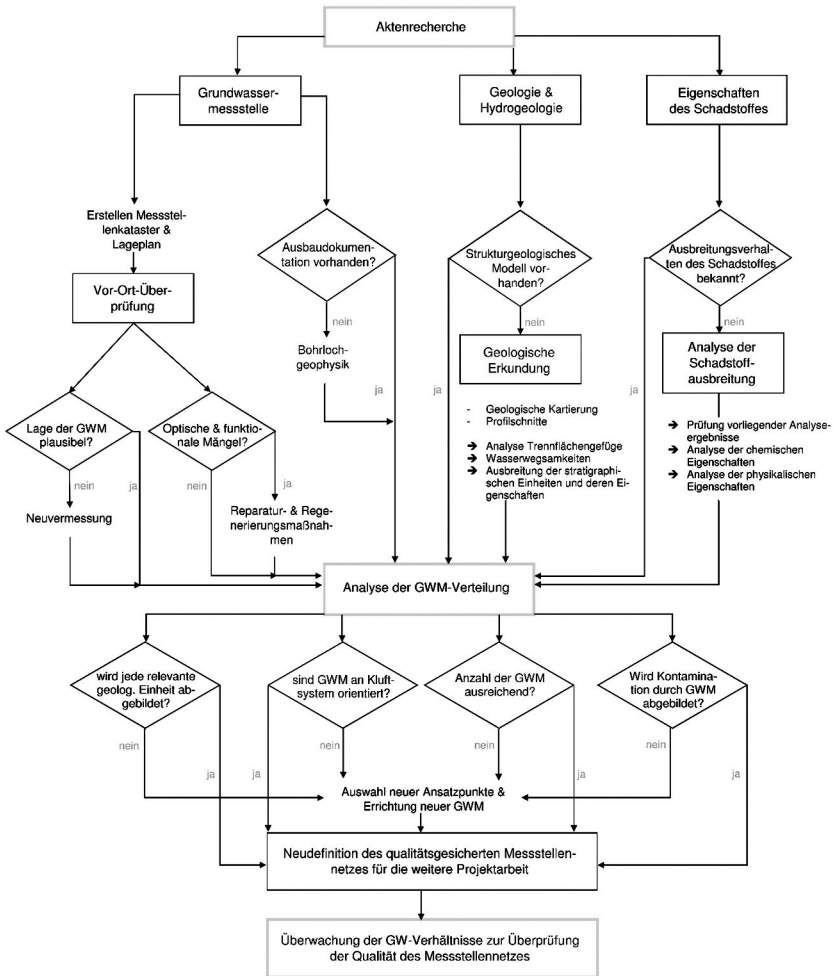
Ferner kann es sinnvoll sein Dünnschliffe des Gesteins anzufertigen und die Zementation der Matrix genauer zu betrachten. Diese ist wichtig für die Beurteilung der hydrogeologischen Situation und auch für die Auswertung der Pumpversuche. 73

Die Grundwasserfließrichtung kann durch Tracerversuche bestimmt werden. Hierbei muss bei der Wahl des Grundwassermarkierungsstoffes allerdings berücksichtigt werden, dass dieser nicht zu stark an der Oberfläche des Festgesteins sorbiert und möglichst die Eigenschaften eines konservativen Tracers aufweist. Wenn dieser in flachen Grundwassermessstellen eingegeben wird, kann zudem überprüft werden, ob sich der Stoff schichtübergreifend ausbreitet und auch in tieferen Messstellen nachgewiesen werden kann. Hiermit kann die Wirksamkeit der hydraulischen Barriere überprüft werden. 74

Zur Erkundung des Fließverhaltens im Kluftgrundwasserleiter und zur Ableitung hydraulischer Kenndaten aus der Schadstoffausbreitung im Untergrund wurde durch Altenbockum & Berens [12] eine Vorgehensweise beschrieben. Je nach Standortgegebenheiten, vorhandener Datengrundlage und Schadstoffeigenschaften kann dieses Verfahren gegebenenfalls auf den betrachteten Standort übertragen werden und aus dem Fahnenbild hydraulische Aquifereigenschaften abgeleitet werden. 75

8 Ableitung einer schematischen Vorgehensweise zur Analyse und Optimierung eines bestehenden Messstellennetzes

In **Abb. 9** ist die Vorgehensweise bei der Übernahme und Überprüfung eines bestehenden Grundwassermessstellennetzes schematisch skizziert. Die aufgeführten Schritte sind Anhaltspunkte, da das optimale Vorgehen je nach Standortbedingungen variieren kann. Zudem kann die Datengrundlage für die Plausibilitätsprüfung des Messstellennetzes von unterschiedlicher Qualität sein, wodurch es möglich ist, dass einzelne Schritte entfallen oder hinzugefügt werden müssen. 76



77 **Abb. 9:** Schematische Vorgehensweise zur Überprüfung eines Messstellennetzes (verändert nach [1])

9 Fazit

78 Bei der langfristigen Bearbeitung oder der Weiterführung eines bestehenden Projektes in einem Kluffgrundwasserleiter kann es notwendig sein, das his-

torisch gewachsene Messstellennetz hinsichtlich seiner Qualität und der Plausibilität zu überprüfen. Für dieses Vorgehen existierte kein publiziertes Schema für das Festgestein. Anhand eines Praxisbeispiels wurde eine Vorgehensweise erprobt und daraus ein allgemeines Schema abgeleitet.

Für die Analyse und Plausibilitätsprüfung eines Grundwassermessstellennetzes im Festgestein gibt es drei wesentliche Faktoren. Es sind Kenntnisse über die Grundwassermessstellen, die Geologie und Hydrogeologie sowie den vorhandenen Schadstoff notwendig. Informationen über diese Faktoren können bereits aus der Aktenrecherche gewonnen und je nach Qualität durch weitere Untersuchungen ergänzt werden. 79

Nach der tabellarischen Auflistung der Informationen über die Grundwassermessstellen aus den vorliegenden Unterlagen können diese, anhand dieses Messstellenkaders und eines Lageplans, Vor-Ort überprüft werden. Hierbei können widersprüchliche Angaben bezüglich der Lage der Grundwassermessstellen ebenso auffallen wie funktionale und optische Mängel. Bei dieser Vor-Ort-Überprüfung können bereits erste Defizite erkannt und notwendige Maßnahmen abgeleitet werden. 80

Ebenso sind die Grundwassermessstellen anhand der Lage der Filterstrecke den unterschiedlichen geologischen Einheiten im Untersuchungsgebiet zuzuordnen, um deren Verteilung in den verschiedenen geologischen Horizonten analysieren zu können. Dies ist mit Hilfe der Ausbaudokumentation möglich. Ist diese nicht vorhanden, so können diese Informationen mittels geophysikalischer Bohrlochmessungen gewonnen werden. 81

Die Entwicklung eines struktur- und hydrogeologischen Modellverständnisses ist neben der Klassifizierung der Grundwassermessstellen auch für die Analyse der Ausbreitungspfade des Schadstoffes entscheidend. Um die Hauptwasserwege im Untergrund nachvollziehen zu können, ist eine geologische Erkundung des Untersuchungsgebietes unabdingbar. Es ist bekannt, dass sich in einem Kluftgrundwasserleiter die Hauptwasserwege entlang des Trennflächengefüges befinden. Deshalb ist es wichtig dieses genauer zu untersuchen, um Aussagen über die Wasserwegsamkeiten treffen zu können. Zudem sollte die Porosität der Matrix detailliert untersucht werden, da erst anschließend bestimmt werden kann, welchen Einfluss diese auf die Strömungsverhältnisse hat. Nur bei ausreichender Kenntnis der Geologie und Hydrogeologie kann beurteilt werden, ob das Messstellennetz die Grundwasserverhältnisse im Untersuchungsgebiet realitätsnah abbilden kann. 82

Inwieweit die Kontamination von dem bestehenden Grundwassermessstellennetz abgebildet werden kann, hängt unter anderem von dem Ausbrei- 83

tungsverhalten und der Dichte des Schadstoffes ab. Entsprechend dieser Eigenschaften ist das Grundwassermessstellennetz zu bewerten und gegebenenfalls anzupassen.

- 84 Sobald hinreichend Kenntnisse über diese drei Aspekte bekannt sind, kann die Analyse der Grundwassermessstellenverteilung erfolgen. Hierbei sind die zuvor gewonnenen Informationen über die struktur- und hydrogeologischen Verhältnisse wichtig. Durch dieses Verständnis können die, in **Abb. 9** unter Analyse der Messstellenverteilung, dargestellten vier notwendigen Aspekte zur Beurteilung der Messstellenverteilung überprüft werden. Werden diese vier Aspekte nicht hinreichend erfüllt, sollten Ansatzpunkte für die Errichtung neuer Grundwassermessstellen ausgewählt werden, so dass das Grundwassermessstellennetz die hydraulische Situation im Untersuchungsgebiet repräsentativ abbilden kann.
- 85 Hat das Grundwassermessstellennetz nach der Plausibilitätsprüfung und der Aufarbeitung vorhandener Defizite eine gute Qualität, kann die folgende Sanierungsmaßnahme geplant bzw. optimiert werden. Durch eine Langzeitüberwachung der Grundwasserverhältnisse können auch erst nach einiger Zeit auftretende Defizite und Alterungserscheinungen erkannt und anschließend gegebenenfalls behoben werden.
- 86 Die hier beschriebene Vorgehensweise wurde anhand der Analyse und Plausibilitätsprüfung eines bestehenden Grundwassermessstellennetzes im Festgestein abgeleitet. Eine Anwendung des Schemas an einem anderen Praxisprojekt hat zu denselben Einflussfaktoren geführt. Dennoch ist es gegebenenfalls notwendig, in Abhängigkeit der Qualität der vorhandenen Daten und der standortspezifischen Gegebenheiten, einzelne Aspekte zu dem Schema hinzuzufügen.

10 Literaturverzeichnis

- [1] Hinckel H.: Analyse und Plausibilitätsprüfung eines bestehenden Messstellennetzes im Festgestein als Grundlage für eine nachfolgende Optimierung einer lange laufenden Grundwassersanierungsanlage. Masterarbeit. RWTH Aachen University. unveröffentlicht, Aachen (2017).
- [2] Langguth H.-R.; Voigt R.: Hydrogeologische Methoden. 2., überarb. und erw. Aufl. Berlin: Springer (2004).
- [3] Grandel S.; Dahmke A.: Leitfaden „Natürliche Schadstoffminderung bei LCKW-kontaminierten Standorten“. Methoden, Empfehlungen und Hinweise zur Untersuchung und Beurteilung ; [KORA-Themenverbund 3 „Chemische Industrie, Metallverarbeitung“] im BMBF-För-

- derschwerpunkt „Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden“ (KORA). Kiel: Univ. Institut für Geowissenschaften Abt. Angewandte Geologie (2008).
- [4] Nativ R.; Adar E.M.; Becker A.: Designing a Monitoring Network for Contaminated Ground Water in Fractured Chalk. In: *Ground Water* (1999) 37 (1).
 - [5] Jardine K.; Smith L.; Clemo T.: Monitoring Networks in Fractured Rocks. A Decision Analysis Approach. In: *Ground Water* (1996) 34 (3).
 - [6] Park, Young-Jin; Lee, Kang-Kun; Kim, Jun-Mo: Effects of Highly Permeable Geological Discontinuities upon Groundwater Productivity and Well Yield. In: *Mathematical Geology* (2000) 32 (5).
 - [7] LGB RLP (Hg.) (2005). Geologie von Rheinland-Pfalz. Mit 36 Tabellen im Text. Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz, Mainz. Stuttgart: Schweizerbart.
 - [8] LGB; LfW: Hydrogeologische Kartierung Kaiserslautern. Unter Mitarbeit von Klaus Steingötter. Mainz: Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB), Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz (LfW) (2004).
 - [9] Knödel K.; Krummel H.; Lange G.: Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten. Geophysik (German Edition). 2nd ed. Dordrecht: Springer (2005).
 - [10] DVGW: Technische Regel – Arbeitsblatt W110 – Geophysikalische Untersuchungen in Bohrungen, Brunnen und: Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e. V. In: Bonn (2005).
 - [11] Altenbockum M.: Dynamische Entwicklung eines hydrogeologischen Modells des Rotliegend-Sandsteins der Kreuznach-Formation im Saar-Nahe-Becken. Dissertation (2015).
 - [12] Altenbockum M.; Berens K.: LCKW als Tracer zur Ermittlung grundwasserhydraulischer Eigenschaften eines Kluftgrundwasserleiters. In: *Handbuch Altlastensanierung und Flächenmanagement* (79. Aktualisierung) (2016).