

Universität für Bodenkultur Wien  
University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna  
Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt  
Institut für Siedlungswasserbau, Industrierewasserwirtschaft und Gewässerschutz  
Leiter: Univ.Prof. DI Dr. Thomas Ertl



# **TECHNISCHER LEBENSZYKLUS EINES HORIZONTALFILTERBRUNNENS**

**Masterarbeit  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplomingenieur**

eingereicht von:  
**KLAMBAUER, TERESA**

Betreuer: Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Reinhard Perfler  
Mitbetreuer: Dipl.-Ing. Ernest Mayr



## Vorwort

Diese Masterarbeit wurde am Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Industriebwasserwirtschaft und Gewässerschutz an der Universität für Bodenkultur in Wien unter der Leitung von Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Reinhard Perfler und Dipl.-Ing. Ernest Mayr durchgeführt.

An dieser Stelle möchte ich Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Reinhard Perfler und Herrn Dipl.-Ing. Ernest Mayr meinen besonderen Dank für die Unterstützung bei der Umsetzung dieser Arbeit aussprechen. Vor allem bedanke ich mich für die mir gegenüber aufgewendete Zeit, die Bereitstellung von Literatur und Unterlagen sowie die Herstellung der Kontakte zur Praxis.

Außerdem möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Sebastian Handl danken, der mich bei der Datenbanksuche mit seinem Know-how sehr unterstützt hat und mir bei allen Fragen zur Seite stand.

Des Weiteren möchte ich Herrn Ing. Michael Willner und der Firma Züblin Spezialtiefbau GmbH für die freundliche Zusammenarbeit, die Möglichkeit der Durchforstung ihres Brunnenbauarchivs und der Besichtigung des firmeneigenen Bauhofs sowie einer Brunnenbaustelle danken.

Von ganzem Herzen möchte ich meiner Familie danken, die mir während meiner Studienzeit stets mit mentaler und finanzieller Unterstützung zur Seite stand. Meinen Freunden, allen voran meinem Freund, danke ich, dass sie immer ein offenes Ohr hatten und meine Studienzeit zu einem unvergesslichen Erlebnis gemacht haben. Auf zu neuen Ufern.



## Inhalt

<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Zielsetzung und Vorgangsweise</b> .....	<b>3</b>
<b>3. Grundlagen Hydrogeologie und Grundwasserleiter</b> .....	<b>4</b>
3.1 Wasserbilanz.....	4
3.2 Wasserbilanz für Einzugsgebiete und Teileinzugsgebiete .....	4
3.3 Grundwasser und Grundwasserleiter .....	5
3.3.1 Einteilung der Grundwasserkörper in Österreich .....	7
3.4 Porosität .....	8
3.5 Speicherkoeffizient.....	9
3.6 Darcy, Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$ und Transmissivität .....	10
<b>4. Grundlagen Hydraulik, numerische Lösung und Modellanwendung</b> .....	<b>11</b>
4.1 Grundwasserbewegung.....	12
4.1.1 Spezifische Randbedingungen für die Grundwasserbewegung.....	13
4.2 Analytische Lösungen .....	14
4.2.1 Grundwasserbewegung in einem gespannten Grundwasserleiter.....	14
4.2.2 Grundwasserbewegung in einem ungespannten Grundwasserleiter.....	15
4.2.3 Hydraulische Bedingungen der Uferfiltration .....	15
4.2.4 Stationäre Brunnenanströmung Vertikalfilterbrunnen .....	16
4.2.5 Stationäre Anströmung zum Horizontalfilterbrunnen .....	17
4.2.6 Anströmung zum verlaufsgesteuerten Horizontalfilterbrunnen (VHB) .....	21
4.3 Numerische Lösung und Modellbildung .....	22
4.3.1 Modell-Kalibrierung.....	24
4.3.2 Validierung - Modeltest .....	24
4.4 Anwendung der Modellierung.....	25
<b>5. Brunnenbemessung</b> .....	<b>28</b>
5.1 Vorbemessung des Brunnenbaus .....	28
5.2 Technische Bemessung.....	30
5.3 Hydraulische Bemessung .....	31
5.3.1 Filterkies und Filteröffnungen.....	31
<b>6. Vorgangsweise und Methoden für die detaillierten Erhebungen</b> .....	<b>36</b>
6.1 Literaturanalyse .....	36
6.2 Interview .....	36
6.3 Karte der HFB .....	37
<b>7. Ergebnisse und Diskussion</b> .....	<b>39</b>
7.1 Planung .....	39
7.1.1 Voruntersuchungen .....	39
7.1.2 Rechtliche Aspekte bei der Planung.....	65
7.1.3 Fehler und Mängel bei der Planung .....	70
7.2 Bau.....	72
7.2.1 Schachtbau .....	72
7.2.2 Horizontale Bohrtechnik .....	74
7.2.3 Filterrohre.....	81
7.2.4 Filtersand und Filterkies.....	84
7.2.5 Arbeitskammern und Fördertechnik.....	84
7.2.6 Abschlussbauwerk.....	85
7.2.7 Entwickeln der Brunnenstränge .....	86
7.2.8 Fehler und Mängel in der Ausführung .....	89
7.2.9 Rechtliche Aspekte – Bauabnahme .....	92
7.3 Betrieb .....	95
7.3.1 Brunnenbewirtschaftung .....	95
7.3.2 Monitoring .....	101
7.3.3 Brunnenalterung.....	104

7.3.4	Vorbeugung der Brunnenalterung .....	112
7.3.5	Entscheidungskriterien Regenerierung-Sanierung-Rückbau .....	113
7.4	Regenerierung.....	115
7.4.1	Mechanische Brunnenregenerierung .....	116
7.4.2	Druckwellen- und Impulsverfahren (dynamische Verfahren) .....	120
7.4.3	Chemische Brunnenregenerierung .....	121
7.4.4	Durchführung einer Regenerierung .....	124
7.4.5	Probleme nach der Regenerierung und ihre Ursachen .....	127
7.5	Sanierung und Rückbau .....	128
7.5.1	Sanierungsmethoden .....	128
7.5.2	Rückbaumethoden.....	131
7.6	Gegenüberstellung Theorie und Praxis.....	134
7.7	Übersichtskarte HFB Österreich.....	143
7.8	Diskussion .....	149
<b>8.</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick.....</b>	<b>151</b>
<b>9.</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>153</b>
<b>10.</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>156</b>
<b>11.</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>161</b>
<b>12.</b>	<b>Lebenslauf .....</b>	<b>165</b>
<b>13.</b>	<b>Eidesstattliche Erklärung.....</b>	<b>167</b>

**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1.1 Schema Horizontalfilterbrunnen .....	1
Abbildung 3.1: Wasserkreislauf .....	4
Abbildung 3.2: hydrogeologische Begriffe .....	6
Abbildung 3.3: Kornverteilung typischer Lockergesteine .....	7
Abbildung 3.4: Grundwasserkörper in Österreich .....	8
Abbildung 3.5: a) primäre und sekundäre, effektive (nutzbare) Porosität .....	9
Abbildung 4.1: Anströmverhältnisse eines HFB im Grundriss und Schnitt .....	18
Abbildung 4.2: Anströmishypsen.....	18
Abbildung 4.3: Schema HFB in Schnitt und Grundriss .....	19
Abbildung 4.4: Verschiedene Möglichkeiten der Stranganordnung im HFB .....	26
Abbildung 4.5: Vergleich Design Szenarien.....	27
Abbildung 5.1: Ermittlung von $Q_{max}$ aus Wasserandrang $Q_a$ und Fassungsvermögen $G_F$ .....	29
Abbildung 5.2: Zuströmung zu einem HFB Filterrohr .....	30
Abbildung 5.3: Richtwerte für Schlitz- und Spaltbreiten) .....	33
Abbildung 5.4 Filterfaktoren verschiedener Ordnungen.....	34
Abbildung 6.1: Fehlbezeichnungen im NÖ Atlas .....	38
Abbildung 7.1: Flussdiagramm zur Datenerhebung .....	41
Abbildung 7.2: Erfahrungswerte für den spezifischen Widerstand von Gesteinen .....	46
Abbildung 7.3: Funktion einer geoelektrischen Sondierung.....	47
Abbildung 7.4: Richtungs- und Abweichungsdiagramm .....	51
Abbildung 7.5: Zeitpunkte der verschiedenen Pumpversuche .....	57
Abbildung 7.6 Schematische Darstellung der Schutzzonen I-III.....	64
Abbildung 7.7 Schutz und Schongebiete der HFB Friesach .....	65
Abbildung 7.8: Senkscheide für 3m Schacht .....	73
Abbildung 7.9: Erstes Segment mit Anschlüssen für die Filterstränge.....	74
Abbildung 7.10: Vortriebspresse mit Filterrohr und Entsandungsgestänge .....	75
Abbildung 7.11: Beginn des Bohrvorgangs .....	75
Abbildung 7.12: Ausbildung Stützfilter und Schema RANNEY Verfahren .....	77
Abbildung 7.13: Ausbildung Stützfilter und Schema FEHLMANN-Verfahren.....	78
Abbildung 7.14: Ausbildung Stützfilter und Schema PREUSSAG - Kiesmantel – Verfahren ....	79
Abbildung 7.15 Ausführungsbeispiele für VHB (Single- und Twinbrunnen).....	80
Abbildung 7.16: a) Langloch- und Schlitzfilter b) Schlitzbrückenfilter c) Wickeldrahtfilter .....	82
Abbildung 7.17: HFB in Nass- und Trockenaufstellung.....	85
Abbildung 7.18: Fehler-Ursachen-Diagramm Kolmation .....	91
Abbildung 7.19: Aufbau einer Brunnenakte .....	98
Abbildung 7.20: Ganglinie mehrstufiger Pumpversuchs und Leistungsdiagramm .....	101
Abbildung 7.21: Entsandungswirkung bei falsch und korrekt bemessener Kiesschüttung .....	106
Abbildung 7.22: Struktureller Aufbau von Verockerungen im mikroskopischen Maßstab .....	111
Abbildung 7.23: Übersicht der Sanierungsmethoden .....	129
Abbildung 7.24: Übersicht der Rückbaumethoden .....	132
Abbildung 7.25: Verteilung der HFB in Österreich.....	143
Abbildung 7.26: Österreichkarte HFB nach Baujahr .....	144
Abbildung 7.27: Betreiber von HFB in Österreich .....	145
Abbildung 7.28: Verwendung des Wassers aus HFB in Österreich .....	145
Abbildung 7.29: Entnahmemengen der HFB in Österreich .....	146
Abbildung 7.30: Verwendung der Vortriebsverfahren .....	147
Abbildung 7.31: Tiefe der Vortriebshorizonte der HFB in Österreich .....	147
Abbildung 7.32: Verwendung von Materialien für Filterrohre.....	148

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Wasserbilanz von Österreich.....	5
Tabelle 3.2: Hydrogeologische Parameter einzelner Gesteine.....	10
Tabelle 3.3 Ideale prozentuelle Verteilung des kf-Werts in der hydraulischen Kette .....	35
Tabelle 7.1: Benötigte Daten und Datenquellen .....	42
Tabelle 7.2: Geophysikalische Untersuchungen .....	45
Tabelle 7.3: Methoden zur Abschätzung der GW-Neubildung .....	54
Tabelle 7.4: Richtwerte Restsandgehalt .....	89
Tabelle 7.5: Beispiel Versuchsanordnung Leistungspumpversuch.....	93
Tabelle 7.6: Art, Gegenstand und Ziel der Datenerfassung .....	99
Tabelle 7.7: Beurteilung von Regenerierungs- oder Sanierungserfordernissen.....	103
Tabelle 7.8: Förderkosten in Abhängigkeit der alterungsbedingten zusätzlichen Absenkung ...	105
Tabelle 7.9: Gegenüberstellung von Aussagen aus Literatur und Praxis.....	135
Tabelle 7.10: Vorgehensweise bei der HFB Suche in Abhängigkeit vom Bundesland.....	143
Tabelle 9.1: Zusammenfassung der Herausforderungen.....	153

## Abkürzungen

AVG	Allgemeines Verwaltungsverfahrensgesetz
AWG	Abfallwirtschaftsgesetz
BGBI	Bundesgesetzblatt
BMLFUW	Bundesministerium für Land-, Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft
DVGW	Deutsche Vereinigung für das Gas- und Wasserfach
EZG	Einzugsgebiet
HF	Horizontalfilter
HFB	Horizontalfilterbrunnen
LH	Landeshauptmann
ÖVGW	Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach
VHB	Verlaufsgesteuerter Horizontalfilterbrunnen
VFB	Vertikalfilterbrunnen
WRG	Wasserrechtsgesetz 1959

---

## **Kurzfassung**

Horizontalfilterbrunnen (HFB) haben in vielerlei Hinsicht Vorteile gegenüber Vertikalfilterbrunnen. Sie zeichnen sich beispielsweise durch günstigere Betriebskosten, die Möglichkeit der Anpassung an hydrogeologische Rahmenbedingungen, Vorteile hinsichtlich der Wasserqualität und die individuelle Steuertechnik aus. Die höheren Investitionskosten führen dazu, dass sich der Neubau dieser Brunnen in Grenzen hält. Diese Arbeit liefert eine Zusammenfassung des derzeitigen Stands der Technik zu allen Bereichen des Lebenszyklus eines HFB. Dieser gliedert sich in Planung, Bau, Betrieb, Regenerierung, Sanierung und Rückbau. Durch die Gegenüberstellung von Aussagen aus Theorie und Praxis, sowie durch konkrete Beispiele werden Herausforderungen im Lebenszyklus sichtbar. Diese reichen von ungenügender Kenntnis des Untergrundes in der Planung, über das Antreffen und Beseitigen von Hindernissen beim Bau und ein ungenügendes Brunnenmanagement im Betrieb bis hin zu unvollständiger und fehlerhafter Regenerierung und Sanierung.

Zusätzlich wurden vorhandene Informationen über bestehende HFB in Österreich gesammelt und in GIS aufbereitet.

## **Abstract**

Horizontal filter wells (HFW) or radial collector wells have advantages over vertical filter wells in many respects. They are outstanding, for example, due to more favorable operating costs, the possibility of adapting to hydro geological conditions, advantages with regard to water quality and individual control technology. Higher investment costs lead to declining construction of these wells. This work provides a summary of the current state of the art on all aspects of the life cycle of an HFW. The life cycle consists of the following stages: planning, construction, operation, regeneration, renovation and dismantling. By opposing statements found in theory and practice, as well as with concrete examples, challenges within the life cycle become visible. These range from inadequate knowledge of the subsoil in the planning phase, to the encounter and elimination of obstacles during construction and insufficient water management whilst operated to inadequate and inaccurate regeneration and rehabilitation.

In addition, available information on existing HFBs in Austria was collected and processed in GIS.



## 1. Einleitung

Horizontalfilterbrunnen, kurz HFB, sind sehr vielseitig einsetzbar. Fanden sie ihre erste Anwendung im Erdölabbau - der erste HFB wurde in den 1920er Jahren von seinem Erfinder und Erdölingenieur Leo Ranney in Texas gebaut (Hunt, 2002) - so werden sie heute auch für die Regulierung des Grundwasserspiegels in urbanen Gebieten, zur hydrothermalen Nutzung (z.B.: Kälte und Wärmeversorgung) zur Grundwassersanierung und zur Grundwassergewinnung für Trink- und Brauchwasser eingesetzt (Daffner, 2012). In der vorliegenden Arbeit liegt der Schwerpunkt auf diesen Einsatzgebieten.

Der erste Horizontalfilterbrunnen für die Wasserversorgung ging 1933 in London in Betrieb. Es handelte sich anfangs hauptsächlich um Brauchwasserbrunnen großer Industriebetriebe, da die ursprünglichen Bauformen auf hohe Brunnenkapazitäten ausgelegt waren (Hunt, 2002). Um 1940 entstanden in den USA die ersten HFB für die Trinkwasserversorgung, der erste 1936 in Canton, Ohio. Die Brunnen wurden neben Flüssen errichtet und nutzten die Infiltration ins Grundwasser um die Brunnenleistung zu erhöhen.

In Österreich entstand der erste Brunnen zur Trinkwasserversorgung 1959 in Graz. Vorreiter im Betrieb von Brauchwasserbrunnen waren 1956 die Druckfabrik in Guntramsdorf, sowie Kellner Partington Paper Pulp in Hallein. Wenig später, 1958, zogen die Linzer Voestalpine AG und die Zuckerfabrik in Tulln nach (Spiridonoff, 1964). Seither läuteten Verbesserungen in der Bohrtechnik, die Optimierung der Brunnenkonfiguration und die steigende Bedeutung von Uferfiltrat als Reinigungsstufe einen Siegeszug der HFB ein.

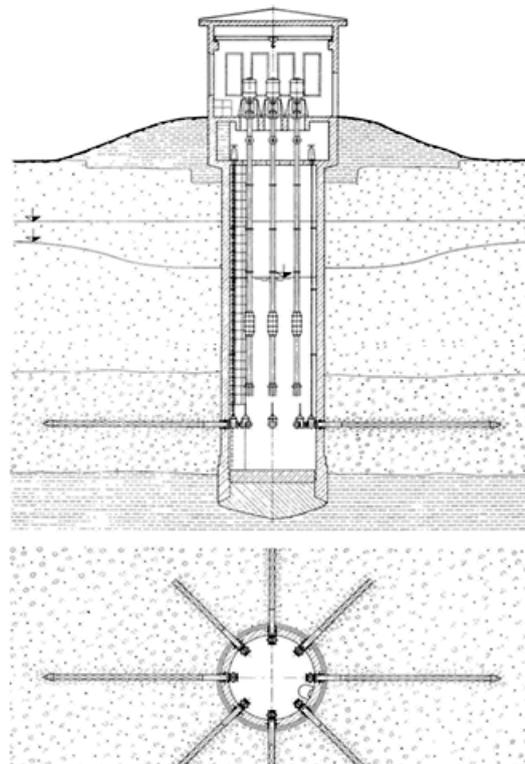


Abbildung 1.1 Schema Horizontalfilterbrunnen (Bieske, 1965)

Im Allgemeinen werden Horizontalfilterbrunnen bei großem Wasserbedarf und bei folgenden vorherrschenden hydrogeologischen Verhältnissen in Erwägung gezogen:

- Flache und ergiebige Grundwasserkörper in Lockergestein
- Infiltration aus Oberflächengewässer zur Grundwasseranreicherung

Die Bauform muss auf den hydrogeologischen Standort abgestimmt sein. Im Allgemeinen besteht ein Horizontalfilterbrunnen aber aus einem Sammelschacht, der wie bei Vertikalfilterbrunnen in den Grundwasserleiter abgeteuft wird (Abbildung 1.1). Der Schachtdurchmesser beträgt meist zwischen 2 und 5 m (oft 2,2 oder 2,8 m) (Bieske, 1965). Ungefähr ab einem Meter vom unteren Ende des Schachts befinden sich in einer oder mehreren Schichten die horizontalen Filterstränge. Diese sind durch Schieber mit dem Sammelschacht verbunden. Für den Vortrieb der Filterstränge findet man in der Literatur vor allem drei Verfahren, das RANNEY- Verfahren, das FEHLMANN-Verfahren und das PREUSSAG-Verfahren, welche in Kapitel 7.2.2 genauer erläutert werden. Die Filterstränge sind meist 30 – 60m lang und haben häufig Durchmesser von 125-300mm (Merkl, 2008, S.131).

Merkl (2008, S.131) gibt an, dass Kleinhorizontalfilterbrunnen (Anm.: Brunnen mit lichtem Schachtdurchmesser bis 2,2 m und Filterstrangdurchmesser bis 300 mm, bzw. einer Fördermenge von bis zu 150 l/s (Merkl, 2008)) die Leistungsfähigkeit von vier Vertikalfilterbrunnen erreichen können, dabei aber meist nur so viel kosten wie drei. Die wesentlichen Vorteile von HFB sind dabei:

- Ein geringerer Platzbedarf und die Erschließung eines größeren Gebietes eines Grundwasserleiters mit nur einem Schacht und später ein günstigerer Objektschutz (DVGW W 128, 2008)
- Die Möglichkeit der Nutzung von geringmächtigen und sehr ergiebigen Grundwasserleitern, die auch, für den Fall, dass sie in unterschiedlichen Horizonten anstehen, mit unterschiedlichen Filterstrang-Schichten, optimal genutzt werden können.
- Bei der Entnahme aus der Tiefe wird der Einfluss möglicher Verunreinigungen gering gehalten (Bieske, 1965, S.771) und übermäßiger Sauerstoffeintrag vermieden (DVGW W 128, 2008), was die Bildung von Inkrustationen in Folge der Brunnenalterung bremst.
- Die oberste Grundwasserschicht überströmt die Filterstränge, so kann bei Verunreinigungen eine Grundversorgung erhalten bleiben (Nemeček, 2006).
- HFB sind generell weniger empfindlich gegenüber Wasserspiegelschwankungen und bilden flachere Absenktrichter als VFB.
- In der Betriebsweise überzeugen die Brunnen mit vergleichsweise langer Lebensdauer infolge großer Brunnenmantelfläche bzw. geringer, kritischer Filtreintrittsgeschwindigkeit.
- Die Erweiterungsmöglichkeit durch zusätzliche Filterstränge oder Ersatzstränge im gleichen Brunnen, sowie der dafür nötige ungestörte Zugang (DVGW W 128, 2008).
- Die unabhängige Steuerung der einzelnen Stränge und damit die individuelle Steuerungstechnik (Spiridonoff, 1964).
- Geringere Betriebskosten (<20%) im Vergleich zu VFB (Glombitza, Aubel, Schaffrath, *et al.*, 2014).

Horizontalfilterbrunnen haben also aus hydraulischer, hydrochemischer und betrieblicher Sicht Vorteile gegenüber Vertikalfilterbrunnen, denen hauptsächlich die höheren Baukosten entgegen stehen (Misstear, Banks & Clark, 2007, S.123). Diese höheren Baukosten für Horizontalfilterbrunnen ergeben sich vor allem durch die vertikalen und horizontalen

Bohrungen. Letztendlich hängt die Entscheidung ob HFB oder VFB von den hydrogeologischen Gesichtspunkten, den Investitionskosten und den Betriebskosten ab und ist für jeden Standort individuell zu klären.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Optimierung von HFB, bzw. die Bevorzugung gegenüber VFB, hat allerdings schon bei entfernter Betrachtung gutes Kostenmanagement, welches eine effiziente Planung, vor allem der kostenintensiven Bohrungen notwendig macht. Dafür sind jedoch die genaue Kenntnis des Gebiets und die vorausgehende gute Voruntersuchung grundlegend.

## 2. Zielsetzung und Vorgangsweise

Das Hauptziel der Arbeit ist die ausführliche Erfassung des Stands des Wissens, der Probleme und Herausforderungen in Theorie und Praxis in den unterschiedlichen Phasen im Lebenszyklus eines Horizontalfilterbrunnens. Der Lebenszyklus eines Brunnens gliedert sich in: Planung – Bau – Betrieb – Regenerierung/Sanierung – Rückbau. In einem ersten Schritt wird mittels Literaturrecherche ein Überblick über die allgemeinen Grundlagen zu Hydrogeologie, Grundwasserleiter, Hydraulik, Modellbildung und Modellanwendung gegeben. In einem zweiten Schritt werden mit Hilfe einer spezifischen Literaturrecherche grundlegende Informationen sowie Angaben zum momentanen Stand der Technik zu den verschiedenen Bereichen des Lebenszyklus eines HFB gesammelt und analysiert. Die Zusammenarbeit mit Firmen liefert Einblicke aus der Praxis. Durch die anschließende Gegenüberstellung von Aussagen aus Theorie und Praxis, sowie durch konkrete Beispiele, werden Herausforderungen im Brunnenbau aufgezeigt und diskutiert. Dabei sollen vor allem folgende Fragestellungen geklärt werden:

- Wie erfolgt die Berechnung in Theorie und Praxis?
- Inwiefern werden Neuerungen aus der Forschung in der Praxis umgesetzt?
- Wo treten am ehesten Fehler im Lebenszyklus auf?
- Wie kann man diese Fehler vermeiden?
- Auf welchem Bereich des Lebenszyklus sollte das Hauptaugenmerk, vor allem für etwaige Verbesserungsvorschläge, liegen?
- Wie steht es um die Zukunft von HFB?

Zusätzlich wird durch die Recherche in den Archiven der Firmen sowie in den Wasserbüchern der Bundesländer eine Datensammlung der HFB in Österreich erstellt und in GIS verarbeitet. Dies soll helfen einen Überblick über die HFB Standorte in Österreich und ihre Eigenschaften zu erhalten. Es werden unter anderem folgenden Fragen beantwortet:

- Wie viele HFB gibt es in Österreich und wo befinden sie sich?
- Zu welchem Zweck werden sie eingesetzt?
- Wie hoch ist die Entnahme?
- Welche Bauformen gibt es?
- Welche Eigenschaften hat der Grundwasserleiter?

### 3. Grundlagen Hydrogeologie und Grundwasserleiter

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über die gebräuchlichen Begriffe, Parameter und Definitionen im Bereich der Hydrogeologie. Dabei wird auf die hydrologischen Kreisläufe und die geologische Ausgangssituation näher eingegangen.

#### 3.1 Wasserbilanz

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Bewirtschaftung von Grundwasser. Dieses ist aber nur ein Teil des Wasserkreislaufs der Erde, der die „ständige Folge der Zustands- und Ortsveränderungen des Wassers mit den Hauptkomponenten von Niederschlag, Abfluss und Verdunstung“ DIN 4049-1 (1992) bezeichnet (Abbildung 3.1) (Hölting & Coldewey, 2012). Der Wasserkreislauf lässt sich grob in der folgenden hydrologischen Grundgleichung beschreiben:

$$\text{Niederschlag} = \text{Verdunstung} + \text{Abfluss}$$

Durch Verdunstung, die wiederum in Transpiration, Evaporation, Interzeptionsverdunstung und Sublimation unterteilt werden kann, gelangt Feuchtigkeit in die Atmosphäre, die dann als Niederschlag zu Boden fällt. Dort verdunstet wiederum ein Teil, der Rest fließt sowohl oberirdisch in Gewässern, als auch unterirdisch als Grundwasser ab, um nach einer gewissen Aufenthaltszeit über Quellen wieder zutage zu treten (Biswas, 1970 zit. in Hölting & Coldewey, 2012, S.74).

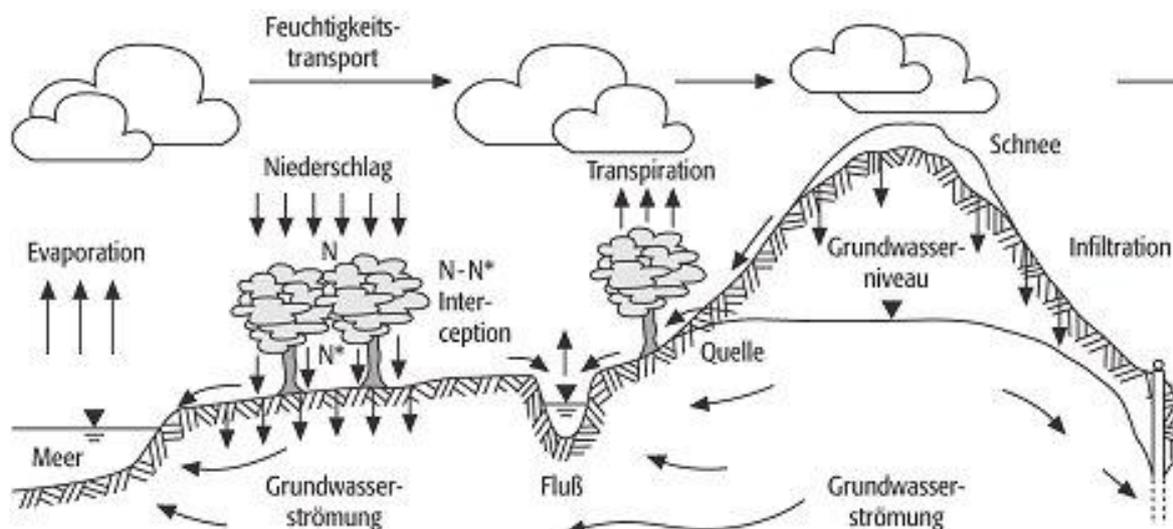


Abbildung 3.1: Wasserkreislauf (aus Spektrum, 2000)

#### 3.2 Wasserbilanz für Einzugsgebiete und Teileinzugsgebiete

Während die Wasserbilanz einerseits für ganze Nationen (Tabelle 3.1 am Beispiel Österreich) und Klimagebiete erstellt werden kann, macht die Betrachtung einzelner Brunneneinzugsgebiete für die Bemessung im Brunnenbau deutlich mehr Sinn. Hierfür werden gebietsspezifische Daten zu Niederschlag, Abfluss und Verdunstung benötigt. Dabei hat die Betrachtung des Bodenwasserhaushalts besondere Bedeutung. Wichtige Komponenten des Bodenwasserhaushalts sind neben Verdunstung, Interzeption und Oberflächenabfluss, auch Interflow, Versickerung, Perkolation und kapillarer Aufstieg sowie Speicherung des Grundwassers (Nachtnebel, 2007, S.6-7).

Dabei versteht man unter Interzeption den Anteil des Niederschlags, der an der Pflanzendecke zurückgehalten wird. Interflow bezeichnet den Abfluss, der in tieferen Schichten abfließt und

nicht zur Grundwasserneubildung beiträgt, und Perkolation meint das Durchsickern des Wassers, wenn die Feldkapazität des Bodens überschritten wird.

Tabelle 3.1: Wasserbilanz von Österreich

<b>Wasserbilanz von Österreich (MW 1981-2010)</b>	<b>mm</b>	<b>km<sup>3</sup></b>
Niederschlag	1100	92,3
Zufluss vom Ausland	310	26
Verdunstung	500	41,9
Oberflächenabfluss	880	73,8
Unterirdischer Abfluss	30	2,5
Summe Abfluss ins Ausland	910	76,3

### 3.3 Grundwasser und Grundwasserleiter

(nach Misstear, Banks & Clark, 2007, S.7)

Laut EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL, 2000/60/EG) ist Grundwasser „alles unterirdische Wasser in der Sättigungszone, das in unmittelbarer Berührung mit dem Boden oder dem Untergrund steht.“ Das Grundwasser wird in den Hohlräumen, Klüften, Spalten und Poren, von Gesteinskörpern gespeichert und transportiert. Folglich kann man zwischen Poren-, Kluft- oder Karstgrundwasser unterscheiden. Solche wasserführenden Gesteinskörper werden Aquifere oder Grundwasserleiter genannt. Grundwasser wird nach dem Wasserstand oder den Wasserdruckverhältnissen charakterisiert. Wenn die obere Grenze eine freie Grundwasseroberfläche bildet, handelt es sich um ein ungespanntes Grundwasser. Ist der Grundwasserleiter gesättigt und liegt die Grundwasserdruckfläche in einem darüber liegenden, gering durchlässigen Horizont oder über der Geländeoberkante, so spricht man von einem gespannten Grundwasser. Grundwassernichtleiter (auch Grundwasserstauer oder Aquiklude) sind Gesteinskörper mit sehr geringer bis praktisch fehlender Permeabilität (Durchlässigkeit). Grundwassergeringleiter (Aquitarde) haben gegenüber benachbarten Schichten eine geringere Durchlässigkeit, können aber im lokalen Zusammenhang für den Grundwassertransport wichtig sein. Wenn Wasser aus einem Grundwasserstockwerk durch einen Grundwassergeringleiter in ein darüber liegendes Grundwasserstockwerk sickert, spricht man auch von einem teilweise gespannten Grundwasser oder einem „leaky“ Aquifer. In Abbildung 3.2 werden die gängigen hydrogeologischen Begriffe bildlich erläutert.

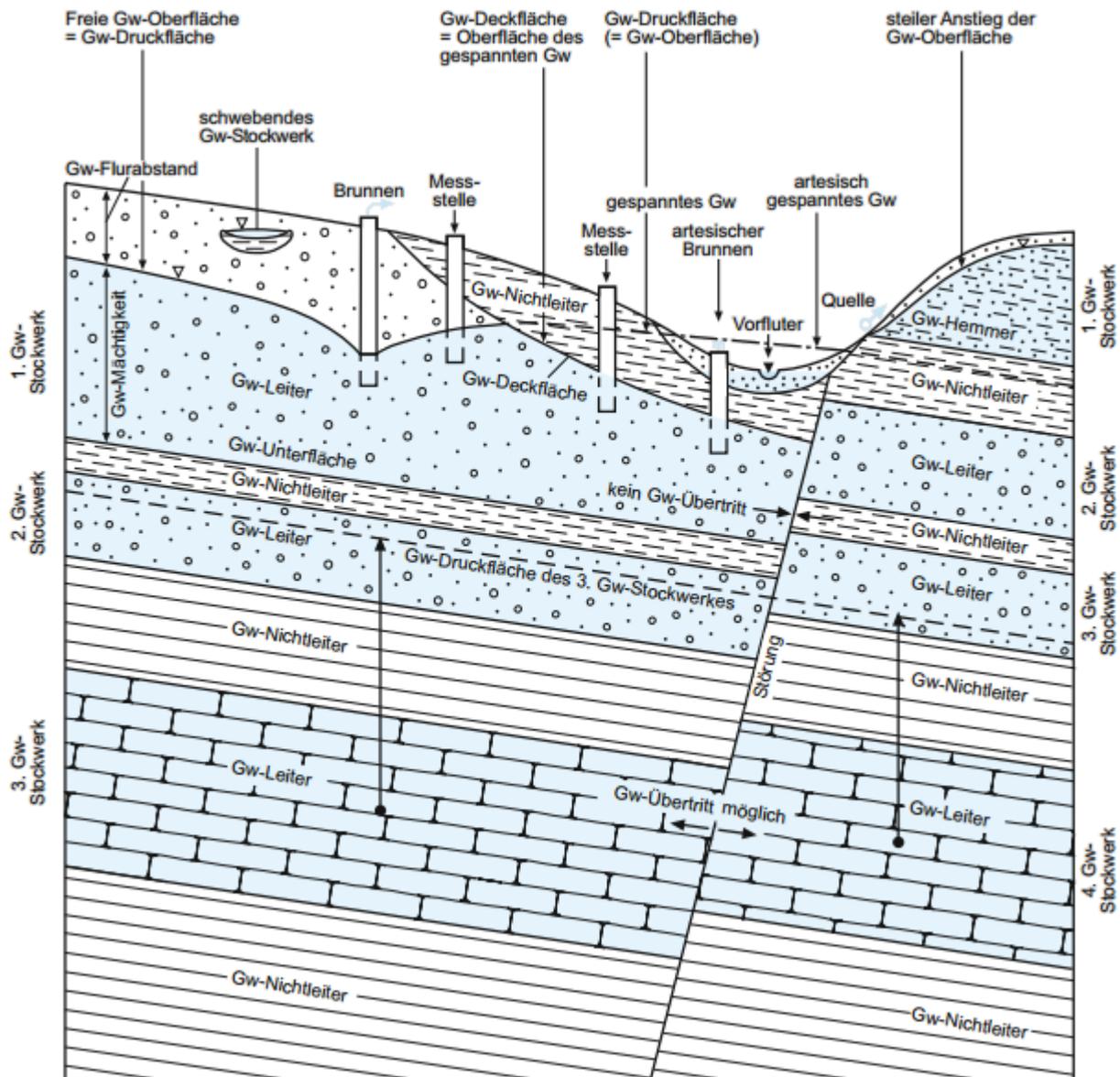


Abbildung 3.2: hydrogeologische Begriffe (Hölting & Coldewey, 2012, S.10)

Grundwasserleiter können verschiedenen geologischen Ursprungs sein. Grob kann man sie in kristalline Gesteine, Fest- und Lockergestein einteilen. Unter kristallinen Gesteinen versteht man die vulkanischen und metamorphen Gesteine, aus denen das sogenannte Grundgebirge in vielen Teilen der Welt gebildet wird. Dabei handelt es sich oft um ganze Formationen, die in erster Linie aus Graniten und aus metamorphen, kristallinen Schiefen aufgebaut sind. In Mitteleuropa sind das z.B. die Böhmisches Masse und die "alten" deutschen Mittelgebirge von den Sudeten bis zum Schwarzwald und der Eifel, sowie dem kristallinen Kern vieler Gebirge z.B. der Zentralalpen (Bundesverband Geothermie, 2016). Grundwassertransport in kristallinen Gesteinen findet vorrangig in Spalten und Rissen statt.

Festgesteine bestehen aus verfestigten Sedimentgesteinen wie Sand- und Kalkstein. Riesige Festgesteinsformationen findet man im „Chalk of England“, den Kalkgesteinen von Florida im Südosten der USA, dem Nubischen Sandstein in Nordafrika und natürlich den Kalkalpen in Österreich. In den Festgesteinen wird Grundwasser durch Karst- und Porenräume transportiert.

Lockergesteine sind relativ junge Sedimente, die von Wasser, Wind oder Gletschern verlagert wurden. Große alluviale Grundwasserkörper befinden sich etwa in den High Plains im Mittleren Westen der USA sowie im Indus in Pakistan. In Österreich gehören dazu unter anderem die klastischen Sedimente des inneralpinen Beckens nördlich der Kalkalpen, sowie die großen fluvialen Schotterkörper. Grundwasserbewegung in Lockergesteinen erfolgt im intergranulären Porenvolumen. Lockergesteine sind nach Korngröße in Steine, Kies, Sand, Schluff und Tone unterteilt und bestehen meist aus Gemischen der verschiedenen Korngrößen-Anteile. Abbildung 3.3 zeigt Kornverteilungen (Summenkurven) typischer Lockergesteine. Die Kornverteilungen sind das Ergebnis von granulometrischen Bestimmungsmethoden. Die Korngröße am Schnittpunkt der 50%-Linie mit der Summenkurve wird als mittlere Korngröße  $d_{50}$  bezeichnet, der Quotient aus den Korngrößen bei 60 %  $d_{60}$  und 10 %  $d_{10}$  wird als Ungleichförmigkeitszahl  $U$  bezeichnet (Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000, S.17). HFB werden hauptsächlich in Porengrundwasserleitern eingesetzt, weswegen von nun an nur mehr solche Grundwasserkörper behandelt werden.

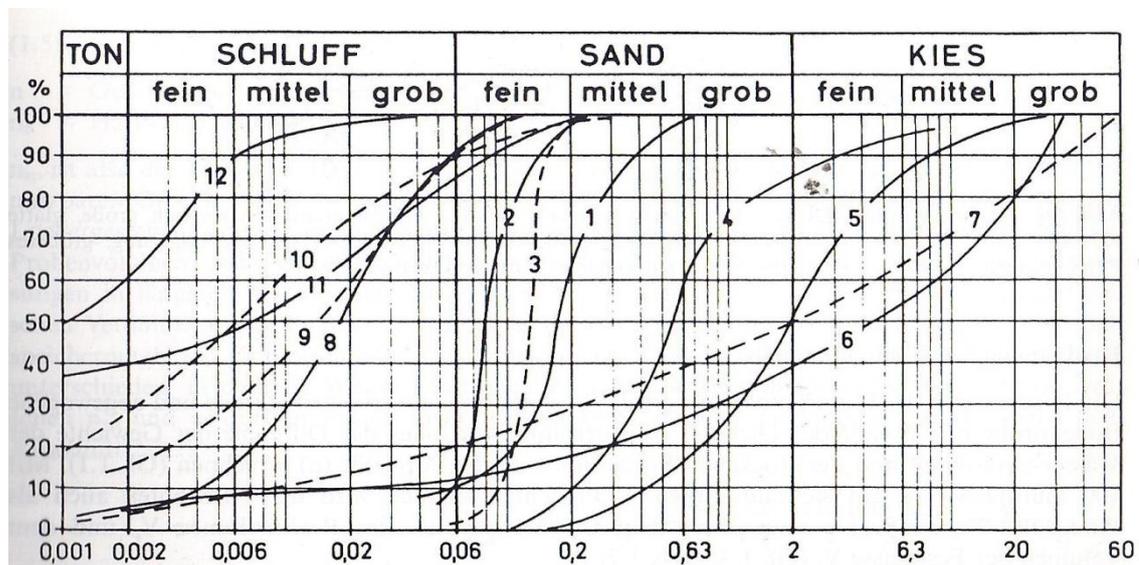


Abbildung 3.3: Kornverteilung typischer Lockergesteine: 1 Fein-/Mittelsand, 2 Feinsand, 3 Flugsand, 4 Flusssand, 5 Kiessand, 6 Hochterassenkies, 7 Verwitterungslehm, 8 Löß, 9 Lößlehm, 10 Lehm, 11 und 12 Ton (Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000, S.17)

### 3.3.1 Einteilung der Grundwasserkörper in Österreich

(nach BMLFUW, Abteilung IV/3, 2011)

Um die Bestimmungen der Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG umzusetzen, wurden die Grundwasserleiter Österreichs zu insgesamt 138 Grundwasserkörpern zusammengefasst. Danach wurden sie in 63 Einzelgrundwasserkörper und 66 Gruppen von Grundwasserleitern eingeteilt (Abbildung 3.4). Zusätzlich wurden dann 9 als Tiefengrundwasserkörpern ausgewiesen. Grundlegend für die Einteilung waren geologischen und hydrogeologischen Karten der Geologischen Bundesanstalt, die Ergebnisse der Messnetze zur Erfassung der Grundwasserbeschaffenheit und der Grundwasserspiegellagen, sowie die Grenzen der Planungsräume

Einzelgrundwasserkörper sind hydrologisch zusammenhängende, aber dreidimensional abgrenzbare Wasservolumen, die meist in quartären Sedimenten vorkommen und deren Aquifere als Porengrundwasserleiter ausgebildet sind. Die übrigen Grundwasserleiter werden zu Gruppen von Grundwasserleitern zusammengefasst, die, je nach vorherrschenden Aquifereigenschaften, in Poren-, Kluft- oder Karstgrundwasserleiter eingeteilt werden.

Tiefengrundwasserkörper werden laut Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG nur dann ausgewiesen, wenn sie sich über einen größeren Bereich erstrecken, durch aktuelle Nutzungen wasserwirtschaftlich relevant sind und genügend Information für eine Beschreibung vorhanden sind.

### Lage und Abgrenzung von Grundwasserkörpern

(Stand: NGP 2015)

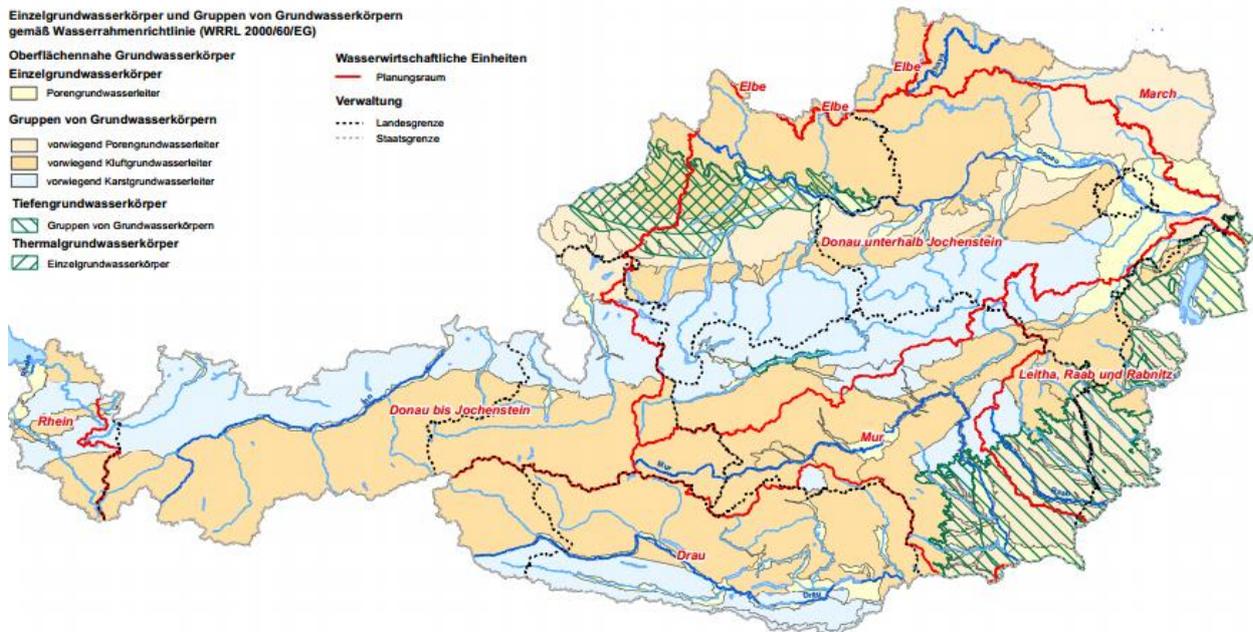


Abbildung 3.4: Grundwasserkörper in Österreich (NGP, 2015)

## 3.4 Porosität

(nach Misstear, Banks & Clark, 2007)

Die Fähigkeit einer geologischen Formation Wasser zu speichern, hängt maßgeblich von ihrem Porenvolumen ab. Dieses entspricht dem Verhältnis zwischen Volumen der Hohlräume zu Gesamtvolumen des Körpers. Werte für eine Auswahl geologischer Formationen sind in Tabelle 3.2 dargestellt. Wie zuvor schon erwähnt, bilden die unterschiedlichen Gesteinsformationen auch unterschiedliche Hohlräume aus. Porenhohlräume, wie sie in Lockergesteinen und teilweise in Festgesteinen zu finden sind, bezeichnet man auch als primäre Porosität, da die Hohlräume zur selben Zeit wie das Gestein entstanden sind. Risse und Spalten in Kristallin- und Festgesteinen entstehen erst im Laufe der Zeit durch chemische oder physikalische Verwitterung und fallen darum unter den Begriff der sekundären Porosität (Abbildung 3.5 a). Erfolgt Grundwassertransport nur durch einen bestimmten Teil der Hohlräume eines Gesteinskörpers, dann spricht man dabei vom effektiven oder nutzbaren Porenvolumen  $n_e$  (Abbildung 3.5 b). Bei Lockersedimenten, die sich auf Grund einer guten Durchlässigkeit besonders zur Grundwassergewinnung eignen, weichen die Werte der Porosität und der effektiven Porosität nur gering voneinander ab (Nemeček, 2006).

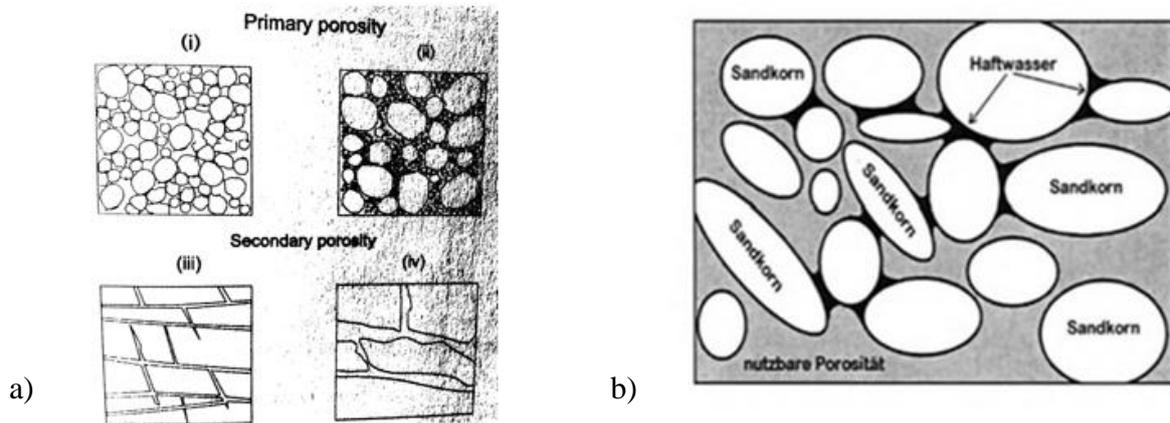


Abbildung 3.5: a) primäre (Lockergesteine i, ii) und sekundäre (Kluft- iii und Karstgesteine iv), b) effektive (nutzbare) Porosität (aus Misstear, Banks & Clark, 2007)

### 3.5 Speicherkoeffizient

(nach Misstear, Banks & Clark, 2007)

Während die Porosität einen Hinweis auf die Wassermenge gibt, die ein Grundwasserleiter theoretisch halten kann, gibt der Speicherkoeffizient an, wie viel tatsächlich gespeichert oder abgegeben werden kann. Der Speicherkoeffizient ist eine dimensionslose Größe und wird mittels Pumpversuch bestimmt. Man unterscheidet zwischen dem Speicherkoeffizienten im gespannten und ungespannten Grundwasser. Im ungespannten Grundwasser entspricht der Speicherkoeffizient der Menge an Wasser, die alleine durch die Schwerkraft pro Einheitsvolumen und Unterschied im Wasserstand um eine Einheit entwässert. Wasser, das sich dann noch in den Poren hält, entspricht der spezifischen Retention. Tonmineralien haben eine sehr hohe spezifische Retention, weswegen sie sich als Grundwasserleiter schlecht eignen. Beim ungespannten Grundwasser entspricht der Speicherkoeffizient der effektiven Porosität. Im gespannten Grundwasser bleibt der Grundwasserleiter nach der Potentialänderung gesättigt. Die Speicherkapazität hängt von Kompressibilität der Gasbläschen im Wasser und der Verformbarkeit des Korngerüsts des Grundwasserleiters ab. Bei einer Zunahme des Porendrucks ermöglicht die elastische Verformung eine Wasserspeicherung im Korngerüst. Dieser elastische Speicherkoeffizient ist meist um zwei bis drei Größen kleiner als der Speicherkoeffizient eines ungespannten Grundwassers. Die Größenordnungen für Speicherkoeffizienten liegen für ungespannte Porengrundwasserleiter bei 0,1 - 0,3 für gespannte zwischen  $10^{-3}$  und  $10^{-6}$  (Nachtnebel, 2007).

Tabelle 3.2: Hydrogeologische Parameter einzelner Gesteine

Lithologie	Porositätstyp	Porosität [%]	Durchlässigkeit [m/d]
Lockergesteine			
Ton	primär	30-60	$10^{-7}$ - $10^{-3}$
Schluff	primär	35-50	$10^{-3}$ -1
Sand	primär	25-50	1-100
Kies	primär	20-40	50-1000
Festgestein			
Ton-Schiefer	sekundär	< 1-10	$10^{-7}$ - $10^{-3}$
Sandstein	<b>primär</b> /sekundär	5-30	$10^{-4}$ -10
Kalkstein	<b>sekundär</b> /primär	1-20	$10^{-4}$ -1000
Kristalline Gesteine			
Granit	sekundär	<1-2	$10^{-8}$ -1
Basalt	sekundär/primär	<1-50	$10^{-8}$ -1000
Schiefer	sekundär	<1-2	$10^{-8}$ - $10^{-1}$

### 3.6 Darcy, Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$ und Transmissivität

(nach Misstear, Banks & Clark, 2007)

Die Grundwasserbewegung in der gesättigten Zone eines Porengrundwasserleiters wird durch die Darcy Gleichung beschrieben. Sie gilt nur für laminare Strömung, welche aufgrund der geringen Geschwindigkeiten in einem Porengrundwasserleiter annähernd gegeben ist.

$$V = k_f * A * i \text{ oder } V = k_f * A * \frac{h}{l} \quad 3.1$$

wobei

- V ... Volumenstrom in [m<sup>3</sup>/s]
- A ... durchflossene Fläche [m<sup>2</sup>]
- $k_f$  ... Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
- h ... Druckhöhenunterschied in [m]
- l ... Fließlänge in [m]
- i ... hydraulische Gradient

Die Darcy Gleichung in dieser Form gibt die pro Zeiteinheit durch einen Porengrundwasserleiter fließende Wassermenge an, wobei die Querschnittsfläche senkrecht zur Fließrichtung liegt. Da die Querschnittsfläche sowohl den Gesteinskörper als auch die Hohlräume beinhaltet, bedarf es der Bestimmung des effektiven Porenvolumens  $n_e$ . Je größer das effektive Porenvolumen, desto größer ist der Durchfluss bei gleichem hydraulischen Gradienten.

Wird die Darcy Gleichung nach  $k_f$  aufgelöst, so ergibt sich:

$$k_f = \frac{V}{A} * \frac{1}{i} \quad 3.2$$

Dies zeigt, dass bei einem bekannten Volumenstrom und einer bestimmten Querschnittsfläche der Durchlässigkeitsbeiwert zum hydraulischen Gradienten umgekehrt proportional ist. Je größer das Gefälle  $i$ , desto kleiner ist der Durchlässigkeitsbeiwert. In der Praxis findet diese Erkenntnis in der qualitativen Beurteilung der Durchlässigkeitsverhältnisse in einem Grundwasserleiter ihre Anwendung. So gilt, je größer das Grundwassergefälle  $i$ , desto geringer ist seine Durchlässigkeit. Bei der Beurteilung von Grundwassergleichenkarten lässt sich so aus den Abständen der Grundwassergleichen auf die Durchlässigkeit des Untergrundes schließen (Hölting & Coldewey, 2012, S.25).

Oft wird in der Literatur der Begriff der hydraulischen Durchlässigkeit mit dem der Permeabilität gleichgesetzt. Während die hydraulische Durchlässigkeit vom Fluid Wasser ausgeht, berechnet sich die Permeabilität über die dynamische Viskosität und die Dichte der Flüssigkeit wie folgt:

$$k = \frac{k_f * \mu}{\rho * g} \quad 3.3$$

wobei

- $k$  ... Permeabilität in [ $m^2$ ]
- $k_f$  ... hydraulische Durchlässigkeit [ $m/s$ ]
- $\mu$  ... dynamische Viskosität in [ $g/m*s$ ]
- $\rho$  ... die Fluidichte in [ $g/m^3$ ]
- $g$  ... die Erdbeschleunigung in [ $m/s^2$ ]

Die Permeabilität ist vor allem im Erdölabbau interessant, da mehrphasige Flüssigkeiten mit unterschiedlicher Viskosität verwendet werden. Im Brunnenbau bewegt man sich meist in einem ähnlichen Temperaturbereich des Wassers, in dem die Viskosität nur geringfügig schwankt, sodass man vorrangig mit der hydraulischen Durchlässigkeit rechnen kann.

Ein weiterer Begriff ist die Transmissivität, welche als Summe der Produkte der Durchlässigkeitsbeiwerte und der jeweiligen Mächtigkeit der grundwassergefüllten Schicht über den gesamten Grundwasserleiter definiert ist. Allgemein gilt:

$$T = \sum_{i=1}^n k_{f_i} * b_i \quad 3.4$$

wobei

- $T$  ... Transmissivität in [ $m^2/s$ ]
- $k_f$  ... Durchlässigkeitsbeiwert [ $m/s$ ]
- $b$  ... Mächtigkeit der jeweiligen Schicht in [ $m$ ]

Die Transmissivität wird der Inhomogenität der Durchlässigkeit in den Schichtfolgen eher gerecht als der Durchlässigkeitsbeiwert und kann daher näherungsweise sogar für Kluffgesteine gelten (Hölting & Coldewey, 2012, S.33).

## 4. Grundlagen Hydraulik, numerische Lösung und Modellanwendung

Die hydraulischen Grundlagen beschäftigen sich mit der Grundwasserbewegung und ihren mathematischen Lösungsansätzen. Dabei werden die Uferfiltration und die Anströmung zum Brunnen gesondert betrachtet und ihre analytischen und empirischen Lösungen vorgestellt.

Zusätzlich wird ein Überblick über die Methodik der numerischen Lösung, die Modellbildung und Modellanwendung gegeben.

## 4.1 Grundwasserbewegung

(nach Misstear, Banks & Clark, 2007)

Grundwasser fließt unter natürlichen Gegebenheiten vom Ort der Anreicherung oder Neubildung zu Abflusspunkten, wie Quellen oder Oberflächengewässern. Bestimmt wird die Grundwasserbewegung durch das Druckgefälle, die Durchlässigkeit des Grundwasserleiters und durch die Fließeigenschaften des Wassers. Das Druckgefälle ist die Differenz im Wasserdruck zwischen den Punkten von Anreicherung und Austritt und dem Fließpfad. Ob es sich bei den Fließeigenschaften von Wasser um eine laminare oder eine turbulente Strömung handelt, lässt sich am besten durch die Reynoldszahl ausdrücken. Diese wird wie folgt definiert:

$$Re = \frac{v*d}{\nu} \quad 4.1$$

wobei

- R ...Reynoldszahl
- v ... Fließgeschwindigkeit [m/s]
- d ... durchschnittliche Porendurchmesser [m]
- $\nu$  ... kinematische Viskosität [m<sup>2</sup>/s]

Studien zeigen, dass bei einer Reynoldszahl von unter 1, laminare Strömung zu finden ist und der Umbruch zu turbulenter Strömung bei Werten zwischen 1-10 passiert. Meist findet man in der Grundwasserbewegung aber Werte unter 1 vor (Misstear, Banks & Clark, 2007, S.20).

Um nun den Grundwassertransport zu beschreiben, stellt man zunächst eine Bilanzgleichung wie folgt auf:

$$Q_Z(t) + Q_A(t) = \frac{dS(t)}{dt} \quad 4.2$$

Die Differenz zwischen zu- und abströmender Wassermenge ergibt die Änderung des Speicherinhalts über die Zeit. Daraus ergibt sich bei dreidimensionaler Betrachtung:

$$[Q_x(t) - Q_{x+\Delta x}(t)] + [Q_y(t) - Q_{y+\Delta y}(t)] + [Q_z(t) - Q_{z+\Delta z}(t)] = S_s * \frac{\partial h}{\partial t} \quad 4.3$$

Berücksichtigt man zusätzlich das Gesetz von Darcy so ergibt sich:

$$\frac{\partial}{\partial x} * [k_{xx} * h * \frac{\partial h}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} * [k_{yy} * h * \frac{\partial h}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial z} * [k_{zz} * h * \frac{\partial h}{\partial z}] = S_s * \frac{\partial h}{\partial t} + W \quad 4.4$$

wobei

- $k_{xx}, k_{yy}, k_{zz}$  ... die Durchlässigkeit in x-, y- bzw. z-Richtung [m/s]
- h ... Druckhöhe [m]
- $S_s$  ... spezifische Speicherkoefizient [-/m]
- t ... Zeit [s]
- W ... Quellen- und Senkenterm

Die allgemeine Grundwasserströmungsgleichung (4.4) ist eine partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung. Die Lösungen der stationären und instationären

Grundwasserströmungsgleichung erfolgt mittels analytischer oder numerischer Methoden oder anhand von empirischen Formeln bzw. Näherungslösungen.

Sowohl die analytischen als auch die numerischen Lösungen verlangen neben der Spezifizierung der hydraulischen Parameter, die Festlegung von Randbedingungen und bei instationären Strömungen auch der Anfangsbedingungen (Koch, 2004).

Arten von Randbedingungen (nach Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000, S.129):

- **1.Art (Dirichlet-Bedingung):** Festpotentialrand. Das Potential ist am Rand in Abhängigkeit von Zeit und Ort bekannt. Typische Anwendung bei der Darstellung von Wasserständen in Flüssen, Seen oder Brunnen.
- **2.Art (Neumann-Bedingung):** Vorgegebener fester Randzufluss.  $Q$  ist als Funktion von Ort und Zeit bekannt. Eine häufige Annahme bei analytischen Lösungen ist  $q=0$ . Typische Anwendung bei der Darstellung von Kolmation in Gewässerbetten oder dem Skin-Effekt in Brunnen.
- **3.Art (Cauchy –Bedingung):** „Leakage“- Rand. Wie bei der Bedingung 1. Art ist hier das Potential bekannt, es existiert jedoch ein zusätzlicher Fließwiderstand. Typischer Einsatz wiederum bei der Simulation von Zufluss durch die Kolmationsschicht oder dem Skin-Effekt in Brunnen.

Die Anfangsbedingung ist der Zustand der Strömung (Grundwassergleiche  $h$ ) zum Zeitpunkt  $t=0$ .

### 4.1.1 Spezifische Randbedingungen für die Grundwasserbewegung

(nach Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000)

In Gewässerbereichen, in denen die Fließgeschwindigkeit verringert wird, lagern sich feinkörnige, schlecht durchlässige Sedimente ab. Dieser Vorgang wird vor allem durch ufernahe Filtration verstärkt. Mögliche Ursachen sind neben der Ablagerung von Sedimentpartikeln (Kolmation) auch abgelagerte oder an der Gewässersohle lebende Mikroorganismen, insbesondere fadenartige und solche mit kieselsäurehaltigen Schalen, und unlösliche Fällungsprodukte, wie Eisen-, Mangan- und Calcium-Verbindungen. Zusätzlich hängt die Verdichtung von der Infiltrationsrate ab. Durch eine höhere Förderrate beschleunigt sich die Ausbildung der Selbstdichtungsschicht und der Uferfiltrat-Anteil an der Fördermenge nimmt ab. Dieser Vorgang ist jedoch reversibel und die Selbstdichtungsschicht kann durch Suffusion und Erosion wieder abgetragen werden. Diese Dichtungserscheinungen kommen auch bei Nicht-Uferfiltratbrunnen vor und sind eine Hauptursache der Brunnenalterung (7.3.3).

**Kolmation** ist die Verdichtung eines Erdstoffes (Filtermaterials) durch Ablagerung von Sink- und Schwebstoffen. Dabei werden immer feinere Partikel abgelagert, welche die Durchlässigkeit des Porenraumes verringern. Man unterscheidet zwischen innerer Kolmation, welche die Ablagerung im Porenraum bezeichnet und die hauptsächlich durch den Eintritt von Wasserinhaltsstoffen beeinflusst ist, und äußerer Kolmation, welche die Ablagerung am äußeren Rand eines Mediums meint und die insbesondere durch die Schwerkraft und den hydrodynamischen Strömungsdruck hervorgerufen wird (Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000, S.209).

Die **Suffosion** ist der umgekehrte Vorgang der Kolmation, bei dem die Feinteile des Lockergesteins „ausgespült“ werden, während das tragende Skelett bestehen bleibt. Dadurch erhöht sich die Durchlässigkeit des Mediums und seine Dichte verringert sich. Man unterscheidet zwischen innerer und äußerer Suffosion, sowie Kontaktsuffosion (Balke, Beims, Heers, *et al.*,

2000, S.392). Laut Balke, Beims, Heers, *et al.* (2000) ist Suffosion ab Ungleichförmigkeitsgraden  $>6$  zu erwarten.

Im Gegensatz zur Suffosion sind bei der **hydromechanischen Erosion** nicht nur die Feinteile, sondern alle vorkommenden Korngrößen an der Umlagerung beteiligt. Man unterscheidet äußere und innere Erosion, sowie Fugen und Kontakterosion (Pfeil, 2014).

Ein weiterer Begriff ist der des **Skin Effekts**, damit ist ein zusätzlicher hydraulischer Widerstand unmittelbar am Brunnenmantel, dem Filterkies oder dem Filterrohr gemeint, der aus Kolmationsprozessen während des Bohrvorgangs oder aus unerwünschten Erdstoffverformungen während des Betriebs resultiert. Der Skin Effekt macht sich durch eine zusätzliche Brunnenabsenkung während der Förderphase bemerkbar. Vom Skin Effekt begrifflich zu unterscheiden sind Brunneneintrittswiderstände, welche durch eine Fehlbemessung der Filterrohre und des Filterkieses entstehen.

## 4.2 Analytische Lösungen

Analytische Methoden verstehen die direkte Integration der Gleichung anhand der jeweiligen Rand- und bei instationären Prozessen Anfangs-Bedingungen. Sie liefern eine Lösung der partiellen Differentialgleichung für jeden Zeitpunkt und über die gesamte Raumdomäne. Man erhält also einen geschlossenen analytischen Ausdruck für die Standrohrspiegelhöhe  $h$ , der jedoch häufig numerisch berechnet werden muss (Koch, 2004). Analytische Lösungen existieren vorwiegend für 1D-Probleme unter der Annahme von örtlich konstanten hydraulischen Parametern und für Spezialfälle nach Vereinfachungen.

Bei der Berechnung von Grundwasserströmungsproblemen spielt zudem das sogenannte Superpositionsprinzip eine Rolle. Dabei werden analytische Lösungen überlagert, wenn die beschreibende Grundgleichung linear im Potential und den Ableitungen ist, und so neue Lösungsfunktionen mit komplizierteren Anfangs- und Randbedingungen aus den bekannten einfachen gebildet. Man unterscheidet zwischen räumlicher und zeitlicher Superposition und es lassen sich somit genauere Ergebnisse erzielen (Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000, S.200).

Folgend werden analytische Lösungen von Spezialfällen der Grundwasserbewegung in gespanntem und ungespanntem Grundwasser, der stationäre Anströmung zum VFB, der Uferfiltration, der stationäre Anströmung zum HFB und zum verlaufsgesteuerten HFB beschrieben. Außerdem werden Berechnungsmethoden aus der Literatur vorgestellt und auftretende Begriffe erklärt.

### 4.2.1 Grundwasserbewegung in einem gespannten Grundwasserleiter

(nach. Misstear, Banks & Clark, 2007)

Bei der Berechnung der Grundwasserbewegung in einem gespannten Grundwasser liegen folgende Vereinfachungen vor:

- Der Grundwasserleiter ist gespannt, homogen und isotrop
- Es handelt sich um eine nicht komprimierbare Flüssigkeit
- Grundwasserbewegung ist stationär
- Wassertransport nur innerhalb des Grundwasserleiters, kein Zufluss und Abfluss aus dem Grundwasserleiter

Dem entsprechend ergeben sich folgende Gleichungen:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S \cdot \partial h}{T \cdot \partial t} \quad 4.5$$

Dabei ist  $\frac{T}{S}$  die hydraulische Diffusivität. Bei stationären Verhältnissen ändert sich die Druckhöhe nicht mit der Zeit und man erhält für die LAPLACE Gleichung:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad 4.6$$

Die Lösung der Laplace Gleichung ergibt die Druckhöhe in den x, y und z Koordinaten. Gleichung 4.5. bestimmt die Druckhöhe an jedem Ort im dreidimensionalen System zu jeder Zeit t. Die Gleichungen werden oft um eine oder zwei Dimensionen gekürzt, da die Lösung mittels graphischer, analytischer oder numerischer Methoden dann einfacher ist (Misstear, Banks & Clark, 2007).

Eine zweidimensionale Betrachtung eines Porengrundwasserleiters ist meist zulässig, da Porengrundwasserleiter, auf Grund von Schichtung und Lagerungseffekten, in horizontaler Flussebene oft sehr ähnliche Durchlässigkeiten zeigen, während die vertikale Durchlässigkeit oft sehr viel geringer ist. Das Verhältnis  $\frac{k_{fh}}{k_{fv}}$  wird als Anisotropiefaktor bezeichnet (Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000).

#### 4.2.2 Grundwasserbewegung in einem ungespannten Grundwasserleiter

Die Darcy Gleichung kann vereinfacht für den Wassertransport in einem gespannten Grundwasserleiter unter stationären Bedingungen angewendet werden, weil sie davon ausgeht, dass der Abfluss proportional zum hydraulischen Gradienten verläuft. In einem ungespannten Grundwasserleiter ist das jedoch nicht unbedingt der Fall, da das Druckliniengefälle entlang des Fließweges größer wird, weil die wassergesättigte Schicht (und folgend die Transmissivität) abnimmt je mehr der Wasserstand sinkt und der Wasserstand in der Berechnung gleichzeitig in die Querschnittsfläche ( $A=h*b$ ) und den Wasserstandsgradienten ( $dh/dx$ ) eingeht. Eine Lösung dafür fanden DUPUIT und FORCHHEIMER, indem sie, unter der Voraussetzung, dass die Bewegung in vertikaler Richtung wie bei Darcy horizontal ist und dass q gegen unendlich horizontal ist, das zweidimensionale Problem um eine Dimension minimierten (Misstear, Banks & Clark, 2007). Damit erhält man für den Abfluss:

$$q = -K * H * \frac{dH}{dx} \quad 4.7$$

wobei

- Q ... Grundwasserdurchfluss [m<sup>2</sup>/s]
- K ... Hydraulische Durchlässigkeit [m/s]
- H ... Wasserdruckhöhe bezogen auf die undurchlässig Schicht [m]
- $\frac{dH}{dx}$  ...hydraulische Gradient

Integriert man diese Formel und setzt man die Randbedingungen  $H = H_0$  bei  $x = 0$  und  $H = H_L$  bei  $x = L$ , so bekommt man die Abflussformel nach DUPUIT-FORCHENHEIMER:

$$q = \frac{K}{2*L} * (H_0^2 - H_L^2) \quad 4.8$$

Die Gleichung eignet sich gut um Grundwasserneubildung oder Brunnenanströmung zu berechnen, wird aber immer ungenauer je steiler das Druckliniengefälle wird (Misstear, Banks & Clark, 2007).

#### 4.2.3 Hydraulische Bedingungen der Uferfiltration

(nach Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000, S. 551)

Die Uferfiltration kann durch die speziellen Randbedingungen als Sonderfall der allgemeinen Grundwasserströmung hydraulisch beschrieben werden. Der Strömungsvorgang wird mit Hilfe der DARCY Gleichung genähert. Unter den vereinfachten DUPUIT FORCHENHEIMER Annahmen, dass die Filtergeschwindigkeit über die Tiefe konstant und horizontal gerichtet ist, gilt:

$$q = -T * \frac{dh}{dx} \quad 4.9$$

wobei

- Q ... Durchfluss [m<sup>2</sup>/s]
- T ... Transmissivität [m<sup>2</sup>/s]
- H ... Tiefe [m]

Die Uferfiltration wird dabei durch eine zusätzliche Randbedingung berücksichtigt. Die vertikale Zuflussgeschwindigkeit  $v_n$  durch selbstverdichtete Gewässersohlen wird schematisch durch folgende Gleichung beschrieben:

$$v_n = kf' * \frac{H_F - h(x,y)}{d} \quad 4.10$$

wobei

- kf' ... der Durchlässigkeitsbeiwert der Selbstverdichtung [m/s]
- H<sub>F</sub> ... der Wasserstand im Oberflächengewässer [m]
- H<sub>(x,y)</sub> ... Wasserstand im Grundwasserleiter [m]
- d ... Mächtigkeit der Selbstdichtungsschicht [m]

#### 4.2.3.1 Berechnung – Vergleich Literatur

Es gibt viele wissenschaftliche Publikationen, die sich mit der analytischen Lösung der Grundwasserbewegung bei der Uferfiltration beschäftigen. Hantush & Papadopoulos (1962) lieferten zu allererst analytische Berechnungen zur Absenkung infolge von Entnahme in HFB in ungespanntem Grundwasser. Das von ihnen angewandte Szenario für die Anwesenheit eines Flusses ist jedoch nicht geschaffen, um die Effekte im Flussbett zu beschreiben. Danach wurden verschiedene semi-analytische Lösungen zur Darstellung der Uferfiltration vorgestellt. Sun & Zhan (2006) berechnen die Filtration von einem Reservoir zu einem HFB. Dabei wurde ein Brunnen mit unendlicher Ausdehnung unterhalb des Reservoirs simuliert. Zwischen dem Brunnen und dem Reservoir wurde eine Aquitarde bestimmter Dicke mit vertikaler Durchlässigkeit und spezifischem Speicherkoefizienten angenommen. Tsou *et al.* (2010) leiteten eine analytische Lösung für die Verteilung des Wasserstandes her, der sich durch Pumpen in einem einseitigen Brunnen in einem gespannten Grundwasserleiter neben einem durchlässigen Fluss einstellt. Allerdings vernachlässigt diese Studie den Effekt, den ein gering durchlässiges Gewässerbett mit sich bringt. Huang, Tsou & Yeh (2012) nehmen sich diesem Thema an und entwickeln eine analytische Lösung, basierend auf den FOURIER- und LAPLACE-Transformationen. Sie kommen zu dem Schluss, dass stationäre Infiltration nur vom Verhältnis der Durchlässigkeit von Gewässerbett zu Grundwasserleiter abhängt. Sie betrachten den gleichmäßigen Zufluss entlang eines Brunnens und ein darüber liegendes halbdurchlässiges Flussbett.

#### 4.2.4 Stationäre Brunnenanströmung Vertikalfilterbrunnen

Wenn ein Brunnen in Betrieb ist, verändert sich die natürliche Grundwasserbewegung. Wird Wasser aus dem Brunnen gepumpt, so entwickelt sich eine Druckdifferenz zwischen Brunnen und Grundwasserleiter, sodass Wasser in den Brunnen fließt und der Grundwasserstand im

Aquifer ringsum niedriger wird. Dies führt zur Bildung eines rotationssymmetrischen Absenktrichters, welcher in den Standrohrspiegelhöhen gemessen werden kann. Aufgrund dieses radialen Wirkungsbereichs werden die Koordinaten für die Berechnung nach  $r = (x^2+y^2)^{1/2}$  umgeformt und man erhält für den zweidimensionalen Durchfluss in einem gespannten Grundwasserkörper (Misstear, Banks & Clark, 2007, S.26):

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad 4.11$$

Die Berechnung der instationären Anströmung zu einem Brunnen erfolgt meist durch die Analyse eines Pumpversuchs. Eine analytische Lösung für den stationären Zustand liefern DUPUIT und THIEM unter folgenden Bedingungen: (nach Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000, S.140)

- Grundwasserleiter hat theoretisch unendliche Ausdehnung
- Grundwasserleiter ist homogen, isotrop und seine Mächtigkeit verändert sich nicht
- Gespannte und horizontale Anordnung
- Brunnen ist vollkommen
- Horizontale Anströmung
- Konstante Fördermenge
- Brunnendurchmesser theoretisch unendlich klein

Sofern diese Vereinfachungen angenommen werden können, kann man mit der DUPUIT-THIEM'schen Brunnenformel die Anströmung berechnen:

$$Q = kf * \pi * \frac{h_2^2 - h_1^2}{\ln r_2 - \ln r_1} \quad 4.12$$

wobei

- $k_f$  ... Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
- $h_1$  ... Standrohrspiegelhöhe im Abstand  $r_1$  vom Entnahmepunkt [m]
- $h_2$  ... Standrohrspiegelhöhe im Abstand  $r_2$  vom Entnahmepunkt [m]
- $r$  ... radialer Abstand vom Entnahmepunkt [m]
- $Q$  ... Volumenstrom [m<sup>3</sup>/s]

Die berechnete Anströmung wird auch als **Ergiebigkeit oder Wasserandrang** bezeichnet. Sie beschreibt unabhängig von der Bauform des Brunnens den Fördervolumenstrom, der in Folge der Absenkung aus dem Grundwasserleiter zuströmt. Im Unterschied dazu steht das **technische Fassungsvermögen** eines Brunnens (5.1), welches die technisch mögliche Brunnenleistung bei stationären hydraulischen Randbedingungen bezeichnet. Gemeinsam bezeichnen diese beiden Begriffe die Leistungsfähigkeit eines Brunnens.

Die hydraulische Betrachtung des VFB ist für die Berechnung des HFB relevant, da nach Annahmen von Balke *et al.* (2000) ab einem gewissem Grenzbereich die Berechnung als VFB erfolgen kann (4.2.5).

#### 4.2.5 Stationäre Anströmung zum Horizontalfilterbrunnen

Wie zuvor erwähnt, erfolgt die Zuströmung beim Horizontalfilterbrunnen über die horizontalen Stränge, die teilweise in mehreren Schichten angeordnet sein können. Deshalb ist nicht davon auszugehen, dass es sich um einen symmetrischen Absenktrichter handelt. Vielmehr bildet sich eine von Lage und Länge der Stränge abhängige Potentialfläche oder im Falle eines ungespannten Grundwassers eine Grundwasseroberfläche aus. Nemeček (2006) bezeichnet das Strömungsbild im Schnitt als Absenkmulde, die kein Gegengefälle aufweist. Er merkt außerdem

an, dass bei geringer Entnahme die Stromlinien der obersten Grundwasserschicht vom Brunnen nicht einbezogen werden.

Bei seinen Versuchen zeigt Nemeček (2006) auch, dass, bei der Betrachtung im Grundriss, die Filterstränge entgegen der Fließrichtung eine höhere Förderrate aufweisen. Er erklärt, dass sogar  $Q/8$  des Gesamtfördervolumens im entgegen der Strömung liegenden Filterstrang ankommen, während nur  $2/3$  des gegenüber liegenden Rohres einen Beitrag zum Fördervolumen leisten (Abbildung 4.1). Erst bei Steigerung der Entnahmemenge wandert die Scheitelung und die Förderung durch die Stränge in Fließrichtung wird stärker.

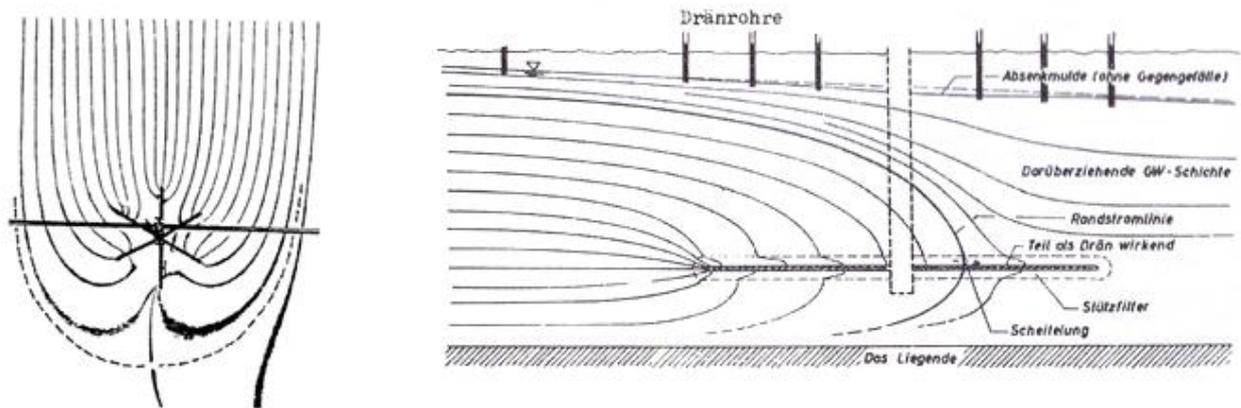


Abbildung 4.1: Anströmverhältnisse eines HFB nach NEMECEK (1959) im Grundriss und Schnitt (aus Nemeček 2006)

Grombach (2000, S.417) bezeichnet die Absenkung als Absenkungsteller und konkretisiert, dass dieses Strömungsbild nur zu Stande kommt, wenn eine ausreichende Anzahl an Strängen gleicher Länge, gleichmäßig über den Fassungsraum verteilt ist. Hantush & Papadopulos (1962) meinen zudem, dass eine höhere Anzahl von Strängen zu einer verhältnismäßig geringeren Absenkung führt.

Für die absolut gleichmäßige Bauform eines HFB modellierte Zeller (1957, zit. in Grombach, 2000, S.417) die Anströmisohipsen der einzelnen Stränge. Es lassen sich gut die Anströmtäler erkennen, die sich im Bereich der Stränge bilden und erst außerhalb der Strangköpfe abklingen, um wieder eine Kreisform zu bilden (Abbildung 4.2). Dies ist die Grundlage für die in 4.2.5.1 folgenden Annahmen von Balke, Beims, Heers, *et al.* (2000, S.231).

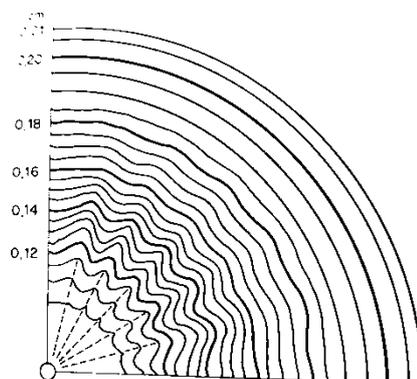


Abbildung 4.2: Anströmisohipsen nach Zeller (aus Nemeček 2006)

#### 4.2.5.1 Berechnung

Da die Entnahme von einem Punkt ausgeht und das Potentialgefälle zu jenem hin verläuft, definieren Balke, Beims, Heers, *et al.* (2000, S.231) einen Grenzbereich, ab welchem die Berechnung mittels DUPUIT THIEM' scher Brunnenformel (4.2.4) zulässig ist und der Horizontalfilterbrunnen quasi als Vertikalfilterbrunnen betrachtet wird. Dieser unbeeinflusste Bereich wird mit einem Radius größer 80 m abgegrenzt. Für die Berechnung stellen sie folgende Bedingungen auf:

- Die äußeren Randbedingungen müssen mehr als 80 m vom Brunnen entfernt sein
- Die Stranglänge soll mindestens 10 m betragen und 40 m möglichst nicht überschreiten
- Viele kurze Stränge sind besser als wenige lange
- Bei großen Strangzahlen ist der schachtnahe Bereich vollwandig auszuführen, sodass der Zufluss vorrangig in der Strangspitze erfolgt
- Die Mindestvollrohrlänge ist 2 m
- Die maximale Absenkung soll mindestens 1m über der Strangachse liegen, (Die Einströmgeschwindigkeit ist eine Funktion der Höhe des Wasserstandes über dem Filterrohr, um ausreichende Entsandung zu erreichen)

Um die Strömungsverhältnisse eines Horizontalfilterbrunnens verständlich zu machen, wird zunächst ein Brunnen mit radialsymmetrischen Filtersträngen gleicher Länge untersucht. Abbildung 4.3 zeigt die theoretische Anströmung zu so einem HFB und ihren Absenktrichter nach DUPUIT –THIEM. Obwohl dieser Berechnung starke Vereinfachungen zugrunde liegen, wird in der nachfolgenden Formel für die Berechnung der Absenkung im Brunnenschacht  $s_0$  die Komplexität der Anströmung zum HFB sichtbar:

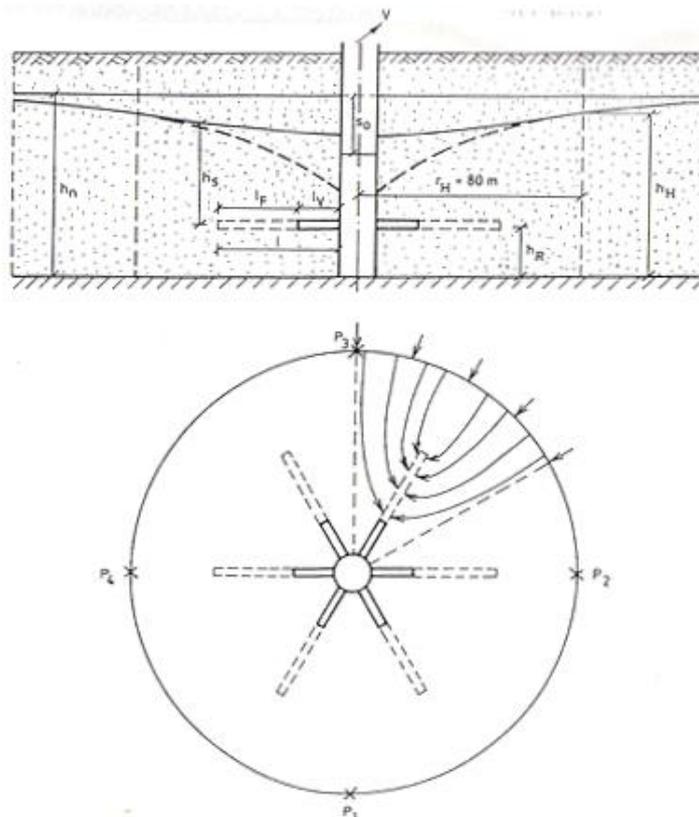


Abbildung 4.3: Schema HFB in Schnitt und Grundriss nach Balke et al. (2000, S.232)

$$s_0 = h_H - \sqrt{2 * \Phi_0} \quad 4.13$$

mit

$$\Phi_0 = \Phi_H - \frac{400}{E} * \left( \frac{Q}{73,2 * A * d_i} \right)^{\frac{6}{5 * U}} * \left[ \frac{1 + \frac{1}{d_i} * \left( \lambda_v * l_v + \frac{3 * \lambda_F * l_F}{0,3 * l_F - 1} \right)}{1,3 * k_f * d_i * \sqrt{n}} \right]^{\frac{2}{5 * U}} \quad 4.14$$

wobei

- $\Phi_H$  ... Potential an der Stelle  $r_H=80m$ ;  $= \frac{h_n^2}{2} - \frac{Q}{4 * \pi * k_f} * \varphi_2(r_H)$  für ungespannte Verhältnisse  
 $h_H$  ... Höhe an den in Abbildung 4.3 ersichtlichen Punkten P<sub>1</sub>-P<sub>4</sub>, wenn sich die Werte nicht signifikant unterscheiden, ist eine rotationssymmetrische Absenkung gegeben; [m]  
 $n$  ... Zahl der Stränge  
 $d_i$  ... Innendurchmesser der Stränge [m]  
 $l_v$  ... Vollrohrlänge [m]  
 $l_F$  ... Filterrohrlänge [m]  
 $h_R$  ... Höhe der Strangachsen [m]

Die Beiwerte A, U,  $\lambda_v$ ,  $\lambda_F$ , E lassen sich anhand dieser Größen berechnen bzw. nach Abbildungen und Näherungswerten schätzen. Siehe dazu Balke, Beims, Heers, *et al.*, (2000, S.233-234).

Haitjema, Kuzin, Kelson, *et al.* (2010) verwenden einen Ansatz nach DUPUIT-FORCHHEIMER um einen HFB mit 5 Filtersträngen zu beschreiben.

#### 4.2.5.2 Empirische Betrachtung nach NEMEČEK (2006)

Nemeček (2006) definiert, dass durch die Absenkung Strömungsweg und Strömungsgeschwindigkeit zum Brunnenschacht verändert werden, und dass die entstehende Potentialfläche dadurch und durch das Eintreten des Grundwassers in die Filterrohre und das Durchströmen dieser, beeinflusst wird. Demnach ist:

$$h_S = h_f + h_e + h_r \quad 4.15$$

wobei

- $h_S$  ... Absenkung [m]  
 $h_f$  ... Zuströmwiderstand [m]  
 $h_e$  ... Einströmwiderstand [m]  
 $h_r$  ... Rohrreibung [m]

Die Bestimmung der Rohrreibung wurde mittels Durchflussmessungen an bandagierten Ranney-Rohren durchgeführt. Nemeček (2006) kommt auf einen Wert von 0,2 m pro 30 m Stranglänge.

Für die Berechnung des Einströmwiderstands  $h_e$  ist es notwendig die Gesamteintrittsfläche pro Filterrohrlänge mittels Abmessung der Schlitzweiten zu eruieren. Dabei ist es wichtig die Filterstränge, die dem Grundwasserstrom entgegen gerichtet sind, an der Rohrspitze am stärksten zu beaufschlagen. Dennoch schlägt Nemeček (2006) vor, dass für  $h_e$  insgesamt nur einige cm angesetzt werden. Chen, Wan & Zhan (2003) sind ebenfalls dieser Ansicht.

Für die Bestimmung des Zuströmwiderstands  $h_f$  ist es wichtig das Verhältnis aus  $b_0$  und  $h_{GW}$  zu kennen. Dieses gibt Aussage über die Quetschung des Einströmkörpers, die laut Nemeček (2006) von der Mächtigkeit und Durchlässigkeit des Grundwasserleiters, von der Entnahmemenge und dem Grundwasserspiegelgefälle abhängt und zu einer Verlängerung des Zuströmwegs einzelner Stromfäden und damit zu einer Erhöhung der Absenkung führt. Dabei ist  $b_0$  die Einzugsbreite der Absenkmulde und  $h_{GW}$  die Mächtigkeit des Grundwasserleiters. Ist das Verhältnis sehr groß, so unterscheidet sich die Randstromlinie der Absenkmulde quasi nicht von jener in der Ebene der Horizontalstränge. Das Verhältnis sollte mindestens 10 betragen, um mit den Werten von NEMEČEK die weiteren Berechnungen durchführen zu können.

Bei Betrachtung der Stromlinien in Abbildung 4.1. wird ersichtlich, dass ein Großteil der Wassermenge über den Strang entgegen der Grundwasserströmung gewonnen wird. Diese Erkenntnis ermöglicht eine weitere Vereinfachung bei der Berechnung, die besagt, dass sich die beiden Randstromlinien des meist ausgelasteten Filterstrangs, ca. 10 m unter der Strangspitze bis auf einen Abstand von  $b/50$  nähern. Ersetzt man diese Randstromlinien durch eine Gerade, dann kann man einen Wert für  $h_f$  abschätzen:

$$h_f = J_0 * b * \left(0,9 - 1,4 * \frac{1}{b}\right) \quad 4.16$$

wobei

- $J_0$  ... Grundwasserspiegelgefälle ohne Brunnenbetrieb
- $b$  ... Einzugsbreite [m]
- $l$  ... Länge des Filterrohres [m]
- $Q$  ... Entnahmemenge [ $m^3/s$ ]
- $h_{GW}$  ... Grundwassermächtigkeit [m]
- $k_f$  ... Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]

Haertl (zit. in Nemeček, 2006) hat die Formeln von Nemeček in der Praxis getestet und kommt auf gute Ergebnisse.

#### 4.2.6 Anströmung zum verlaufsgesteuerten Horizontalfilterbrunnen (VHB)

(nach Sass & Treskatis, 2000b)

Die Technik der verlaufsgesteuerten Horizontalfilterbrunnen (VHB) wurde früher zur grabenlosen Rohrverlegung und zur Grundwassersanierung kontaminierten Standorten eingesetzt. Seit etwa 2000 wird sie auch zur Trinkwasserförderung genutzt. Dabei wird von einer Startgrube aus eine Pilotbohrung unter einem bestimmten Winkel in den Untergrund abgeteuft, verläuft dann im Bereich der Filterstränge horizontal und steigt danach wieder Richtung Oberfläche an, wo die Bohrung in einer Zielgrube endet. Diese Bauform nennt man „Twinbrunnen“, während die Ausführung ohne Wiederaustritt an der Oberfläche als „Singlebrunnen“ bezeichnet wird.

Wie HFB besitzen VHB eher flache Absenkmulden. Weiters ist bei kurzen VHB eine idealisierte ellipsoide Form des Einzugsgebietes zu erwarten, wobei ein VHB mit unter 50 m Filterlänge als kurz gelten kann.

Die VHB sind durch ihre individuellen Ausbaumöglichkeiten eine ideale Ergänzung zu Vertikal- und Horizontalfilterbrunnen, da sich mit ihnen bisher nicht oder schlecht erschließbare Wasservorkommen, wie beispielsweise Grundwasserleiter mit nur schichtspezifischen Gewinnungsmöglichkeiten oder Gebiete nahe der Salzwasser-Süßwasser-Grenze, fassen lassen.

Die Bemessung eines VHB erfolgt nach den auf DUPUIT-THIEM‘ schen Grundannahmen basierenden, angepassten analytischen Beziehungen von RENARD und DUPUY. Diese nutzen

die effektive horizontale Durchlässigkeit. Da damit aber die Bedeutung der Grundwasseranisotropie sehr stark gewichtet wird, ist folgende Formel nur mit genauer Kenntnis des Grundwasserleiters einsetzbar.

$$Q_{VHB} = \frac{2 \cdot \pi \cdot k_{feh} \cdot M \cdot (H-h)}{\arccos h \cdot \left(\frac{2a}{L_{VHB}}\right) + \beta \cdot \left(\frac{H}{L_{VHB}}\right) \cdot \ln + \left(\frac{H}{2 \cdot \pi \cdot r_{eff}}\right)} \quad 4.17$$

wobei

- $Q_{VHB}$  ... Wasservolumenstrom [ $m^3/s$ ]
- $k_{feh}$  ... effektiver Durchlässigkeitsbeiwert in horizontaler Richtung [ $m/s$ ]
- $M$  ... Grundwasserletermächtigkeit [ $m$ ]
- $H$  ... hydraulische Druckhöhe am Rand der Absenkung [ $m$ ]
- $h$  ... abgesenkte hydraulische Druckhöhe oberhalb der Filterstrecke [ $m$ ]
- $L_{VHB}$  ... Länge der horizontalen Filterstrecke [ $m$ ]
- $\beta$  ... Anisotropiekoeffizient aus horizontalem und Vertikalen  $k_f$ -Wert
- $r_{eff}$  ... effektiver Brunnenradius [ $m$ ]
- $a$  ... längere Halbachse eines ellipsoiden Einzugsgebiets [ $m$ ]

### 4.3 Numerische Lösung und Modellbildung

Aus dem Versuch die verschiedenen Fälle analytisch zu lösen, wird klar, dass dies nur nach erheblichen Vereinfachungen möglich ist. Um die zu untersuchende Situation möglichst realitätsnah zu berechnen, bieten sich numerische Lösungen an. Diese simulieren oder modellieren eine bestimmte Situation, sie beruhen auf der Diskretisierung des Modellgebiets und auf der Approximation der Differentialgleichung. Das Prinzip dahinter ist, die partielle Differentialgleichung des Strömungs- oder Transportvorgangs nicht wie in der analytischen Lösung über die gesamten Orte und Zeiträume zu lösen, sondern durch Diskretisierung Raum und Zeit in endliche, homogene Abschnitte zu unterteilen. So entsteht ein Gitter, an dessen Schnittpunkten sogenannte Stützstellen definiert werden. Die partielle Differentialgleichung wird dann durch endlich viele lösbare Gleichungen beschrieben und über Gleichungslöser wird eine Näherungslösung für die gesuchten Größen an den Stützstellen iterativ ermittelt bis das System mit den Randbedingungen übereinstimmt (nach Forkel, 2004).

Numerische Modelle können nach ihrer räumlichen Dimensionalität, den berücksichtigten chemischen und physikalischen Prozessen oder der Fähigkeit zeitliche Veränderungen wiederzugeben unterschieden werden. Je mehr Dimensionen bzw. Prozesse berücksichtigt werden, desto aufwändiger wird die Modellierung (Handl, 2013).

In der DVGW W 107 (2016) werden 3 Hauptverfahren für die numerische Modellierung genannt. Man unterscheidet:

- Methode der Finiten Differenzen: Das Modellgebiet wird in ein rechteckiges Gitter zerlegt und die DGL durch Differenzgleichungen approximiert. Letztere werden für die Werte der gesuchten Funktion  $h$  an den Gitterpunkten durch Lösen eines großen Gleichungssystems numerisch gelöst (Koch, 2004, S.5-27).
- Methode der Finiten Elemente: Das Modellgebiet wird in Dreiecks- oder rechteckige, gekrümmte Elemente beliebiger Größe aufgeteilt. In jedem Element wird die gesuchte Funktion  $h$  durch sogenannte Interpolationsfunktionen approximiert. Hier muss ebenfalls ein großes Gleichungssystem numerisch gelöst werden, wobei der numerische Aufwand bei FE Methoden wesentlich größer ist, sie sind jedoch auch genauer (Koch, 2004, S.5-27).

- Methode der Finiten Volumen: Diese Methode basiert auf der integrierten Betrachtung der Differentialgleichung. Dabei werden die integrierten Werte über Kontrollvolumina und Oberflächen bilanziert. Aus der Integration entstehen Differentialgleichungen, die wiederum über Finite Differenzen Methoden gelöst werden können. Ein Vorteil der Finiten-Volumen- Methode ist, dass sie durch die Bilanzierung den Massenerhalt gewährleistet, außerdem ist das Verfahren auch auf unregelmäßige Gittergeometrien anwendbar (Forkel, 2004, S.83)

Bei der Modellierung von HFB besteht die Schwierigkeit in der Modellierung der horizontalen Filterstränge, für die ein höherer Diskretisierungsgrad notwendig ist. Rechteckige Finite Differenzen Methoden eignen sich nicht, um die radiale Anordnung der Horizontalstränge zu beschreiben. Finite Element Methoden wären flexibler, benötigen jedoch separate Netze um alternative Brunnenformen darzustellen (Moore, Kelson, Wittman, *et al.*, 2012).

Bakker, Kelson & Luther (2005) liefern einen Ansatz zur 3-D-Modellierung von HFB, der ohne die horizontale Diskretisierung des Grundwasserflusses auskommt. Dabei fanden sie viele Vorteile gegenüber der Modellierung durch die Finite-Differenzen-Methode, wie sie beispielsweise in MODFLOW eingesetzt wird. Sie verwenden einen Ansatz aus mehrschichtigen analytischen Elementen bei der Betrachtung eines stationären Grundwasserflusses zum Brunnen. Brunneneintrittsverluste als auch Druckverluste innerhalb des Brunnens werden berücksichtigt, während Reibungsverluste in den Rohren vernachlässigt werden können. Moore, Kelson, Wittman, *et al.* (2012) führen diese Untersuchungen weiter und entwickeln ein Grundgerüst für den Entwurf von HFB. Dabei nutzen sie in ihrem Ansatz einen regionalen und lokalen Maßstab, um verschiedene horizontale und vertikale Verteilungen der Filterstränge zu simulieren. Das Grundwassermodell wird mittels der Analytischen-Elemente-Methode (kurz AEM, Beschreibung bei Strack (1989)zit. in Moore, Kelson, Wittman, *et al.*, 2012) simuliert. Der wesentliche Vorteil dieser Methode besteht darin, dass sowohl 2-D als auch 3-D Elemente verwendet werden können. Darüber hinaus verwenden AEM kein Netz und Wechselwirkungen zwischen den horizontalen Filtersträngen und umliegendem Grundwasserkörper werden explizit modelliert. Ein regionales 2-D Modell erzeugt die Darstellung des regionalen Grundwasserflusses, während ein lokales 3-D Modell zur detaillierten Simulation der Grundwasserbewegung in der unmittelbaren Nähe des Brunnens dient.

Mohamed & Rushton (2006) stellen einen HFB durch ein regionales Finite-Differenzen-Modell dar, das den Grundwasserfluss repräsentiert, zusätzlich verwenden sie lokale Modelle, um den Fluss vom Aquifer zum Filter und innerhalb des Filters zu beschreiben. Die Durchlässigkeit und der Durchmesser der Filterstränge, sowie Verluste beim Durchströmen der Filterschlitze werden berücksichtigt, jedoch wird der Zuflussfaktor zum Filter mittels HAZEN WILLIAMS-Gleichung empirisch bestimmt, was eine gewisse Abstraktion zur Folge hat. Ein ähnlicher Ansatz findet sich auch bei Lee, Hyun, Lee, *et al.*(2012).

Um die Verluste im Filterstrang zu modellieren, verwendet Chen, Wan & Zhan (2003) den Durchlässigkeitsbeiwert. Er wird so gewählt, dass bei gleichem Durchfluss in den die Rohre repräsentierenden Zellen die gleichen hydraulischen Verluste auftreten wie im Filterrohr. Der Durchlässigkeitsbeiwert liegt dadurch über den Werten im Aquifer und kann für den jeweiligen Strömungszustand im Rohr von einem zusätzlichen Modell für jeden Zeitschritt im instationären Modell iterativ berechnet werden. Ein wesentlicher Nachteil dieser Methode ist wiederum die detaillierte räumliche Diskretisierung im Bereich der Filterstränge. Anschließend wird das Modell im Laborversuch geprüft.

Haitjema, Kuzin, Kelson, *et al.* (2010) präsentieren eine Methode zur Simulation des Grundwasserflusses zu horizontalen Filtersträngen, indem sie die Eintrittsgeschwindigkeit in einem 2-D-Modell anwenden. Sie kommen zum Schluss, dass die Berücksichtigung des

dreidimensionalen Flusses wichtig ist, wenn der Durchmesser der Filterstränge gegenüber der gesättigten Schicht des Grundwasserleiters sehr klein ist.

### 4.3.1 Modell-Kalibrierung

( nach Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000)

Das Ziel der Kalibrierung oder auch Modelleichung ist die Abweichung der Daten aus vorangegangener Messung und Simulation zu minimieren. Dabei werden unsichere Modellparameter innerhalb eines numerisch und physikalisch sinnvollen Vertrauensbereichs solange variiert, bis eine hinreichend genaue Übereinstimmung gefunden wird. Bei der Kalibration werden auch Fehler und Unsicherheiten im Modellaufbau wie z.B.: Regionalisierung der Parameterverteilung, Diskretisierungsgenauigkeit und Dimensionalität sichtbar. Eine Anpassung hinsichtlich dieser Einflüsse gehört ebenfalls zum Kalibrierungsprozess und kann diese Ungenauigkeiten bei guter Kalibration ausgleichen. Die Qualität der Kalibrierung entscheidet oft über die Qualität des gesamten Modells.

#### 4.3.1.1 Kalibrierungsmethoden

Zuallererst unterscheidet Forkel (2004) zwischen stationärer und instationärer Kalibration. Die stationäre Kalibrierung ist einerseits weniger zeit- und rechenaufwändig, liefert aber dementsprechend auch ungenauere Ergebnisse als die instationäre Kalibrierung. Die gewählte Form ist von der vorhandenen Vergleichsdatenbasis abhängig, prinzipiell gilt aber, je mehr Messdaten zur Verfügung stehen, desto genauer das Ergebnis.

Des Weiteren unterteilt man nach drei verschiedenen Ansätzen in

- Manuelle Kalibrierung („Trial and Error“ - Methode)
- Automatische Kalibrierung als Lösung einer inversen Problemstellung
- Kalibrierung anhand stochastischer Methoden (meist ebenfalls automatisch)

Die Funktionsweise der manuellen und automatischen Kalibration ist laut Forkel (2004) sehr ähnlich. Zunächst wird mit den Schätzwerten der Kalibration eine Simulation durchgeführt. Anschließend wird das Ergebnis den Vergleichsdaten gegenübergestellt und die ursprünglichen Schätzwerte werden angepasst. In der manuellen Methode erledigt dies der Modellanwender, während bei der inversen Parameterschätzung ein Kalibrationsalgorithmus zum Einsatz kommt. Die Prüfung der Annäherung der simulierten Ergebnisse an die Vergleichsdaten kann bei der manuellen Kalibrierung sowohl visuell, durch den Vergleich von Zeitreihen oder Isolinien erfolgen, oder mathematisch, wie beim automatischen Verfahren. Die mathematische Kontrolle erfolgt meist durch den Vergleich der Mittelwerte, sowie durch die mittlere quadratische Abweichung der simulierten und beobachteten Werte. (Forkel, 2004)

Bei der Kalibrierung anhand stochastischer Methoden werden die Kalibrierungsparameter als Zufallsvariablen betrachtet, welche über Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen definiert sind. Es ist einerseits eine Vielzahl von Realisationen notwendig, um eine gute Annäherung der Parameter zu erreichen, andererseits liefert dieses Verfahren im Kalibrierungsverlauf auch eine qualitative Aussage über die Modellparameter (Forkel, 2004).

### 4.3.2 Validierung - Modeltest

Die Validierung ist die Überprüfung des Modells durch den Vergleich der simulierten Werte mit einem Datensatz des gleichen Gebietes, jedoch für einen Zeitraum der nicht für den Kalibrierungsprozess herangezogen wurde.

Man findet in der Literatur verschiedene Gütemaße, welche den Grad der Modellanpassung definieren. Nachtnebel (2007) empfiehlt unter anderem den Nash-Sutcliffe Koeffizienten, welcher

aber nur für zeitabhängige Variablen angewendet werden kann. Dabei reicht der Koeffizient von minus unendlich bis 1. Wobei 1 einem perfekten Modell entspricht und 0 meint, dass das Modell so gut ist wie der Mittelwert der Beobachtungen.

Der gebräuchliche Begriff der Validierung impliziert gewissermaßen eine abschließende Gültigkeit des Modells, welche bei der Grundwassermodellierung jedoch nicht zu erreichen ist und dem Gedanken einer kontinuierlichen Verbesserung und Pflege des Modells widerspricht. Die DVGW W 107 (2016) spricht darum nunmehr vom Modeltest.

### 4.4 Anwendung der Modellierung

Dieses Kapitel zeigt Anwendungsbeispiele im HF-Brunnenbau. Zum Einen wird die allgemeine Vorgehensweise bei der Erstellung eines Grundwassermodells erklärt, zum Anderen wird eine Variantenstudie verschiedener Filterstrang-Ausführungen gezeigt.

#### 4.4.1.1 Modellierung des Grundwasserleiters

Zu Beginn sind die Zielsetzungen und Rahmenbedingungen der Berechnung zu klären, dafür wird laut DVGW W 107 (2016) das vom Auftraggeber vorgelegte vorläufige Modellierungskonzept noch vor der Datensammlung geprüft und gegebenenfalls erweitert. Die Definition der zu berechnenden Varianten sollte ebenfalls Teil dieses ersten Schrittes sein. Danach wird schrittweise wie folgt vorgegangen:

Nach Erhebung der benötigten Daten durch die Voruntersuchung erfolgen die Erstellung eines hydrogeologischen Modells und danach die Präzisierung des Modellkonzepts. Der Aufbau des hydrogeologischen Modells beinhaltet im Wesentlichen folgende Schritte:

- Festlegung des Untersuchungs- und Modellgebiets
- Beschaffung der Systemparameter (Hydrogeologie, Grundwasserbeschaffenheit, Landnutzung, je nach Fragestellung, aus der Voruntersuchung)
- Vereinfachung und Schematisierung der komplexen natürlichen Gegebenheiten  
Ableitung nicht direkt beobachtbarer Größen , wie Volumen- oder Massenströme, durch Nutzung messbarer Größen , wie Durchlässigkeit oder Grundwasserstände
- Bewertung des Modells hinsichtlich Eindeutigkeit, Genauigkeit und Anwendungsbereich
- Dokumentation der Eingangsdaten, der Modellannahmen und der daraus resultierenden Modellansätze
- Plausibilitätskontrolle des hydrogeologischen Modells durch das numerische Grundwassermodell (Feedback)
- Anpassung, Überarbeitung hinsichtlich Inkonsistenzen
- Anpassung des Modellierungskonzeptes

Anschließend wird das numerische Grundwassermodell erstellt. Dabei werden die mit dem hydrogeologischen Modell festgelegten hydrostratigrafischen Einheiten, Parameterverteilungen und Randbedingungen, der Aufgabenstellung entsprechend, in Raum und Zeit diskretisiert und mit Werten belegt (DVGW W 107, 2016). Anschließend wird das Modell kalibriert und getestet. Nach Abschluss des Modellaufbaus werden die anfangs definierten Varianten untersucht.

#### 4.4.1.2 Modellierung der Anordnung der Filterstränge

Während die meisten HFB, vor allem bei Erschließung von Grundwasserleitern in größerer Tiefe und bei der Betrachtung zur analytischen Berechnung, eine sternförmige Anordnung der Filterstränge haben, gibt es bei der Nutzung von Uferfiltrat alternative Formen. Das heißt, der Planer kann je nach Grundwasserströmung und Fördervolumen nicht nur die Anzahl und Länge

der Stränge sondern auch ihre Positionierung variieren, dies hat wiederum Auswirkungen auf die Grundwasserströmung und gegebenenfalls auch auf die Qualität des Wassers und die Brunnenleistung. Moore, Kelson, Wittman, *et al.*, (2012) präsentieren verschiedene Anordnungen (Abbildung 4.4) und modellieren deren Auswirkungen.

Weiters wurden der Einfluss der Stranglänge und der Abstand zum Fluss auf die

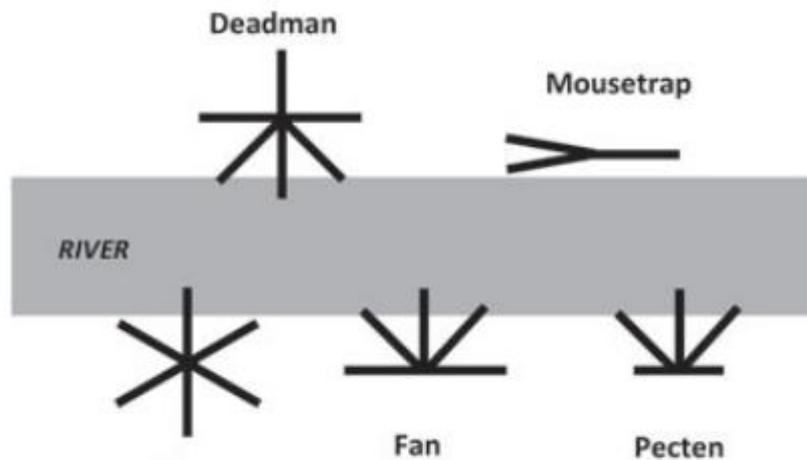


Abbildung 4.4: Verschiedene Möglichkeiten der Stranganordnung im HFB (Die Namen sind teilweise im HFB-Bau gebräuchlich, teilweise wurden sie von den Autoren aus ihrer Form abgeleitet) (Moore, Kelson, Wittman, *et al.*, 2012)

Brunnenleistung getestet. Zuerst entwickelten die Autoren ein regionales 2D Modell des Grundwasserleiters, welches dann die Randbedingungen für das 3D Modell der horizontalen Filterstränge liefert. Der Fluss wird als linearer Senken-Bereich mit spezifischen Widerstands- und Druckwerten modelliert. Dazu wurden Druckwerte aus gemessenen Wasserständen herangezogen und Widerstandswerte des Flussbetts aus Aquifertests und Flussbettablagerungen abgeleitet. Anschließend wurde das Modell nach verschiedenen Druckhöhenmessungen mittels des Modells PEST automatisch kalibriert. Der Anteil an Uferfiltrat im Brunnen wurde mittels „particle-tracking“ simuliert.

Die 3 getesteten Parameter, Brunnenleistung (1), Anteil an Uferfiltrat (2) und Pumpenleistung pro Meter Filterstrang (3), sollen helfen, Aussagen über die Auswirkungen der Bauform auf die Leistung (1), die Aufgaben für die Aufbereitung und eventuelle Mehrkosten (2) und über die generellen Investitionskosten (3) zu treffen. Die Ergebnisse wurden dann normalisiert: Für die Brunnenleistung wurde durch die angestrebte Brunnenleistung am Standort dividiert. Die Werte für die Pumpenleistung wurden durch die des besten Designs dividiert. Zum prozentualen Anteil an Uferfiltrat soll gesagt werden, dass ein hoher Anteil für den Standort vorteilhaft ist, da Uferfiltrat leichter zu behandeln ist als Grundwasser.

Zwölf Szenarien wurden schließlich miteinander verglichen und die Autoren kommen zum Schluss, dass die besten drei Szenarien im Bereich der Brunnenleistung auch den höchsten Anteil an Uferfiltrat besitzen, da diese Parameter am Standort zusammenhängen. Die besten Szenarien bezüglich Pumpenleistung pro Meter Filterstranglänge konnten in den anderen beiden Bereichen nicht mithalten. Dementsprechend gilt es die Parameter standortspezifisch auszubalancieren. Im konkreten Fall entschied man sich für die 6-armige Pecten-Bauform (Szenario D bzw. G). Abbildung 4.5 zeigt die Ergebnisse der Studie von Moore, Kelson, Wittman, *et al.*, (2012).

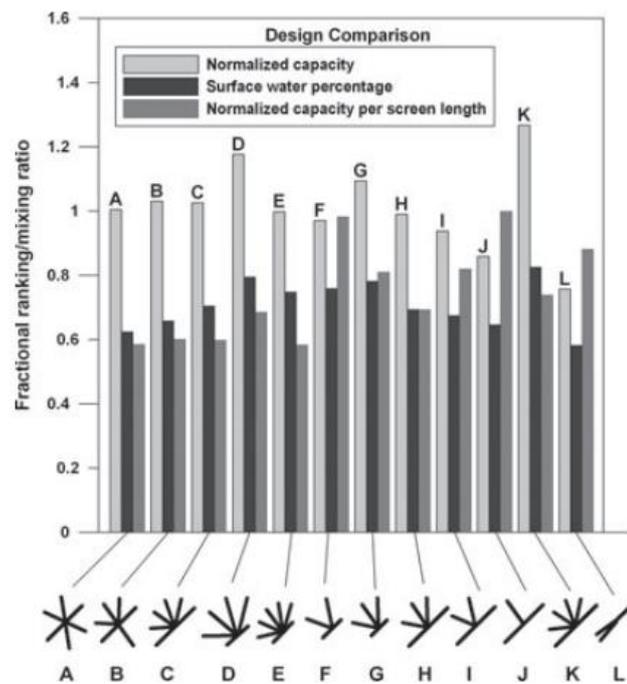


Abbildung 4.5: Vergleich Design Szenarien (Moore, Kelson, Wittman, *et al.*, 2012)

## 5. Brunnenbemessung

Bei der Voruntersuchung und den Feldversuchen werden die hydrologischen Eigenschaften des Untergrundes, die geotechnischen Rahmenbedingungen und ein ausreichend nutzbares Grundwasserdargebot festgestellt. Anschließend wird das Verhalten des Brunnens im Zuge der Modellierung veranschaulicht und verschiedene Varianten getestet. Danach folgen die technische Ausführung des Brunnens und die Bemessung des Brunnenausbaus. Die DVGW W 118 (2005) empfiehlt eine Vorbemessung der Fördertechnik und des Brunnenbaus, die von einem Pumpversuch überprüft werden. Anschließend folgen die hydraulische Bemessung und der Tragfähigkeitsnachweis der Ausbauperforierung.

### 5.1 Vorbemessung des Brunnenbaus

Die Vorbemessung des Brunnenbaus besteht aus der Ermittlung des Wasserandrangs (4.2.5) und des Fassungsvermögens. Das Fassungsvermögen wird durch Multiplikation von Filtereintrittsfläche (Mantelfläche) und maximaler Eintrittsgeschwindigkeit beschrieben. Ein wesentliches Kriterium bei der Bemessung eines HFB ist also die Bestimmung der Brunnenmantelfläche. Diese bezeichnet die bei der Entnahme vom Grundwasser durchströmte Fläche zwischen Filterkies und Grundwasserleiter bzw. zwischen Filterkies und Filterrohr (erforderliche Brunnenmantelfläche) und wird nach DVGW W 128 (2008) wie folgt berechnet:

$$A_{BR} = d_{BR} * \pi * l_{Fges} \quad 5.1$$

wobei

- $A_{BR}$  ... Brunnenmantelfläche
- $d_{BR}$  ... Bohrdurchmesser
- $l_{Fges}$  ... Gesamtlänge des Filterrohrs

Die **erforderliche Brunnenmantelfläche** ist als Quotient aus Wassermenge und einer an der Bohrlochwand zulässigen kritischen Geschwindigkeit  $v_{zul}$  definiert, sie bestimmt das **technische Fassungsvermögen** des HFB. In der Literatur findet man verschiedene Berechnungsverfahren für diese Geschwindigkeit, Darüber hinaus sind auch Erfahrungswerte bekannt, welche von der Durchlässigkeit des Grundwasserleiters und einer etwaigen Tendenz des Grundwassers, Alterungsprozesse auszulösen, abhängig sind. So definiert SICHARDT zum Beispiel  $v_{zul} < k_f/15$ , im angloamerikanischen Raum und nach HUISMAN nimmt man  $v_{zul} < k_f/30$  an. Houben & Treskatis (2003, S.25) definieren  $v_{max} = \sqrt{\frac{k_f}{15}}$ , um ein maximales Gefälle am Absenktrichter zu erreichen. Dieses Grenzgefälle darf nicht überschritten werden, damit Suffusion und Brunneneintrittsverluste vermieden werden. In der Praxis des Horizontalfilterbrunnenbaus wird  $v_{zul}$  bei der Annahme nach SICHARDT außerdem, je nach Anzahl der Filterstränge, um einen gewissen Faktor verringert. Bei acht Filtersträngen beispielsweise um 0,2 (DVGW W 128, 2008). Die erforderliche Brunnenmantelfläche ist dann:

$$A_{BR} = \frac{Q}{v_{zul}} \quad 5.2$$

wobei

- $A_{BR}$  ... erforderliche Brunnenmantelfläche [m<sup>2</sup>]
- $Q$  ... Wassermenge (Entnahmemenge) [m<sup>3</sup>/s]
- $v_{zul}$  ... Zulässige kritische Geschwindigkeit an der Bohrlochwand (nach verschiedenen Autoren) [m/s]

Falls das gewinnbare standörtliche Grundwasserangebot in der Voruntersuchung nicht bestimmt werden konnte, so sollte der Horizontalfilterbrunnen laut DVGW W 128 (2008) mit einer entsprechenden Mindest-Brunnenmantelfläche geplant, gebaut und dann einem mehrstufigen Pumpversuch nach DVGW W 111 (A) unterzogen werden. Nach dessen Auswertung kann die Bemessung des Brunnens angepasst und dieser erforderlichenfalls mit zusätzlichen Filterrohrsträngen ausgebaut werden. Hier zeigt sich ein wesentlicher Vorteil der HFBs.

Durch die überschlägige Ermittlung des Wasserandrangs und des Fassungsvermögens kann die hydraulisch günstigste Brunnenbetriebsleistung  $Q_{\max}$  unter brunnenbautechnischen und hydrogeologischen Aspekten des Standortes ermittelt und nach Errichtung oder Wartung mittels Leistungspumpversuch (7.2.9) überprüft werden (Abbildung 5.1) (DVGW W 118, 2005). Die optimale Dauerbetriebsleistung  $Q_{\text{Betrieb}}$  wird dann mit 75% von  $Q_{\max}$  angenommen.

Nach der erforderlichen Brunnenmantelfläche werden anschließend die **Anzahl und der Filterrohrdurchmesser der Filterstränge** gewählt. Dabei ist laut DVGW W 128 (2008) darauf zu achten, dass die Fließgeschwindigkeit im Filterrohr oder an der Ausbohrverrohrung am

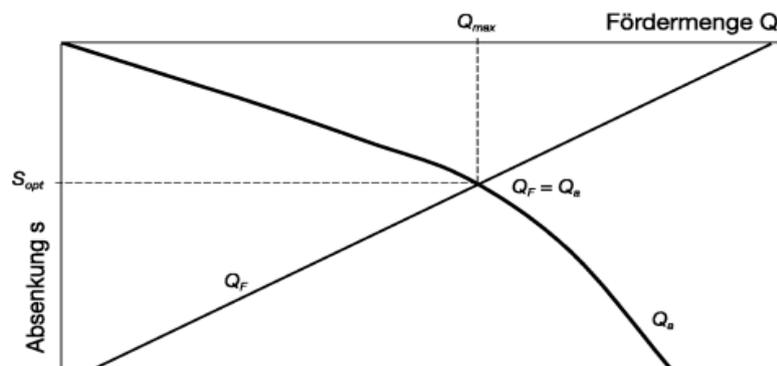


Abbildung 5.1: Ermittlung von  $Q_{\max}$  aus Wasserandrang  $Q_a$  und Fassungsvermögen  $G_F$  (aus DVGW W 118)

Strangende, zur Minimierung von Rohrreibungsverlusten, einen Wert von 0,7 m/s nicht übersteigt. Bieske (1965) nennt einen Wert von 0,6-0,8 m/s, um eine Mobilisierung von Sediment aus dem Aquifer zu vermeiden.

$$v_{\text{Rohr}} = \frac{q_n \cdot 4}{d_i^2 \cdot \pi} \quad 5.3$$

wobei

$$v_{\text{Rohr}} \dots < 0,7 \text{ m/s}$$

$$q_n \dots \text{Einzelstrangfördermenge [m}^3\text{/s]}$$

Die einfache Berechnung nach DVGW Regelwerk ist allerdings kritisch zu betrachten, da die, aufgrund einer maximal zulässigen Geschwindigkeit, berechnete Bohrlochmantelfläche eine gleichmäßige Verteilung des Wassereintritts voraussetzt. Der Wassereintritt entlang eines Strangs ist nach den Versuchen von Nemeček (2006) und Chen, Wan & Zhan (2003) allerdings nicht gleich verteilt und die berechnete maximale Filtereintrittsgeschwindigkeit wird womöglich stellenweise überschritten (Abbildung 5.2). Man geht also von einem exponentiell abnehmendem Gefälle der Geschwindigkeitsverteilung von der Strangspitze bis zum Schacht aus (Treskatis, 2017). Treskatis & Betschart (2012) haben die Geschwindigkeitsverteilung unter realen Verhältnissen mittels Impellerflowmeter gemessen und bestätigen die mengenmäßige Verteilung des Wassereintritts.

Bieske (1965) fand auf Grundlage seiner Untersuchungen an Einzelsträngen heraus, dass die maximale Filtereintrittsgeschwindigkeit an der Strangspitze meist doppelt so groß ist wie die

mittlere Filtergeschwindigkeit. Betrachtet man Abbildung 5.2 so gleichen sich die Annahmen von Nemeček (2006) und Bieske (1965). Bei der weiteren Berechnung zieht Bieske  $v_{zul}$  nach SICHARDT heran und setzt sie der mittleren Filtergeschwindigkeit gleich. Da diese in seinen Überlegungen jedoch die Hälfte der maximalen Filtergeschwindigkeit ausmacht, wird der Wert für  $v_{zul}$  halbiert. Die resultierende Mantelfläche ist dann so groß, dass theoretisch an keiner Stelle die Grenzgeschwindigkeit überschritten wird. Daraus ergibt sich jedoch eine potentielle Überdimensionierung, die Bieske (1965) schlichtweg mit einer längeren Lebensdauer rechtfertigt. Die DVGW W 128 (2008) kommentiert die Geschwindigkeitsverteilung entlang des Filterstranges nicht. Treskatis & Betschart (2012) kommen bei ihren Versuchen zum Schluss, dass die spezifische Ergiebigkeit eines Filterstranges, nicht nur von der Länge und dem Durchmesser des Stranges abhängig ist, sondern auch maßgeblich durch die unterschiedlichen Durchlässigkeiten des Grundwasserleiters geprägt ist, was in der Bemessungsvorlage der DVGW W 128 (2008) aber ausgespart bleibt.

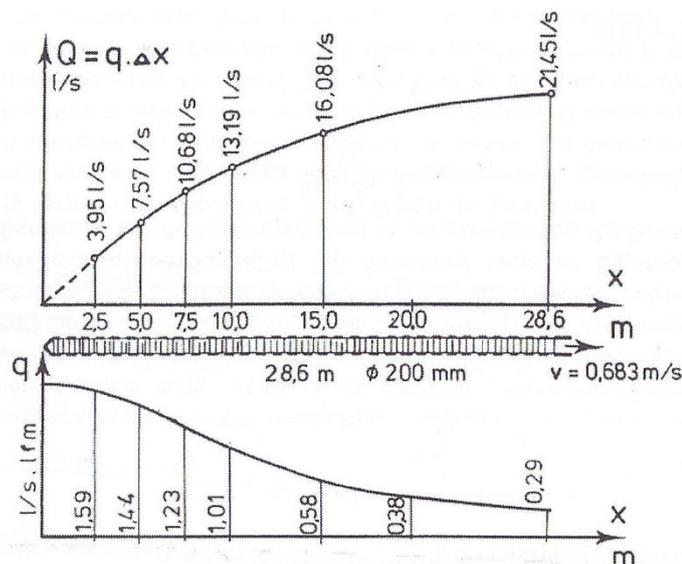


Abbildung 5.2: Zuströmung zu einem HFB Filterrohr, oben: Entnahme gesamt, unten: spezifische Entnahme pro Laufmeter Strang (nach Nemeček 2006, S.58)

Anschließend soll die Fördertechnik vorbemessen werden. Dabei hängt die Wahl der Pumpe hauptsächlich von der Fördermenge und der Förderhöhe ab.

## 5.2 Technische Bemessung

Die technische Bemessungsgrundlage stützt sich hauptsächlich auf die Brunnengeometrie (Bauform, Durchmesser, Filterrohrlänge usw.) und folglich auf die hydraulischen und statischen Eigenschaften der verwendeten Materialien. Bieske (1965) bestimmt die Abmessungen des Schachtbauwerks wie folgt:

Die Abmessungen des lichten Schachtdurchmessers werden durch die geplanten Einbauten und den notwendigen Platz für den horizontalen Vortrieb bestimmt. Im Allgemeinen ergeben sich Werte zwischen 2 und 5 m. Die Schachttiefe richtet sich nach der Lage der wasserführenden Schicht, welche zudem die günstigsten hydrogeologischen und hydrochemischen Bedingungen für die Entnahme bietet. Es muss dabei sichergestellt werden, dass die Filterstränge auch bei maximaler Absenkung und niedrigem Grundwasserstand noch vollständig mit Wasser benetzt sind. Hydraulisch gesehen wird der Filterstrang auf halber Höhe zwischen Grundwasserstauer und dem niedrigsten abgesenkten Grundwasserstand eingebaut. Moore, Kelson, Wittman, *et al.*, (2012) kommen in ihrer Studie zudem zum Schluss, dass die Tiefe der Filterstränge bei

ausreichend mächtigem Grundwasserleiter, nur wenig Einfluss auf die Brunnenleistung hat. Laut DVGW W 128 (2008) sollte der Mindestabstand zum Grundwasserstauer nach Möglichkeit einen Meter betragen. Der Schacht wird einige Meter tiefer abgeteuft, um Raum für eventuelle Ablagerungen zu schaffen. Der Wahl der Abmessungen der Schachtwanddicke, der Sohle und der Decke des Schachtes soll eine statische Berechnung zu Grunde liegen.

### 5.3 Hydraulische Bemessung

Die hydraulische Bemessung sichert die Anpassung des Fassungsvermögens an die Ergiebigkeit des Standortes. Sie soll Erosions- und Kolmationsprozesse verhindern, die Brunnenalterung verzögern, die Suffusion nicht behindern und die konstruktionsbedingte Absenkung im Brunnen (Brunnenverlust) minimieren (DVGW W 118, 2005).

Bei der hydraulischen Filterbemessung werden die Korngrößen der Filterkornschüttung, die Geometrie des Schüttungskörpers (Stützkörpers) sowie die Abmessung der Schlitz und Spaltweiten des Filterrohres, abhängig vom petrografischen Aufbau des Grundwasserleiters und der Grundwasserströmungsprozesse bemessen, um Druckverluste infolge von Kolmation und Inkrustationen zu verhindern. Die Auswertung von Bohrproben und Spülgut ist dabei ein maßgebendes Werkzeug zur Optimierung (DVGW W 118, 2005).

#### 5.3.1 Filterkies und Filteröffnungen

Der Wasserzufluss aus dem Grundwasserleiter in den Brunnen wird von den hydraulischen Eigenschaften der Bohrlochwand und der Brunnenausbaumaterialien beeinflusst. Dabei sind die Ringraumkiesschüttung und das Filterrohr die bedeutendsten Schnittstellen des Grundwassers auf seinem Weg in den Brunnen. Das Grundwasser soll beim Durchströmen dieser Grenzflächen bestimmte Geschwindigkeiten nicht überschreiten. So sehen Balke, Beims, Heers, *et al.* (2000) für den Übergang in die Filterkiesschüttung bei VFB eine kritische Geschwindigkeit von 0,002 bis 0,003 m/s vor. Die an den Grundwasserleiter angeschlossene Kiesschüttungssäule, die von der Fördermenge abhängig ist, wird dann nach folgender Gleichung bestimmt:

$$H_S = \frac{Q}{\pi * D_B * v_{krit}} \quad 5.4$$

wobei

- $H_S$  ... Kiesschüttungssäule [m]
- $Q$  ... Fördermenge [ $m^3/s$ ]
- $D_B$  ... Bohrdurchmesser [m]
- $v_{krit}$  ... kritische Geschwindigkeit an der Bohrlochwand, 0,002-0,003 m/s

Die hydraulische zur Verfügung stehende Filterlänge wird anschließend wie folgt bestimmt:

$$L_F = \frac{Q}{\pi * D_F * v_{krit,a}} \quad 5.5$$

wobei

- $L_F$  ... Filterlänge [m]
- $Q$  ... Fördermenge [ $m^3/s$ ]
- $D_F$  ... Filterrohraußendurchmesser [m]
- $v_{krit,a}$  ... kritische Fließgeschwindigkeit an der Filteraußenwand, <0,03 m/s

Diese Überlegungen dienen der Bemessung von Vertikalfilterbrunnen, wie wird die Filterkiesschüttung bei HFB umgesetzt?

Laut Nemeček (2006) entsteht beim Vortrieb der horizontalen Filterstränge und durch das Entsandern ein Stützkörper, der die Aufgabe der Filterkiesschüttung übernehmen soll. Es wird angestrebt einen Einflussbereich mit einem Radius von ca. 1m Meter um die Rohre entstehen zu lassen, in dem sich Bodenteilchen nicht mehr bewegen. Ist die Ausspülung nicht möglich, z.B.: bei sandigem Untergrund, so muss man einen Stützfilter einspülen oder einen Klebefilter einschieben (Preussag-Kiesmantel-Verfahren). Die DVGW W 118(2005) sieht bei suffosionsgefährdeten Schichten ebenfalls eine minimale Unter- bzw. Überschüttungshöhe der Kiesschüttung von 1m vor. Bei einer Entnahme von 1 l/s\*m soll der Stützkörper (oder Filterkieskörper), die Zuströmgeschwindigkeit zu den Filterrohren minimieren und den Sandeintrag in den Brunnen vermeiden. Der Grundwasserleiter muss für die Ausbildung eines Stützkörpers soweit gemischtkörnig sein, dass sich grobkörniges Material um die Filterrohre anlagern kann. Um dies zu gewährleisten, gilt für die Schlitzweite des Vortriebskopfs  $w_k$  bei der Bohrung:  $d_{94} \leq w_k < d_{100}$  (Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000). Der Vorteil bei der Ausspülung des Stützkörpers besteht darin, dass der Übergang zwischen gewachsenem Boden und Filtermaterial kaum festgestellt werden kann. Wichtig ist, dass der Stützfilterbereich nicht über die abgesenkte Grundwasseroberfläche hinausreicht. Nemeček (2006) stellt die Berechnung dieses Stützfilters vor, welche theoretisch nur für homogene Grundwasserleiter gültig ist, als Vergleichs- und Kontrollgröße jedoch sehr nützlich ist. Der Stützkörper hat meist die Form eines Eies oder einer Ellipse, kann aber abhängig von Schichtungen oder Inhomogenitäten auch von dieser Form abweichen.

Zuerst berechnet er grob das ausgespülte Volumen  $V_S$  des jeweiligen Filterstrangs durch die Höhe des aufgeschütteten Kegels des Spülgutes. Der Stützfilterradius wird dann wie folgt berechnet:

$$R = r_o^2 + \sqrt{\frac{r_o^2}{4} + \left(2 * r_o^2 + \frac{3*(V_B - r_o^2 * \pi * (1 - n_B))}{\pi * (n_F - n_B)}\right)} \quad 5.6$$

wobei

$V_S$  ... Volumen des Spülgutes [m<sup>3</sup>]

$n_S$  ... Porenanteil des Spülgutes

$V_B$  ... Volumen des Spülgutes auf ein Volumen mit Porenanteil  $n_B$  verdichtet:

$$V_B = V_S * \left(\frac{1 - n_S}{1 - n_B}\right)$$

$n_B$  ... Porenanteil des ungestörten Boden

$n_F$  ... Porenanteil im Stützfilter am Filterrohr

$n_r$  ... Porenanteil im Stützfilter im Abstand  $r$  von der HFB Achse

$r_o$  ... Horizontalfilterrohrradius [m]

$R$  ... Stützfilterradius [m]

Haertel (zit. in Nemeček, 2006) hat die Formel wiederum in der Praxis getestet.

Die Stärke des Stützfilters bzw. der Kiesschüttung und ihre Kornverteilung haben einen maßgebenden Einfluss auf die Schlitzweiten der Filterstränge und auf die Bestimmung des Einflusses des Stützfilters auf den Förderstrom. Für letzteres finden sich zur geohydraulischen Berechnung Näherungswerte in der Literatur ( Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000, S.450).

Da laut DVGW W 128 (2008) die Fließgeschwindigkeit in den Filterrohrschlitzen einen Wert von 0,03 m/s nicht überschreiten soll, um Brunneneintrittsverluste zu vermindern, wird eine erforderliche Filtereintrittsfläche  $A_{F,offen}$  wie folgt ermittelt:

$$A_{F,offen} = \frac{Q}{v_{krit,F}} \quad 5.7$$

Außerdem sollte laut DVGW W 118 (2005) bezüglich der maximalen Eintrittsgeschwindigkeit bei Ungleichförmigkeitsfaktoren  $U$  des anstehenden Gesteins größer 8, der Nachweis geführt werden, ob die aus der Suffosion stammende Kornfraktion des Untergrundes die Filterkiesschüttung passieren kann. Dieser Nachweis lautet wie folgt:  $D_{50} > 3,6 \cdot d_s \cdot a$

Nemeček (2006) erklärt zur Abschätzung des Einströmwiderstands bei der Berechnung der Spiegelabsenkung, dass die bei den Ausspülprozessen abgelagerten Steine um das Filterrohr einen vernachlässigbaren Eintrittsverlust hervorrufen.

Die Schlitz- und Spaltweiten der Filterrohre sind außerdem so abzustimmen, dass eine einfache Kornschüttung für den Erosionsschutz ausreicht. Mehrfachschüttungen sollten nur in Ausnahmefällen zur Anwendung kommen, zudem ist ihre Anwendung zu begründen. Um eine Erosion des Schüttkorns oder des Grundwasserleiters und eine Kolmation der Filteröffnungen zu vermeiden, sind bei vorherrschenden Korngruppen folgende Schlitz- und Spaltweiten nach Abbildung 5.3 vorzusehen. (DVGW W 118, 2005)

Korngruppen nach DIN 4924 in mm	Schlitz-/Spaltweite in mm
0,71 bis 1,25	0,3 bis 0,5
1,0 bis 2,0	0,5 bis 0,75
> 2,0 bis 3,15	1,0 bis 1,5
> 3,15 bis 5,6	2,0 bis 2,5
> 5,6 bis 8	3,0 bis 4,0
> 8,0 bis 16	4,0 bis 5,0

Abbildung 5.3: Richtwerte für Schlitz- und Spaltbreiten (aus DVGW W 118, 2005)

Bei den Verfahren, bei denen das Einbringen von Filtersand oder -kies zwischen Bohrrohr und Ausbauperforierung nicht möglich ist (Raney- und Fehlmann-Verfahren und verlaufsgesteuerte Spülbohrung) sind die Schlitz-/Spaltweite an das Kennkorn des anstehenden Untergrundes anzupassen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Bemessung folgende Aspekte berücksichtigen sollte:

- Verhinderung der Kontakterosion an den Grenzflächen Filter/Kornfilter, Kornfilter/Grundwasserleiter
- Verhinderung einer schnellen Brunnenalterung
- Statische Belastung des Rohrmaterials beim Einbau und späteren Betrieb

Um dies zu erreichen sollte der Filterkieses laut Mosch (2017) folgende Eigenschaften haben:

- Mechanische Stabilität bei Transport, Einbau und Regenerierung
- Gleichmäßigkeit in der Kornverteilung und in der Rundung
- Bauliche Stabilität: Setzungsstabilität

Demnach unterscheidet man ideales Korn von Unterkorn. Um die Setzungsstabilität auch bei der Brunnenentwicklung dem Brunnenbetrieb und der Regenerierung zu garantieren, sollte das Schüttgut während des Einbaus konsolidiert werden.

Nachfolgend werden Überlegungen von Paul (2017) vorgestellt, die die Schüttgutbemessung verbessern sollen.

### 5.3.1.1 Modelltheorie der Filterschicht:

Um die Bemessung des Filterkorns zu verbessern bzw. Irrtümer auszumerzen, stellt Paul (2017) neue Überlegungen an. Im Allgemeinen unterscheidet man Filterfaktoren verschiedener Ordnung. Bei Schüttgutbemessungen wird oft nur der Filterfaktor 1. Ordnung berücksichtigt. Abbildung 5.4 zeigt den wesentlichen Unterschied in den Filterordnungen. Zudem wurde bisher mit einer zweidimensionalen Modelltheorie gearbeitet. Laut Paul (2017) weisen neue Erkenntnisse den Weg hin zur räumlichen Betrachtung. So finden Eigenschaften wie die regellose Struktur, Stapelfehler, Partikelbrückenbildung, unregelmäßige Porenquerschnitte und unregelmäßige Partikelmittelachsen Eingang. Außerdem werden die resultierenden unregelmäßigen Fließwege (Tortuosität), die Inhomogenität und die Anisotropie der Filterkiesschüttung analysiert. Die Komplexität der Realbetrachtung zeigt, dass Berechnungen, die auf Annahmen und Gleichmäßigkeit beruhen, keine realistischen Ergebnisse für die Bemessung der Filterkiesschüttung liefern können.

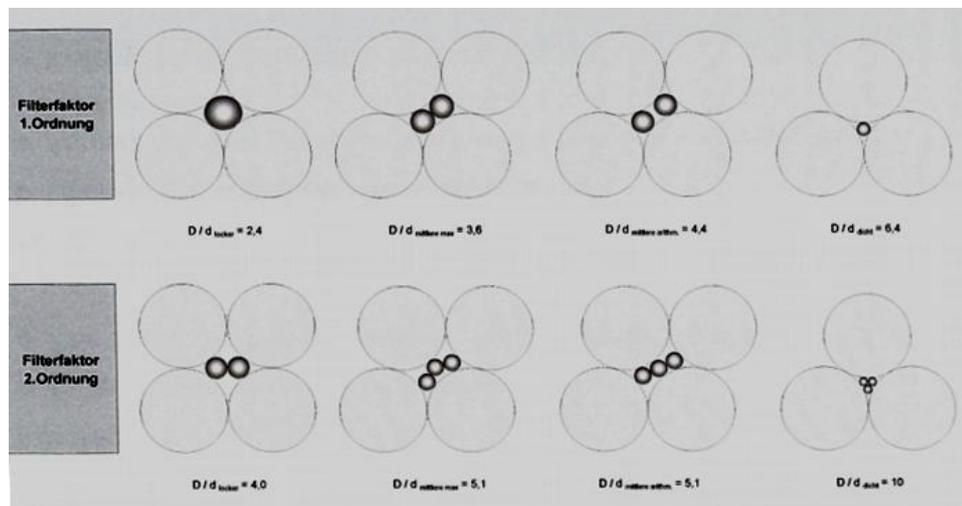


Abbildung 5.4 Filterfaktoren verschiedener Ordnungen (aus Paul, 2017)

### 5.3.1.2 Hydraulische Kette

(nach Paul 2017)

Der Einsatz von Schüttgütern ermöglicht prinzipiell größere Filterrohrschlitze und somit eine größere Entnahmemenge. Über ein abgestuftes Schüttgut ergibt sich eine hohe Zunahme des  $k_f$ -Wertes in Fließrichtung. Damit ergeben sich „Reserven“ für die Brunnenalterung. Die Wahl des passenden Schüttgutes und der Abstufung setzt wiederum repräsentative Bohrproben voraus.

Das Ziel der „hydraulischen Kette“ ist eine schichtenangepasste hydraulische Konstanz in der Fließrichtung Sediment-Schüttgut und schließlich die Realisierung einer teufendifferenzierten, homogenisierenden, baufähigen Kompromisslösung. Wichtig ist, dass Abweichungen vom Optimum des  $k_f$ -Wertes in Fließrichtung Sediment-Schüttgut und signifikante Reduktionen des  $k_f$ -Wertes beim Übergang Schüttgut-Filter Schlitz, immer eine beschleunigende Wirkung auf die Brunnenalterung haben.

Zu so einer Verringerung des  $k_f$ -Werts in Fließrichtung kann es in den verschiedenen Planungs-, Bau- und Betriebsphasen des Brunnens kommen. Beispielsweise bei der Verringerung der Korngröße gegenüber der laut DVGW W 113 berechneten, der sogenannten „Angstschüttung“,

bei einer falschen Auswahl des Filterrohrmaterials, durch die Entmischung des Schüttgutes beim Einbau, durch Entsandung und Regenerierung bedingte radiale und/oder axiale Kolmation, durch Schüttgutsetzung (gewollt/ungewollt) und durch Brunnenalterung.

Paul (2017) schlägt eine Überhöhung des  $k_f$ -Wertes des Schüttgutes vor, da die Durchlässigkeit durch die Brunnenalterung mit der Zeit massiv reduziert wird. Eine zu starke Erhöhung birgt allerdings das Risiko einer inneren Kolmation und in Folge der Sandführung. Die Berechnung der hydraulischen Kette versucht nun ein Optimum des  $k_f$ -Wertes für den geplanten Brunnen zu finden.

Zuerst werden die  $k_f$ -Werte in Fließrichtung verglichen. Tabelle 5.1 zeigt die ideale prozentuelle Verteilung.

Tabelle 5.1 Ideale prozentuelle Verteilung des  $k_f$ -Werts in der hydraulischen Kette

Einfache Kiesschüttung	$k_f$ Bohrprobe	$k_f$ Schüttgut	$k_f$ Filterschlitz
Ideale Steigerung	100 %	10000%	$\geq k_f$ Schüttgut
Toleranzbereich		70000-130000%	

Dazu wird das anstehende Gestein untersucht. Dafür sind repräsentative Proben und eine präzise Messung der Korngrößenverteilung unerlässlich. Es wird eine dichte Lagerungsart angenommen, die Berechnung des  $k_f$ -Wertes erfolgt nach BEYER & SCHWEIGER, wie folgt:

$$k_f = C * d_{10}^2 \quad 5.8$$

wobei

- $k_f$  ... Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
- $C$  ... Proportionalitätsfaktor;  $C_{\text{dichte Lagerung}} = 0,01 * C_U^{-0,2313}$
- $d_{10}$  ... Korndurchmesser bei 10% Gewichtsanteil
- $C_U$  ... Ungleichkörnigkeitsfaktor,  $C_U = d_{60}/d_{10}$

Danach werden zuerst die SOLL-Werte für Schüttgutkorngruppen nach DIN 4914 unter Annahme mittlerer Lagerungsart geplant. Anschließend werden unter der Voraussetzung von repräsentativen Schüttgutproben die IST-Werten untersucht. Die Berechnung erfolgt wiederum nach BEYER&SCHWEIGER.

Abschließend erfolgt die Berechnung der Filterschlitz  $k_f$ -Werte nach KLOTZ (1990; mit Tabellen). Beim Vergleich der Filterrohrmaterialien zeigt sich, dass eigentlich nur Wickeldrahtfilter mit Profildraht und großer Schlitzweite die Anforderungen an die prozentuelle Verteilung der „hydraulischen Kette“ erfüllen.

Paul (2017) schlägt eine Überarbeitung der DVGW Arbeitsblätter vor, da eine Fehlbemessung des Schüttgutes erhebliche Auswirkungen auf die Brunnenalterung haben kann. Die Ursachen der Fehlbemessung finden sich dabei in allen beteiligten Bereichen von den Probenahmen über das Labor und die Planung bis zum Bau. Als Grundproblem sieht Paul (2017) die Bestimmung des maßgebenden Korndurchmessers  $d_g$ , der im Labor mittels Standard-Siebsatz festgestellt wird und nicht an die unterschiedliche Sedimentzusammensetzung angepasst ist. Auch eine fehlende Nassabtrennung bei hohem Feinsandanteil kann eine Fehlbemessung verursachen.

## 6. Vorgangsweise und Methoden für die detaillierten Erhebungen

Da dies eine vorwiegend theoretisch orientierte Masterarbeit ist, wird in diesem Kapitel auf die verschiedenen Methoden der Informationsgewinnung und deren Analyse eingegangen. Die ursprünglich geplante Zusammenarbeit mit mehreren, im Brunnenbau tätigen Firmen hat sich schließlich auf die Kooperation mit der Firma Züblin Spezialtiefbau GmbH, kurz Züblin, beschränkt. Die Firma Züblin ermöglichte die Recherche in ihrem Brunnenbauarchiv für die Erstellung der Karte, sowie ein Interview mit ihrem Brunnenmeister Herrn Ing. Michael Willner. Da sich die ausführenden Brunnenbaufirmen meist auf ein Vortriebsverfahren spezialisieren, beziehen sich die gewonnenen Informationen zur Praxis hauptsächlich auf das Ranney- und das Ranney-Fally Verfahren.

### 6.1 Literaturanalyse

Ziel der Literaturanalyse war es, grundlegende Informationen sowie Angaben zum momentanen Stand der Technik zu den verschiedenen Bereichen des Lebenszyklus eines HFB zu sammeln und zu analysieren. Außerdem dient die Literaturanalyse der Definition der Zielsetzung und Forschungsfragen. Im Allgemeinen gliedert sich die Literaturanalyse in eine Literatursuche, die Literatúrauswahl und schließlich die Literatúrauswertung.

Ersteres wurde durch die Recherche in den folgenden Medien erreicht:

- Online-Literatursuche der Universität für Bodenkultur (BOKU:LITsearch)
- Allgemeine Internetrecherche auf „Google Scholar“, Webseiten von Firmen und Fachzeitschriften
- Rechtliche Informationen aus dem Rechtsinformationssystem des Bundes (RIS)
- DVGW Regelwerksverzeichnis
- Bestände von Privatpersonen (Zeitschriften und Tagungsunterlagen)

Für die Internetrecherche und die Recherche in allen Bibliotheksressourcen wurden folgende Schlagwörter und Kombinationen dieser verwendet: Horizontalfilterbrunnen, horizontal filter well, radial collector well, verlaufsgesteuerte Trinkwasserbrunnen, Hydrogeologie, gis and remote sensing, geoelectric, groundwater investigation, hydraulic modeling, Kosten, Bau und Betrieb Brunnen, Probleme und Mängel, Brunnenbau, Alterung, Verockerung, Regenerierung, Sanierung und Rückbau.

Die gefundene Literatur reicht von internationalen Papers, über Tagungsunterlagen, Artikel in Fachzeitschriften bis zu Fachbüchern. Die relevanten Unterlagen wurden archiviert und anschließend genauer bearbeitet. Dabei wurden themenbezogene und wesentliche Bereiche exzerpiert. Zitierte Autoren wiesen zudem auf weiterführende Literatur hin und führten so zur Vertiefung einzelner Themenbereiche.

Die gewonnenen Informationen bilden schließlich das fachliche Grundgerüst der Arbeit. Außerdem werden noch offene Fragen und Probleme während des Lebenszyklus eines HFBs aufgezeigt.

### 6.2 Interview

Mit Hilfe des Interviews werden zuvor erwähnte Fragestellungen, welche nicht alleine durch die Literaturrecherche geklärt werden können, thematisieren. Darüber hinaus wird ein Bezug zur Praxis hergestellt. Die während der Literaturanalyse entstandene Frageliste der zu behandelnden Themen diente als „roter Faden“ für das Interview. Dabei ist die Reihenfolge und Ausformulierung der Fragen nicht relevant. Viel mehr ist das Interview einem Gespräch

nachempfunden, bei dem sich durch Vorgreifen von Themen und eventuellen Zwischenfragen der Ablauf veränderte.

Das Interview mit Herrn Ing. Michael Willner von der Firma Züblin wurde am 07.07.2017 in Wien geführt und akustisch aufgezeichnet. Anschließend wurde das Interview transkribiert und ausgewertet. Die Auswertung des Interviews erfolgte durch die Extraktion der, für die Beantwortung der Fragen, relevanten Passagen und die Interpretation der Aussagen für die Forschungsfrage.

### **6.3 Karte der HFB**

Um die Datengrundlage für eine österreichweite Quantifizierung der HFB und ihrer Eigenschaften zu erstellen, wurde zu allererst das Archiv der Firma Züblin gesichtet. Dort liegen handschriftliche Berichte über die geplanten und durchgeführten Brunnenbauten ab ca. 1956 bis ca. 1990 teilweise mit kompletten Plänen vor. Jüngere Projekte wurden aus der firmeninternen Datenbank ermittelt, allerdings stehen hier weniger Informationen zur Verfügung. Die gefundenen Brunnen und ihre jeweiligen Eigenschaften werden in eine Excel-Datei eingetragen. Die Eigenschaften gliedern sich grob in allgemeine Informationen, Bauweise und Standortinformationen. Allgemeine Informationen umfassen den Brunnenbetreiber bzw. Auftraggeber, die Bezeichnung des Brunnens, das Baujahr, die Entnahmemenge sowie den Verwendungszweck. Zur Bauweise wurden Daten über das Vortriebsverfahren, die Tiefe des Vortriebshorizontes, die Anzahl und Länge der Filterstränge, ihre Anordnung, den Durchmesser des Schachtes und der Filterrohrstränge sowie das Material dieser, die mittlere Zuströmgeschwindigkeit und der gemittelte Durchmesser des Stützkörper gesammelt. Die Standortinformationen enthalten die Koordinaten des Brunnens, sowie Angaben über die Kornverteilung und Durchlässigkeit des Untergrunds.

Anschließend wurde versucht die Brunnen durch die Online-Wasserbücher der jeweiligen Bundesländer zu verifizieren und ihren genauen Standort zu bestimmen, da in den alten Aufzeichnungen, wenn überhaupt, nur Grundstücksnummern als Standortangaben dienten. Die Bundesländer Steiermark, Salzburg und Kärnten besitzen eine Datenbanksuche, die es möglich macht, HFB im Wasserinformationssystem (WIS) des jeweiligen Bundeslands durch eine einfache Stichwortsuche ausfindig zu machen. Dadurch wurden weitere Brunnen gefunden, die ebenfalls in die Excel Datei aufgenommen wurden. Da die Stadt Wien kein Online-Wasserbuch besitzt, wurde versucht, die Standorte der Brunnen, entweder durch interne Aufzeichnungen des Instituts oder durch „Google maps“ und ein GIS-System der Stadt (z.B.: Baugrundkataster oder Stadtplan) zu bestimmen, durch das Wasserbuch wurden sie jedoch, bis auf zwei Standorte, die auch im Wasserbuch von NÖ aufscheinen, nicht verifiziert. In OÖ konnte durch den Austausch mit OÖ Wasser fast alle Brunnen gefunden und verifiziert werden. In NÖ, Vorarlberg und Tirol gibt es keine Datenbanksuche, weswegen sämtliche Wasserbucheinträge von Gemeinden und Orten, in denen HFB durch die Suche im Archiv der Firma Züblin vermutet wurden, sowie von Anlagen entlang der größeren Flüsse mit Hilfe einer Schlagwortsuche, wie Horizontalfilterbrunnen, HFB und ähnliche, durchsucht wurden. Anschließend wurden die Ergebnisse manuell sortiert und zum Katalog hinzugefügt. Es muss darauf hingewiesen werden, dass durch diese Vorgehensweise vermutlich, vor allem in Niederösterreich, nicht alle bestehenden HFB gefunden werden konnten.

In den online Wasserbuchauszügen von Niederösterreich besteht zudem die Möglichkeit alte Bewilligungsbescheide einzusehen, woraus Informationen zur Bauweise der Brunnen gesammelt werden konnten.

Probleme bei der Suche nach den Brunnen machten unter anderem Fehlbezeichnungen bzw. falsch ausgewiesene Brunnen oder eine spezifische Bezeichnung. So werden HFB in OÖ teilweise nach dem Vortriebsverfahren benannt, z.B.: Ranney-Brunnen. In NÖ werden Brunnen im NÖ Atlas manchmal als Grundwasserentnahme und manchmal als Wasserversorgungsanlage ausgewiesen, was die Suche noch erschwert. Das Problem wird anhand eines Beispiels der WVA Hainburg am Brunnen IV „am Exerzierfeld“ kurz erklärt. So befindet sich laut Wasserbuchauszug die WVA Hainburg auf Grundstück 904/1, KG Hainburg an der Donau. Auf besagtem Grundstück befindet sich jedoch im Wasserbuch nur eine Grundwassermessstelle (od. Grundwasserentnahme), in deren Wasserbuchauszug mit der Postzahl BL-000058 über den Brunnen selbst keine Information zu finden ist. Im Orthofoto ist die Position des Brunnens an der Position der Messstelle jedoch nachvollziehbar, wohingegen die Position des Brunnens bzw. der WVA Hainburg auf Grund der dortigen Vegetation fragwürdig ist. Außerdem stimmen die Grundstücksnummern nicht überein.



Abbildung 6.1: Fehlbezeichnungen im NÖ Atlas

Trotzdem wurden viele Informationen zu HFB in Österreich gefunden, die anschließend durch das Program ArcGIS 10.5 verarbeitet wurden. Dazu wurde zuerst eine Basemap von Österreich in das Programm importiert. Danach werden die Excel-Daten als punktuelle Shape Files über die Koordinaten zur Karte hinzugefügt. Dabei ist es wichtig, dass die Projektion der Karte mit den Projektionen aus den jeweiligen GIS-Systemen der Länder abgestimmt wird. Mit Hilfe des Orthofotos wird die Lage der Brunnen abermals kontrolliert.

Um später eine bessere Übersicht zu gewährleisten, wird dann eine vereinfachte Karte, die nur mehr die Bundesländergrenzen sowie die wichtigsten Flüsse und Seen enthält, als Grundkarte ausgewählt. Danach werden verschiedene Eigenschaften der Brunnen in unterschiedlichen Darstellungen aus dem GIS exportiert.

## 7. Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden zuerst die Ergebnisse der Literaturrecherche der einzelnen Bereiche des Lebenszyklus dargestellt. Danach werden diese Informationen jenen aus der Praxis gegenüber gestellt. Den Abschluss der Ergebnisse bildet die Darstellung der Verbreitung von Horizontalfilterbrunnen in Österreich sowie ihrer Eigenschaften mit Hilfe von Geoinformationssystemen.

### 7.1 Planung

Dieses Kapitel widmet sich dem Planungsablauf eines HFB und geht näher auf die verschiedenen Möglichkeiten der Datenerhebung und die Feldversuche zur Charakterisierung des Untergrundes ein.

Die DVGW W 118 (2005) nennt theoretisch die folgenden notwendigen Schritte bis zum Bau eines Brunnens.

- Aufgabenstellung: notwendige Fördermenge
- Nachweis der am Standort verfügbaren Grundwassermenge: hydrologischer Nachweis des Dargebots, Wasserhaushaltsuntersuchung und Bilanzierung der Entnahme
- Hydrogeologische Standorterkundung: Aufbau Grundwasserleiter, Grundwasserhydraulik
- Vorbemessung der Fördertechnik: Festlegung der Geometrie des Fördersystems und der Oberkante des Filterrohrs
- Vorbemessung des Brunnenbaus: Empfehlung für Bohrteufe, Bohrdurchmesser, Bohrverfahren, Ausbauverrohrung und Brunnengestaltung
- Nachweis der Absenkung bei der Gewinnung am Brunnenstandort: geohydraulischer Nachweis des Dargebots am Standort, Pumpversuche
- Hydraulische Bemessung: Festlegung Filterkörnung, Schüttungslänge, Filterschlitz und Spaltweiten, Filterrohrlänge und –durchmesser
- Tragfähigkeitsnachweis der Ausbauverrohrung: Nachweis der Zug- und Außendruckfestigkeit

Das folgende Kapitel 7.1.1 behandelt vor allem die ersten drei Schritte, sowie den sechsten Punkt. Die hydraulische Bemessung und Vorbemessung des Brunnens ist in Kapitel 4.4 beschrieben.

#### 7.1.1 Voruntersuchungen

Die Grundlage für die Bauplanung eines Horizontalfilterbrunnens sollte laut DVGW W 128 ein hydrologisches Gutachten sein, welches das Einzugsgebiet des Brunnens ermittelt, das nutzbare und förderbare Grundwasserdargebot errechnet und die optimale Lage, Bemessung, Bau- und Ausbauf orm des Horizontalfilterbrunnens nach Ergiebigkeit und Geschütztheitsgrad bestimmt.

Ziel der Voruntersuchung ist es den Grundwasserleiter und seine Eigenschaften und somit den optimalen Standort für den geplanten Brunnen zu kennen. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf der Erkundung der hydraulischen Eigenschaften, der Grundwasserbeschaffenheit, der Deckschichten, der Grundwasserneubildungsrate, der Grundwasserfließrichtung, der Einzugsgebietsgrenzen sowie der Mächtigkeit, Verbreitung, Art und Struktur des Aquifers. Außerdem soll das Brunneneinzugsgebiet möglichst frei von konkurrierenden Nutzungen und anthropogenen Einflüssen sein und nachhaltig vor solchen durch ausgewiesene Schutzgebiete bewahrt werden (DVGW W 128). Dabei ist hervorzuheben, dass es sich bei konkurrierenden

Nutzungen auch um ökologische Nutzungen handeln kann. In diesem Sinne sollen negative Einflüsse auf die Umwelt, wie signifikante Verringerung des Zuflusses zu Feuchtgebieten, Quellen oder hauptsächlich Grundwasser gespeisten Flüssen, sowie Geländesetzungen durch kompressible Lockergesteinskörper oder durch Entwässern von organischen Sedimenten und das Eindringen von salzhaltigem Wasser in Küstenregionen vermieden werden (Misstear, Banks & Clark, 2007, S.31).

In nachfolgendem Flussdiagramm (Abbildung 7.1) sind die Schritte einer Voruntersuchung zur Grundwassererschließung aufgezeigt, die im folgenden Kapitel beschrieben werden. Die Voruntersuchung sollte aber auch auf den jeweiligen Brunnen abgestimmt sein und besteht in manchen Fällen vielleicht nur aus einer Recherche und einer Abklärung im Feld, während in anderen Fällen alle Schritte des Flussdiagramms befolgt werden sollten.

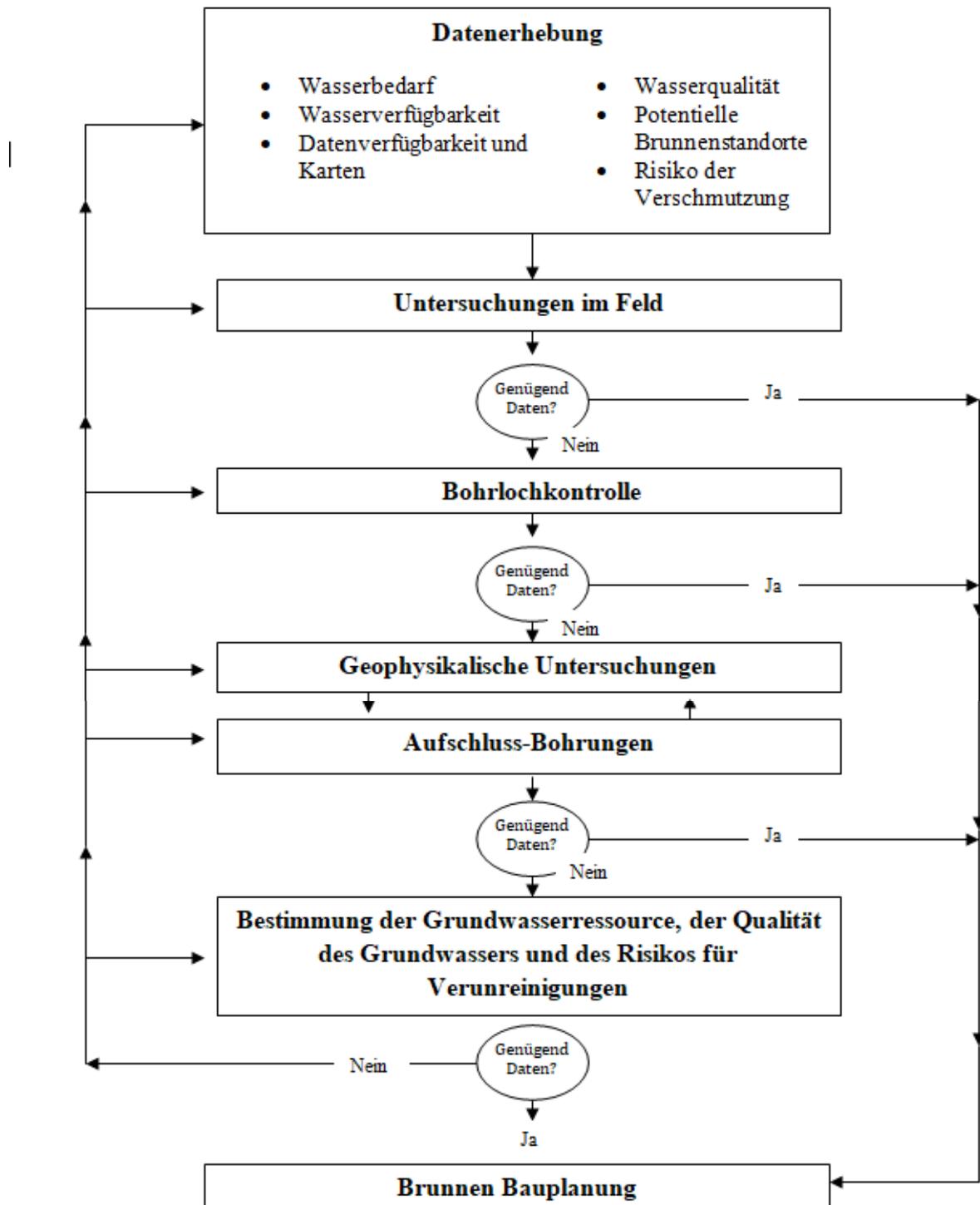


Abbildung 7.1: Flussdiagramm zur Datenerhebung (übersetzt nach Misstear, Banks & Clark, 2007 )

### 7.1.1.1 Datenerhebung – „Desk Studies“

(nach Misstear, Banks & Clark, 2007, S.34 ff)

Der erste Schritt der Datenerhebung sollte sein, die Ziele der Grundwassererschließung durch folgende grundlegende Fragen zu bestimmen:

- Wie viel Wasser wird benötigt?
- Welche Wasserqualität wird angestrebt? (Trinkwasser, Brauchwasser, etc.)
- Wie viele Brunnen werden benötigt? Varianten?
- Wie viel hydrogeologische Informationen gibt es bereits?
- Wo gibt es Datenlücken und wie können sie geschlossen werden?
- Auf welche sozialen, ökologischen, wirtschaftlichen und politischen Spannungsfelder wird man bei der Standortauswahl und beim Betrieb des Brunnens treffen?

Vergleichend nennt die ÖNORM B 2601 folgende Grundlagen, die zur Erstellung der Projektunterlagen vorrangig ermittelt werden sollten:

- Erforderliche Vereinbarungen, Bewilligungen und einschlägige Rechtsvorschriften
- Angestrebte Wasserentnahmemengen, Verwendungszweck
- Bestehende Rechte im Umfeld
- Hydrologische und hydrogeologische Verhältnisse
- Risikoanalyse

Zuallererst steht also die Ermittlung des Wasserbedarfs. Hierbei wird grundsätzlich unterschieden zwischen dem:

- Mittleren Bedarf: für die hydrologischen Untersuchungen maßgebend,
- Spitzenbedarf: für die Auslegung der technischen Einrichtungen maßgebend

In Österreich liegt der Wasserbedarf laut einer Veröffentlichung des BMLFUW (2012) im städtischen Bereich bei 200 l/E\*d im ländlichen bei 150 l/E\*d, diese Abschätzung beinhaltet Haushalte inkl. sonstiger Verbraucher, wie Gewerbe und Industrie. Die Berechnung des Bedarfs erfolgt mittels ÖNORM B 2538.

Nach der Berechnung des Wasserbedarfs und der Abklärung der Varianten ergibt sich ein Erschließungsziel, welches die Grundlage für die hydrogeologischen Untersuchungen sein sollte.

Grundlegend erforderliche Daten und mögliche Quellen dieser sind in Tabelle 7.1 dargestellt.

Tabelle 7.1: Benötigte Daten und Datenquellen

<b>Erforderliche Daten</b>	<b>Datenquellen</b>
Topografische Karten	BEV, oe3D (DGM)
Geologische Karten	Geologische Bundesanstalt
Boden- und Landnutzungskarten	Landinformationssystem LISA, CORINE, Joint Research Centre Ispra (JRC) - European Soil Portal, österreichische Bodenschätzung
Hydrogeologische Karten (Grundwasser) Schutzgebiete	WISA, Natura 2000 Schutzgebiete
Geologie, Hydrologie, Standortuntersuchungen und	WISA, BMLFUW, Behörden der Länder, beratende

andere relevante Gutachten	Firmen, NGOs, hydrologischer Atlas Österreich
Luftbilder und Satellitenbilder	Behörden der Länder, Internationale Ämter für die Verteilung von Landsat-, SPOT- und anderer Satellitendaten
Brunnen und Bohrlochgutachten	Geologische Bundesanstalt, beratende Firmen, Tiefbauunternehmen, Online GIS der Bundesländer
Wasserstands- und Wasserqualitätsdaten	ehyd, Behörden der Länder, Wasserwerke,
Existierende Grundwasserentnahmen	ehyd, Behörden der Länder (Online Wasserbücher und WasserInformationssysteme (WIS)), Wasserwerke,
Abflussdaten von Flüssen	ehyd, Behörden der Länder, lokale Unternehmen, beratende Firmen, Global Data Runoff Center GDRC
Klimadaten	ZAMG, ECMWF, CHRS

In vielen Ländern gibt es bereits detaillierte Untersuchungen zur Hydrogeologie und deren Ergebnisse sind zumeist auch verfügbar. Darum kann es in gut erschlossenen Gebieten vorkommen, dass genauere Untersuchungen im Feld, nicht jedoch abklärende Geländebegehungen, überflüssig werden. In manchen Ländern werden Daten von den Regierungen nicht freigegeben, da sie als Sache nationaler Sicherheit angesehen werden oder sie sind schlichtweg nicht vorhanden, weil keine Vernetzung zwischen den Messstationen existiert oder sie noch nicht lange genug im Einsatz sind, um repräsentative Daten zu produzieren (Lakshmi, 2016). Dann liegt es am Planer sich vorweg über historische Berichte, im Gespräch mit Ortskundigen oder mittels Fernerkundung ein Bild zu machen, da Feldversuche meist mit einem erheblichen Kostenaufwand verbunden sind.

Am Ende der Datenerhebung sollten die Information, die aus den unterschiedlichen Quellen gewonnen wurden, in eine Projekt-Datensammlung aufgenommen werden, die folgende Grundkarten des Gebiets enthält:

- Topographie und Oberflächenentwässerung
- Boden und Landnutzung
- Geologie, inklusive oberflächliche Ablagerungen und Felsformationen, Lage von Störungen
- Hydrogeologie, inklusive Tiefe und Mächtigkeit des betroffenen Grundwasserleiters, Grenzen des Grundwasserleiters, Anreicherungs- und Abflussgebiete, Lage von Quellen und existierenden Brunnen, Brunnenschüttung, Grundwasserdruckfläche, Grundwasserqualität und Lage von Pegelmessstationen an Oberflächengewässern

Dabei hat sich der Einsatz von geographischen Informationssystemen (GIS) bewährt, welche Karten und Sachinformationen verbinden, indem sie räumliche Daten durch Überlagerungstechniken integrieren, speichern, analysieren und darstellen. Obwohl die Verwendung von GIS die Manipulation von Daten erleichtert, hängt der Erfolg des Systems stark von der Qualität der Daten, dem gewählten Format für den Austausch der Daten und deren Auflösung ab. Durch die Darstellung von räumlich verteilten Informationen in einheitlichen Plänen kann Information verloren gehen. Darüber hinaus kann das Überlagern der Daten zu einer Fehleranhäufung führen. Weiters nennt Sander (1999 zit. in Misstear, Banks & Clark, 2007, S.35) das Problem, dass die Daten der Brunnenschüttung und der spezifischen Ergiebigkeit, die in der Datengrundlage gespeichert sind, für das hydrogeologische Regime nicht vollkommen repräsentativ sein können, da zuweilen trockene Bohrlöcher mit aufgenommen werden und

Informationen von Pumpversuchen aus den besseren Brunnen die Ergebnisse verfälschen. Grundsätzlich sollte Wert auf die Genauigkeit der Daten (Koordinaten, Daten, etc.) gelegt werden und Inputdaten auf ihre Qualität und Verlässlichkeit geprüft werden.

Eine wesentliche Rolle in der Datenerhebung spielt die Fernerkundung. Sie liefert die Informationen, die mit Hilfe des GIS verarbeitet werden können. Dabei werden Luftaufnahmen und Satellitenbilder verwendet, um Rückschlüsse auf den Grundwasserhaushalt und die Grundwassereigenschaften zu ziehen. Aus Satellitenbildern können beispielsweise Informationen zu Bodenbedeckung, Topographie, Entwässerungsvorgängen und Vegetation gesammelt werden, welche dann zur Identifikation von Anreicherungs- und Abflussgebieten herangezogen werden. Ein großer Vorteil der Fernerkundung ist dabei, dass große und auch schwer bis nicht zugängliche Gebiete innerhalb kurzer Zeit untersucht werden können (Nag & Saha, 2014). Nag & Saha (2014) berichten von einer 90-prozentigen Erfolgsquote beim Einsatz von Fernerkundung zur Ortsbestimmung von Bohrungen. Bei der Analyse von großen Arealen erwähnen Hölting & Coldewey (2012, S. 241) konkret die Auswertung hochauflösender Satellitendaten von QUICKBIRD- oder IKONOS-Sensoren oder bereits verfügbarer hyperspektraler Scanner (HyMAP- oder ENMAP-Daten), welche auf Grund ihrer Infrarot-Sensibilität in der Lage sind, durchfeuchtete Oberflächen und physikochemische Bodenparameter vom Flugzeug bzw. Satelliten aus zu erfassen.

Die Sensoren der Satelliten speichern reflektierte und emittierte Strahlung im sichtbaren und infraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Verschiedene „Materialien“ der Erde zeigen unterschiedliche spektrale Reflektionen. So hat Vegetation zum Beispiel eine höhere Reflexion als trockener Fels. Geologische Strukturen können so relativ leicht von den Satellitenbildern abgeleitet werden. Vor allem bei kristallinen Gesteinen und Festgesteinen, bei denen Verwerfungen, welche auf Spalten, Bruchlinien und andere hydrogeologische Besonderheiten hinweisen, schnell gefunden werden. Die beiden meistgenutzten Satellitensysteme sind das amerikanische Landsat und das europäische SPOT. Daten dieser Systeme können digital oder als Ausdruck erstanden werden.

Obwohl mit Hilfe der Fernerkundung viele Informationen gewonnen werden können, sollte eine Begutachtung im Feld nicht ausbleiben, bevor die Planung konkretisiert wird. Eine Begehung hilft ein besseres Verständnis für die Hydrogeologie des Gebietes zu bekommen und vorhandene Brunnen und Bohrlöcher ausfindig zu machen. Zudem ergibt sich die Möglichkeit mit Anrainern zu sprechen und eventuelle Probleme mit Brunnen oder Wasserqualität schon vorab zu klären. Wenn es sich bei der geplanten Anlage um eine öffentliche Brunnenanlage handelt, sollte die Beteiligung der Bürger und Betroffenen ohnehin von vornherein geplant sein. Darüber hinaus ist es wichtig, die Bedingungen für etwaige geophysikalische Untersuchungen im Feld zu klären: Gibt es zum Beispiel Stromleitungen, die den Einsatz von elektromagnetischen Methoden unmöglich machen? Oder gibt es erhebliche Lärmquellen, die den Einsatz von seismischen Untersuchungen stören könnten? Des Weiteren ist es vorteilhaft sich vor Ort ein Bild über mögliche Quellen für Verunreinigungen zu machen und bereits die Grundwasservulnerabilität abzuschätzen. Außerdem kann die Begehung im Feld helfen die Standortsuche für Bohrlöcher zu verbessern, indem kulturelle Faktoren, wie Akzeptanz, Bohrlochsicherheit oder Überflutungsprobleme, geklärt werden.

Nachdem bei der Begutachtung im Feld die Standorte existierender Brunnen verifiziert wurden, ist es wichtig Daten dieser in die Projekt-Datensammlung mit aufzunehmen. Die Brunnenuntersuchungen sollten Informationen zu Grundwasserstand (in Ruhe und während des Pumpvorgangs), Konstruktion, derzeitiger Status und Verwendung des Brunnens, Förderrate, Betriebsstunden der Pumpe und Wasserqualität enthalten. Gemeinsam mit den Erkenntnissen aus der Datenerhebung und den späteren Bohrungen können so die Lage der Grundwasserdruckfläche und die Wasserqualität des Gebietes hergeleitet werden.

## 7.1.1.2 Feldversuche – Field Study

### 7.1.1.2.1 Geophysikalische Untersuchungen

Geophysikalische Untersuchungen können Daten zur Geologie, Aquifergeometrie und zur Wasserqualität liefern, indem sie messbare physikalische Eigenschaften der anstehenden Gesteine, wie Variationen der Dichte, der elektrischen Leitfähigkeit oder des elektrischen Potentials bestimmen. Ihr Einsatz sollte im vorhinein genau geplant sein und man sollte sich dessen bewusst sein, dass geophysikalische Untersuchungen oft nicht zu einem universellen geologischen Modell führen, da mehrere Interpretationen der Untersuchungsergebnisse möglich sind und komplizierte geologische Verhältnisse häufig gar nicht interpretierbar sein können. Zudem werden geringe Unterschiede der Messgrößen oft gar nicht erfasst (Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000, S.315). Aus diesem Grund empfiehlt es sich, die Untersuchungen durch Versuchsbohrungen zu ergänzen. Dieser kombinierte Ansatz ist zudem meist günstiger, als sich nur auf Bohrungen zu verlassen, da die Anzahl der Bohrlöcher verringert werden kann. In Tabelle 7.2 werden die in der Grundwassererschließung hauptsächlich verwendeten geophysikalischen Methoden und ihre Anwendungsgebiete beschrieben. Die laut Misstear, Banks & Clark (2007, S. 43 ff) am meisten verwendeten Methoden werden anschließend genauer beschrieben.

Tabelle 7.2: Geophysikalische Untersuchungen (nach Misstear, Banks & Clark, 2007, S.44)

Physikalisches Prinzip	Methode	Anwendungsgebiete
Elektrischer Widerstand	Geoelektrische Sondierung (Vertical electrical soundings) VES	Tiefe zum Grundgesteins, Dicke von künstlichen Ablagerungen, Tiefe des Wasserspiegels, Tiefe von Verwitterungszonen in kristallinen Gesteinen, Tiefe salzhaltiger Schichten, Eigenschaften des Grundwasserleiters
	Geoelektrische Widerstands Profilierung	Ortung von verschütteten Tälern; Ortung von vertikalen und fast vertikalen Bruchzonen, Tiefe von Verwitterungszonen in kristallinen Gesteinen, Ortung von Kontaminationsfahnen
	Geoelektrische Kartierung	Zwei- und dreidimensionale Bilder, verbindet viele Anwendungsgebiete von VES und Widerstands Profiling
Elektromagnetik (EM)	Boden Durchlässigkeits Profiling	Ähnlich wie Widerstands Profiling
	Time Domain EM (TDEM)	Ähnlich wie VES, aber größere Tiefen
	Niedrigfrequenz (Very low frequency) VLF	Hauptsächlich zur Ortung von vertikalen Bruchzonen, Tiefe zum Grundgestein und Tiefe des Wasserspiegels
	Surface nuclear magnetic field resonance (SNMR)	Aquifergeometrie und -eigenschaften
Magnetometermessung	Magnetische Feld Anomalie	Ortung von Bruchzonen und ursprünglichen Dükkern
Seismik	Refraktionsseismik	Tiefe zum Grundgesteins, Dicke von künstlichen Ablagerungen, Tiefe des Wasserspiegels, Tiefe von Verwitterungszonen in kristallinen Gesteinen, Ortung von Bruchzonen

Georadar	GPR (Ground Penetrating Radar)	Dicke von Sand- und Kiesaquiferen, Tiefe zum Grundgestein, Tiefe des Wasserspiegels, Ortung von Bruchzonen oder Hohlräumen in Karst
Gravität	Gravitäts- und Mikrogravitätsuntersuchungen	Geometrie extensive Sedimentaquifere, Ortung von verschütteten Tälern, Ortung von Hohlräumen in Karst

### Elektrische Widerstandsmessungen – Leitfähigkeit der Gesteine

Mit Hilfe der elektrischen Leitfähigkeit lassen sich Aussagen über Porosität, Wassergehalt, Tongehalt und Beschaffenheit des Porenwassers treffen. Bei den geoelektrischen Messungen wird der Kehrwert der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit verwendet: der elektrische Widerstand in Ohm\*m. Trockene Sande und kristalline Gesteine haben hohe, gesättigte Sande und Festgesteine niedrige elektrische Widerstände. Die geringsten Werte weisen Tone und salzhaltige Schichten auf. Abbildung 7.2 zeigt Erfahrungswerte für den elektrischen Widerstand von verschiedenen Gesteinen.

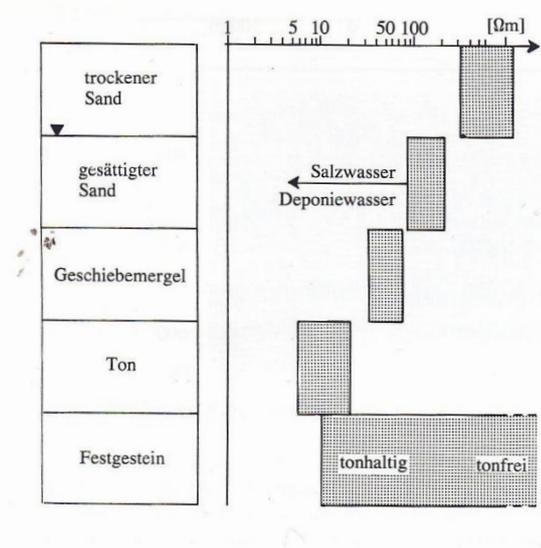


Abbildung 7.2: Erfahrungswerte für den spezifischen Widerstand von Gesteinen (aus Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000, S.322)

Der Widerstand wird gemessen, indem eine elektrische Welle zwischen zwei Elektroden über den Boden geleitet wird und die Potentialdifferenz von zwei weiteren Elektroden gemessen wird. Der Widerstand wird dann nach dem Ohmschen Gesetz berechnet und anschließend mit einem Faktor für die gewählte Anordnung der Elektroden multipliziert. Die am häufigsten verwendeten Anordnungen bei der Grundwassererschließung sind die von Wenner und Schlumberger. Es gibt drei Arten der elektrischen Widerstandsmessung: Die geoelektrische Sondierung, die geoelektrische Profilierung und die geoelektrische Kartierung.

### Elektrische Sondierung (VES)

Das VES dient der Bestimmung des Schichtenaufbaus des Untergrundes. Bei einer Sondierung in Schlumberger Anordnung (Abbildung 7.3) bleibt die Spannungselektrode in einem zentralen Punkt ortsfest, während die Stromelektroden bei jeder Messung nach außen versetzt werden (Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000, S.326). Die Untersuchungstiefe wächst mit steigender Entfernung der Elektroden. Die maximal erreichbare Tiefenbestimmung liegt bei einem Faktor 0,44 der Entfernung bei der Wenner Anordnung und 0,46 bei Schlumberger.

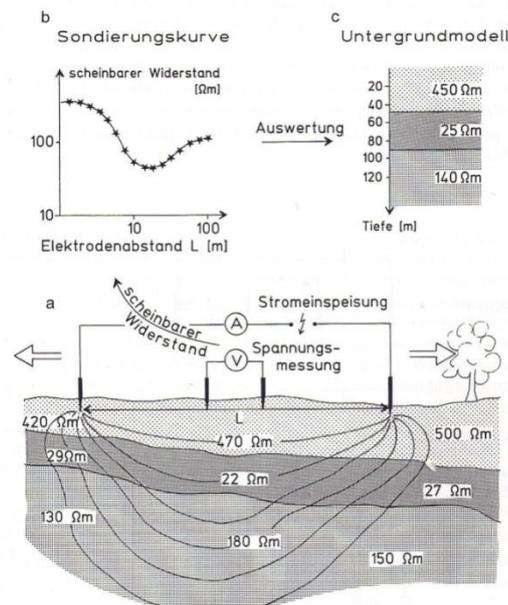


Abbildung 7.3: Funktion einer geoelektrischen Sondierung in Schlumberger Anordnung (aus (Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000, S.326)

Die optimalen Untersuchungstiefen liegen aber zwischen 0,17 und 0,19 der Entfernung (Misstar, Banks & Clark, 2007, S.45). Die Analyse der Beziehung zwischen Elektrodenentfernung und Widerstand liefert dann die Dicke und den Widerstand der geologischen Schicht. Sie wird entweder manuell mit Typkurven oder mittels Computer ausgewertet. Der Einsatz von elektrischer Sondierung ist bei horizontalem Schichtaufbau am gebräuchlichsten, da sie bei lateralen Inhomogenitäten und nicht söhligem Aufbau zu Fehlinterpretationen führen kann. Ein weiterer Nachteil ist, dass es in ariden Regionen zu Problemen beim Kontaktaufbau zwischen Elektrode und Boden kommen kann. Außerdem dauert das VES im Vergleich zu anderen Methoden, die ähnliche Ergebnisse liefern, länger.

### Geoelektrische Profilierung

Die geoelektrische Profilierung wird in Wenner Anordnung mit konstantem Elektrodenabstand durchgeführt. Der Abstand wird von der gewünschten Untersuchungstiefe abgeleitet. Das Untersuchungsgebiet wird linear gequert und der Widerstand an Stationen gemessen. Die Profilierung sollte im rechten Winkel auf die Orientierung von Spalten oder anderen interessanten Bodenformen erfolgen, die zuvor aus anderen Quellen abgeschätzt wurden. Die geoelektrische Profilierung wurde bis in die 1980er Jahre intensiv genutzt, in den letzten Jahren wurde sie aber immer mehr durch elektromagnetische Methoden ersetzt.

### Geoelektrische Kartierung

Diese Methode verbindet die beiden oben genannten Methoden, indem eine Reihe von Profilen entlang einer Untersuchungsstrecke gemacht wird und nach jedem Profil der Abstand der Elektroden vergrößert wird. Das Ergebnis ist eine zweidimensionale Abbildung des Widerstandes und der Elektrodenentfernung. Von einer ersten Umwandlung in einen „Pseudo Querschnitt“ gelangt man mittels Inversion zu wahren Ergebnissen für Widerstand und Tiefe. Mehrere zweidimensionale Bilder entlang verschiedener Profile können zudem zu einem 3D Bild kombiniert werden. Außerdem gibt es die Möglichkeit eine Zeitkomponente einzufügen, um die Veränderung des Widerstandes mit der Zeit zu zeigen. Dies beruht auf einer Änderung des Feuchtegehalts und kann bei Untersuchungen zur Grundwasserneubildung oder beim Abschätzen von Auswirkungen eines Pumpversuchs von Nutzen sein. Das Konzept der geoelektrischen

Kartierung wird auch im RESCAN verwendet, welches Elektroden in Bohrlöchern nutzt, um dreidimensionale Widerstandsmodelle eines Grundwasserleiters herzustellen (Missteary, Banks & Clark, 2007, S.49).

### **Elektromagnetik**

Nach (Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000, S.49 ff)

Die elektromagnetischen Verfahren werden in Induktionsverfahren und Reflexionsverfahren unterteilt. Induktionsverfahren nutzen ebenfalls die Leitfähigkeit des Untergrundes, mit dem wesentlichen Unterschied, dass kein direkter Kontakt zum Boden hergestellt werden muss, weswegen sie meist schneller und billiger sind. Je nachdem ob ein Verfahren im Frequenz oder Zeitbereich arbeitet, wird es als Slingram oder TEM Verfahren bezeichnet. Unter Reflexionsverfahren wird das Bodenradar verstanden.

Beim Slingram Verfahren wird mit Wechselstrom in einer Spule ein elektromagnetisches Feld erzeugt, welches in den Untergrund Wirbelströme induziert. Diese Wirbelströme, deren Stärke von der Leitfähigkeit abhängig ist, produzieren ein sekundäres elektromagnetisches Feld. Mit einer zweiten Spule wird dann die Überlagerung von primärem und sekundärem Feld gemessen und daraus die mittlere elektrische Leitfähigkeit des Bodens berechnet. Die Untersuchungstiefe wird wiederum durch den Abstand zwischen den beiden Spulen bestimmt. Das Verfahren wird meist zur Bestimmung von grundwasserführenden Kluftzonen genutzt, da diese, wie bereits erwähnt, eine höhere Leitfähigkeit als das Umgebungsgestein besitzen. Eine vereinfachte Form der Induktionsmessung ist das VLF-Verfahren, bei dem das Feld entfernter Radiosender im niedrigen Frequenzbereich ausgenutzt wird. Beim Überqueren einer Störungszone mit erhöhter Leitfähigkeit ergibt sich eine Anomalie des Messsignals, welche einen Hinweis auf ihre Lage liefert.

Beim TEM (Transient EM) oder TDEM (Time Domain EM) Verfahren wird die Sendespule mit Gleichstrom gespeist und dann abgeschaltet. Dadurch entstehen wiederum Wirbelströme im Untergrund, deren Abklingen in der Tiefe von der Empfangsspule gemessen wird. Die Auswertung des Signals ergibt, wie bei der geoelektrischen Sondierung, die Widerstandsverteilung im Untergrund. Mit dem TEM Verfahren ist es allerdings möglich Tiefen von mehreren hundert Metern zu untersuchen.

### **Georadar**

Beim GPR (Ground Penetrating Radar) werden eine Sende- und eine Empfängerantenne entlang eines Messprofils bewegt. Dabei werden Hochfrequenzimpulse (zwischen 10 und 1000 MHz) abgestrahlt und nach deren Reflektion an Grenzflächen im Empfänger gemessen. Die Ergebnisse werden in einem Radargramm dargestellt und ergeben ein nahezu kontinuierliches Abbild des Untergrundes. Die Ausbreitung des Radarimpulses wird durch die Dielektrizitätskonstante des Untergrundes bestimmt. Da Wasser eine hohe Dielektrizitätskonstante besitzt, kommt es bei Änderungen des Wassergehalts, und damit oft einhergehender Änderung der Porosität, zu einer Reflektion des Impulses. Die Eindringtiefe des Radars ist bei Gesteinen mit niedriger spezifischer Leitfähigkeit, wie Kiesen und Sanden, am besten. Hier können Untersuchungstiefen von bis zu 50 m erreicht werden (Missteary, Banks & Clark, 2007, S.45).

### **Gravitätsmessungen**

Die gravimetrischen Verfahren vermessen das natürliche Schwerfeld und ziehen aus dessen Anomalien Schlüsse auf die Struktur des Untergrundes. Dabei entstehen solche Anomalien aufgrund von Dichteunterschieden. Die Messung erfolgt mittels Gravimetern, welche die Kraft bestimmen, die notwendig ist, um ein Gewicht gegen die Erdbeschleunigung in einer Null-Lage zu halten (Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000, S.333).

Mit dem Projekt GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), das die Auswertung von Gravitätsmessungen nutzt, kann die Veränderung des Gesamtwasserspeichers eines Gebiets berechnet werden. Berücksichtigt man dann auch die anderen Terme der Wasserbilanzgleichung, Evapotranspiration, Abfluss, Niederschlag und Bodenfeuchte, so lässt sich daraus, mit Hilfe von Beobachtungen und Modellen, die Änderung im Grundwasserspeicher feststellen. Obwohl die Auswertungen des GRACE auf Grund seiner niedrigen räumlichen Auflösung ( $> 150000 \text{ km}^2$ ) für die oft hoch variablen Grundwasserbewegungen angezweifelt werden, können die gewonnenen Informationen unterstützend zu Satellitendaten der anderen Wasserbilanzelemente Verwendung finden (Lakshmi, 2016).

### 7.1.1.2.2 Bohrloch Geophysik

Die **Aufschlussbohrungen** dienen der Absicherung und Überprüfung der in den vorherigen Untersuchungen festgestellten Ergebnisse. Der Entscheidung, wo gebohrt wird, sollte dabei folgendes einfaches Konzept zugrunde liegen: Jedes Bohrloch soll die Antwort auf eine offene Frage sein. Somit soll die Zahl an ersten Aufschlussbohrungen und folgend die Kosten gering gehalten werden. Des Weiteren sind Aufschlussbohrungen meist senkrecht, obwohl schiefe Bohrlöcher vor allem bei Kluft- und Karstgrundwasserleitern mehr Informationen liefern können, da ein größerer Querschnitt des Untergrunds aufgeschlossen werden kann (Misstear, Banks & Clark, 2007).

Da Kernbohrungen zur Grundwassererschließung sehr teuer sind, beschränkt sich die lithologische Untersuchung meist auf Gesteinsproben, die vom Bohrmeister genommen werden. Da diese Art der Beprobung jedoch sehr fehleranfällig ist und falsche Schlüsse nach sich ziehen kann, wurden verschiedene Methoden der Bohrloch-Geophysik entwickelt, um die Bohrlöcher direkt zu untersuchen (Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000, S.335).

Nachfolgend sind **gängige Methoden der Bohrlochuntersuchung** nach Hölting & Coldewey (2012, S.255-259) kurz beschrieben. Die passende Methode ist aufgrund der vorliegenden Gesteinsparameter, der verwendeten Bohrlochflüssigkeit (Bohrspülung) und der Bohrlochform zu wählen.

- **Geoelektrische Logs** messen den scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstand der Gesteine und ihren Wassergehalt oder das elektrische Eigenpotential (SP-Log). Ersteres erfolgt mittels zweier Elektroden, wobei eine Elektrode an der (Erd-) Oberfläche fest installiert (Erdungselektrode), die andere in das Bohrloch eingeführt wird. Die Messung ist sehr grob und ermöglicht nur näherungsweise eine Schicht-Parallelisierung, ähnlich der VES nur im Bohrloch. Das SP-Log funktioniert ohne Strom, sondern mit dem elektrischen Potential des Untergrundes. Dieses bildet sich zwischen Tonen und Sanden und zwischen der Bohrspülung und dem Grundwasser aus, sofern unterschiedliche Konzentrationen vorhanden und dadurch Ionenwanderungen zum Ausgleich des Konzentrationsgefälles möglich sind. Es dient der Identifizierung von Tonschichten und der Feststellung der Inhaltsstoffe des Grundwassers (bei Kenntnis des elektrischen Widerstands der Bohrspülung). Diese Messungen sind nur in unverrohrten Bohrlöchern möglich.
- **Gamma Log:** Diese Untersuchung nutzt die  $\gamma$ -Eigenstrahlung von Tonsteinen, um den Tongehalt in den einzelnen Schichten zu bestimmen, je stärker die Gegenstrahlung desto mehr Tongehalt.
- **Gamma-Gamma Log:** Die Absorption von  $\gamma$ -Quanten im Gebirge, die von einer  $\gamma$ -Strahlungsquelle emittiert werden, wird gemessen. Sie hängt von der Gesteinsdichte ab und lässt so auf diese schließen.
- Bei **Neutron Gamma Logs** werden schnelle Neutronen emittiert, deren Geschwindigkeit durch Zusammenprall mit massengleichen  $\text{H}^+$ -Ionen infolge elastischen Stoßes soweit vermindert wird, dass sie von diesen eingefangen werden. Dabei werden  $\gamma$ -

Strahlungsquanten frei, deren Intensität gemessen wird. Die so entstandene (Sekundär-) Intensität ist ein Maß für den Gehalt an H<sup>+</sup>-Ionen im Gebirge und damit für den Wassergehalt und die Porosität. Nach Abzug der  $\gamma$ -Eigenstrahlung des Gebirges kann dann die Porosität und damit die Grundwasserführung abgeschätzt werden. Der Einsatz dieser Methode beschränkt sich auf kleine Bohrdurchmesser.

- Sonic- oder **Akustik-Logs** nutzen die Laufzeit von Ultraschallimpulsen zur Dichtemessung und zur Feststellung der Porosität bzw von Klüften.
- **Kaliber Logs** messen mit Hilfe von elektromechanischen oder akustischen Messsystemen kontinuierlich den Bohrlochdurchmesser und geben so Hinweise auf Unregelmäßigkeiten, wie Auskolkungen und unverfestigte Gesteine. Sie sollten zur Fehlereliminierung bei anderen Logs herangezogen werden.
- **Temperatur Logs** messen Temperatursprünge, die durch eine veränderte Zusammensetzung des Grundwassers entstehen.
- **Deviations-Logs** messen die Abweichung des Bohrlochs von der Lotrechten. Dabei wird die Neigung über ein Pendel bzw. Schwerkraftsystem oder mit Hilfe von zwei Inklinometern die Richtung über ein kardanisch gelagertes Kompasssystem ermittelt.
- Beim **Dipmeter-Log** werden Streichen und Fallen der Gesteinsschichten gemessen, indem drei oder vier Mikrowiderstands-Messsysteme die Bohrlochwand abtasten und den Widerstand messen.
- **Flowmeter-Logs** messen die Strömungsgeschwindigkeit der Zuströmung aus der jeweiligen grundwasserführenden Schicht und können so die Anteile verschiedener Schichten zum Grundwasser feststellen. Die Messung erfolgt zuerst bei abgeschalteter Pumpe und danach bei laufender Pumpe und ist nur in unverrohrten Bohrlöchern sinnvoll. Vergleichsmessungen nach einer gewissen Zeit können Aufschluss über etwaige verstopfte Filterabschnitte oder Kolmation liefern.

Zusätzlich zu diesen Methoden kommt, vor allem bei der späteren Kontrolle des Brunnens, folgendes optische Verfahren zum Einsatz:

- **Photo- und Fernsehlogs (Kamerabefahrungen)** sind schlichtweg Aufnahmeserien, die mit speziellen Unterwasserkameras in verschiedenen Tiefen erstellt werden. Im Bohrloch geben sie Auskunft über die Eigenschaften, sowie das Streichen und Fallen der Gesteine. Fernsehlogs oder Kamerabefahrungen werden auch zur Untersuchung auf Leistungsstörungen durch Beschädigungen oder Alterungserscheinungen im Zusammenhang mit der Abnahme neuer, reparierter oder regenerierter Brunnen oder zur routinemäßigen Prüfung dieser eingesetzt.

Treskatis & Betschart (2012) verwenden in ihrer Studie Kamerabefahrungen, Kaliberlogs, Temperatur- und Leitfähigkeitslogs sowie Flowmeter-Logs, um den Zustand des Filterstrangs, des Grundwassers und die Strömungsverhältnisse im und zum Filterstrang zu messen.

In einer detaillierten Untersuchung werden dann quantitative Informationen über die Eigenschaften des Grundwasserleiters und die potentielle Brunnenschüttung gewonnen und so die Aufschlussbohrungen ergänzt. Dabei spielen die Beziehungen zwischen Grundwasserleiter, Grundwasserneubildungsrate und Oberflächengewässer eine besondere Rolle, die von **Beobachtungsbohrlöchern** aus untersucht werden. Mit Hilfe von Beobachtungsbohrlöchern wird die Reaktion des Grundwassers auf Neubildungsevents im jährlichen Verlauf bestimmt. Bohrlöcher entlang von Flüssen können die Wechselwirkungen zwischen Grundwasser und Oberflächengewässer entschlüsseln. Vorteilhaft sind hierfür kontinuierlich aufzeichnende Messstellen in den Bohrlöchern. Des Weiteren können die Bohrlöcher zur Entnahme von Grundwasserproben für die Untersuchung der Wasserqualität dienen (Misstear, Banks & Clark, 2007).

Weitere Informationen zu Transmissivität und Speicherkapazität liefern schließlich **Testbrunnen**. Die beiden Parameter sind notwendig um die Auswirkungen spezifischer Förderraten und -zeiten auf den Grundwasserleiter zu bestimmen. Sie werden mittels Pumpversuchen in den Testbrunnen ermittelt. Testbrunnen sind kostspielige Einrichtungen und ihre Zahl ist oft durch das Budget begrenzt. Prinzipiell gilt aber, dass bei jeder signifikanten Änderung der Lithologie im Untersuchungsgebiet ein Testbrunnen vorzusehen ist. Die durchgeführten Pumpversuche dauern nur im Ausnahmefall mehrere Wochen, und doch wird aus ihren Ergebnissen das Verhalten über mehrere Jahre abgeschätzt. Außerdem erfassen sie meist nur einen Teil des Grundwasserleiters und die gewonnenen Parameter sind meist nicht perfekt. Im Zusammenhang mit den Pumpversuchen sollten zudem Grundwasserqualitätsproben im zeitlichen Verlauf genommen werden, um etwaige Veränderungen zu dokumentieren. Dabei sollte mindestens eine Wasserprobe, die gegen Ende des Pumpversuchs genommen wurde, einer vollständigen Laboranalyse unterzogen werden. Um Einflüsse der Bohrungen und frischer Felsflächen auf die Grundwasserqualität auszuschließen, ist es zudem erforderlich, nach einer gewissen Zeit (z.B.: 6 Monaten) eine Vergleichsprobe zu ziehen.

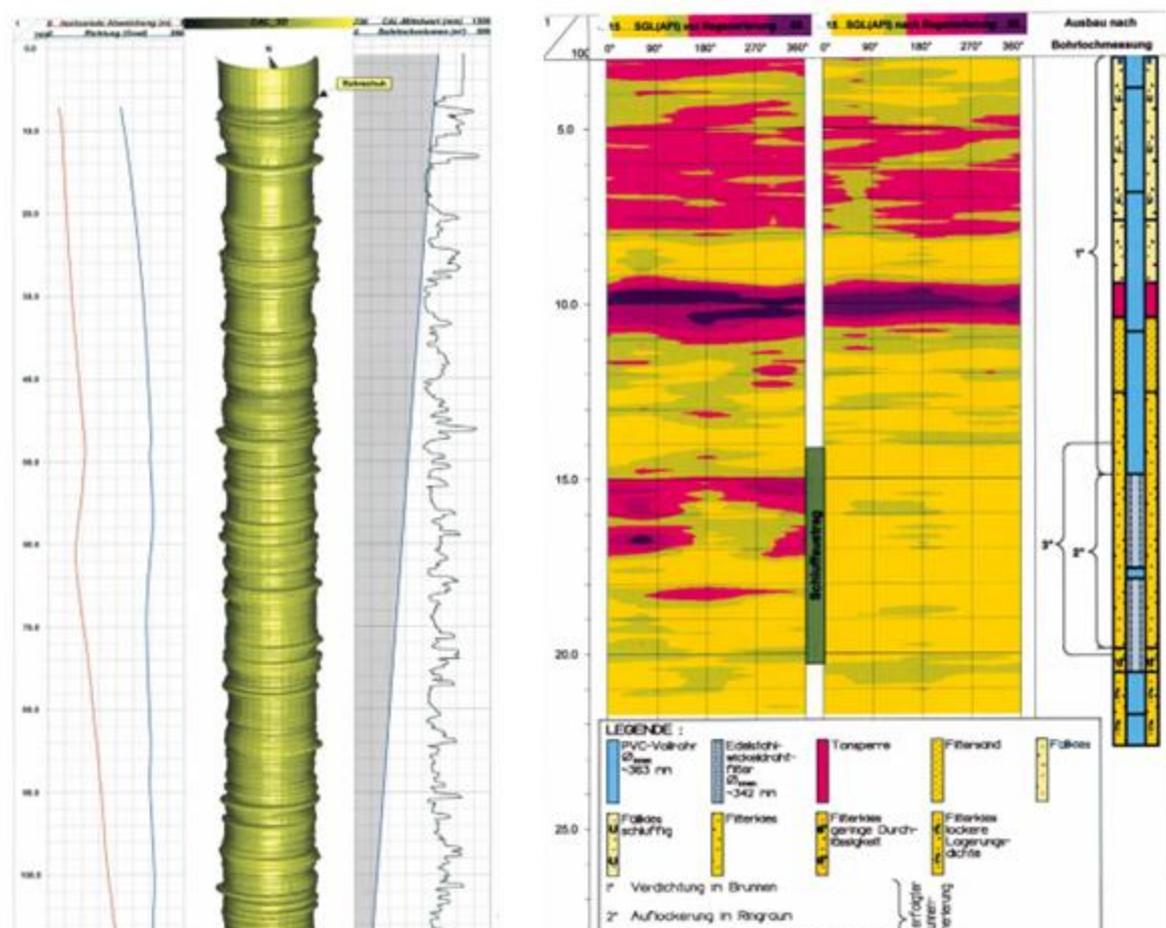


Abbildung 7.4: Richtungs- und Abweichungsdiagramm mit Kaliberdarstellung und Gamma-Log zum Nachweis von Kolmationen einer Brunnenbohrung (Tholen & Baumann, 2002)

### 7.1.1.2.3 Hydro-geologische Untersuchungen

(nach Misstear, Banks & Clark, 2007, S.61 ff)

Die Pumpversuche aus den Bohrlochuntersuchungen liefern Informationen über die Eigenschaften des Grundwasserleiters und über das mögliche Verhalten des Brunnens. Wie zuvor schon angedeutet, gelten die erhobenen Parameter aber meist nur für kurze Zeiträume. Dabei ist es für einen nachhaltigen Brunnenbau unbedingt notwendig, vorausschauend und für

längere Zeiträume zu planen. Dies sollte mit einer Abschätzung der **Grundwasserneubildung** und des Wasserhaushalts im Grundwasserleiter erfolgen. In vielen Ländern werden diese Informationen von Regierungsorganisationen oder lokalen Ämtern erhoben und sind verfügbar. Wenn es sich beim geplanten Projekt um geringe Entnahmemengen handelt, die laut der Aufzeichnungen der zuständigen Behörde vom Grundwasserleiter ohne Probleme verkräftet werden können, kann es sein, dass auf ausführliche hydrogeologische Untersuchungen verzichtet werden kann. In Situationen, in denen der Grundwasserleiter unter Druck steht, wenn nachteilige Auswirkungen auf die Umwelt zu befürchten sind oder wenn die Informationslage unzureichend ist, ist es allerdings unabdingbar eine genaue hydrologische Untersuchung durchzuführen. Dabei ist die Bestimmung der Grundwasserneubildung mehr als die bloße Subtraktion von Oberflächenabfluss und Verdunstung vom Niederschlag. Die Grundwasserneubildung variiert über den Jahresverlauf und hängt grundsätzlich von den klimatischen Gegebenheiten, den hydrogeologischen Eigenschaften und Bodeneigenschaften, der Flächennutzung und der Orographie ab, dabei haben Niederschlagsintervalle, Vegetationsperioden und Bodensättigung zusätzliche Bedeutung (Hölting & Coldewey, 2012, S.242).

Balke, Beims, Heers, *et al.*, (2000) unterscheiden das **Grundwasserdargebot**, das dem langjährigen Mittel der Grundwasserneubildung entspricht, vom **gewinnbaren Grundwasserdargebot**. Dieses ist der wirtschaftlich erschließbare Anteil des Grundwasserdargebots. Schließlich definieren sie noch das **nutzbare Grundwasserdargebot**, welches den Anteil darstellt, der nach Ortslage und Beschaffenheit für die vorhergesehene Verwendung geeignet ist, sich mit wirtschaftlichem Aufwand erschließen lässt und auch in Trockenzeiten durchgehend zur Verfügung steht.

Zur Bestimmung der Grundwasserneubildung, welche die Basis für die Ermittlung dieser Größen darstellt, nennt Misstear (2000) folgende Methoden:

- Zufluss-Bestimmung
- Analyse des Grundwasserleiters
- Abfluss-Bestimmung im Vorfluter

Während die Zufluss-Bestimmung meist Informationen zur potentiellen Neubildung liefert, produzieren die anderen genannten Methoden tatsächliche Werte, jedoch meist über große Gebiete integriert. Da die Grundwasserneubildung eine schwer zu bestimmende Größe ist, sollte aber mehr als eine Methode zur Anwendung kommen. Dabei ist die Auswahl der verwendeten Methoden individuell von der Ausgangssituation abhängig.

Anschließend werden vor allem jene Methoden zur Bestimmung der Grundwasserneubildung erläutert, die leicht verfügbare Daten nutzen und daher für die Grundwassererschließung im Brunnenbau äußerst nützlich sind.

### **Zufluss-Bestimmung**

Misstear (2000) unterscheidet hier zwischen direkter und indirekter Neubildung. Bei der direkten Neubildung gibt es zwei Ansätze für vereinfachte Methoden: Bodenfeuchtebilanzierung und die Verwendung von Tracern.

Bodenfeuchtebilanzierung beinhaltet die Berechnung von Feuchteüberschuss und -defiziten, und benötigt daher tatsächliche Werte der Evapotranspiration, aus Niederschlagsmessungen und Daten zur potentiellen Evapotranspiration. Letztere können anhand von Klimadaten auf unterschiedliche Arten berechnet werden. Misstear, Banks & Clark (2007, S.63) beschreiben eine Methode, die von der FAO (Food and Agriculture Organization, 1998) vorgeschlagen wird und in den meisten Fällen zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Sie verwendet eine Form der Penman-Montheith Formel. Das Konzept von Feuchtedefiziten geht dabei vom Boden als Feuchtereservoir aus, das vom Niederschlag gefüllt und von der aktuellen Verdunstung geleert

wird. Ist das Reservoir voll, das Defizit also 0, dann hat der Wassergehalt im Boden Feldkapazität erreicht und alles überschüssige Wasser gelangt als Neubildung ins Grundwasser. Das Defizit wird in mm Wassersäule angegeben, darüber hinaus sollte die Bodenfeuchtebilanzierung in täglichen Zeitschritten durchgeführt werden, um einer Unterschätzung der potentiellen Neubildung entgegenzuwirken. Die Budgetierung liefert eine Annahme für den Feuchteüberschuss und die potentielle Neubildung. Sie gibt aber keine ausreichenden Hinweise auf tatsächliche Neubildung und wie viel Wasser im Interflow oder dem Oberflächenabfluss verloren geht.

Hydrochemische Tracer werden in natürliche und angewandte Tracer unterteilt und nach Lerner, Issar & Simmers (1990) entweder bei sogenannten Signatur- oder Durchsatzmethoden eingesetzt. Angewandte Tracer werden normalerweise nur in Signaturmethoden eingesetzt, bei denen ein Teil des Wassers markiert und verfolgt wird. Durchsatz-Methoden stellen eine Massenbilanz an und vergleichen die Konzentration im Niederschlag mit der Konzentration in der ungesättigten Zone, der dabei am meisten verwendete natürliche Tracer ist Chlorid. Bei der Massenbilanzierung ist es notwendig den Chlorid-Gehalt in den Niederschlägen über einen längeren Zeitraum zu messen und ein Mittel zu bilden. Unter der Annahme, dass Niederschlag die einzige Quelle für Neubildung ist, sollte die Konzentration im Grundwasser ähnlich hoch sein. Mögliche andere Chlorid Quellen sind verrottende Vegetation, Lösung von paleoevaporiten Mineralien und Zufluss von Düngemitteln. Außerdem kann die Vegetation einen signifikanten Anteil des Chlorids aufnehmen und damit für eine Minimierung der Konzentration sorgen. Radon wird aufgrund seiner höheren Konzentration im Grundwasser verglichen mit Oberflächenwasser zur Identifikation von Grundwasseraustritt in Flüssen und in Küstenregionen genutzt (Krishan, 2015). Daneben werden Tracer zur Altersdatierung von Grundwasser eingesetzt. So wird beispielsweise angenommen, dass Grundwasser, das Spuren von Tritium, einem radioaktiven Hydrogen Isotop, enthält, in der Zeit um 1952 gebildet wurde, da zu dieser Zeit Tests mit Wasserstoffbomben durchgeführt wurden. In letzter Zeit werden Fluorchlorkohlenwasserstoffe und das Tritium/Helium Verhältnis zur Altersdatierung eingesetzt, dabei kann Grundwasser bis zu einem Alter von 50 Jahren mit einer Genauigkeit von 2-3 Jahren bestimmt werden. Darüber hinaus werden Edelgase und stabile Isotope als Tracer in der Grundwasseruntersuchung verwendet (Krishan, 2015).

Indirekte Neubildung erfolgt durch Infiltration aus Oberflächengewässern, die hauptsächlich vom hydraulischen Gradienten zwischen Grundwasser und Oberflächengewässer und der Durchlässigkeit und Mächtigkeit der Flussbettsedimente abhängt. Obwohl diese Art der Neubildung die am wohl schwersten zu Bestimmende ist, gibt es relativ einfache Methoden zur Bestimmung. So kann das Messen des Aussickerns aus dem Flussbett mit Lysimetern erfolgen, diese sind zwar einfach und billig anzuwenden, jedoch werden mehrere Messungen benötigt, um das Gebiet ausreichend zu charakterisieren. Alternativ kann die Infiltration auch über die Pegelmessung entlang des Oberflächengewässers erfolgen, indem man Abflussverlust pro Längeneinheit definiert.

### Analyse des Grundwasserleiters

Die Reaktion des Grundwasserleiters kann anhand von saisonalen Wasserspiegelschwankungen, unter Berücksichtigung des stationären Grundwasserdurchgangs und den durchschnittlichen Wasserspiegelverhältnissen, beurteilt werden. Quantitativ kann durch folgende Formel die Neubildung aus den Schwankungen abgeschätzt werden:

$$R = (\Delta h * S_y) + Q_a + (Q_{out} - Q_{in}) \quad 7.1$$

wobei

R ... Neubildung

$\Delta h$  ... Wasserspiegelschwankung

- $S_y$  ... spezifische Ergiebigkeit
- $Q_a$  ... Grundwasserentnahme
- $Q_{out, in}$  ... laterale unterirdische Zu- und Abflüsse

Dabei ist die größte Schwierigkeit einen repräsentativen Wert für die spezifische Ergiebigkeit des Grundwasserleiters zu finden, wobei ein großer Unterschied in der Wasserspiegelhöhe eine geringe spezifische Ergiebigkeit nahelegt.

Eine einfache Methode ist die Berechnung des Grundwasserdurchgangs mit Hilfe der Darcy Gleichung unter stationären Verhältnissen und Wasserständen in verschiedenen Bohrlöchern (4.2.1). Die Darcy Gleichung gilt für gespannte Grundwasserleiter mit gleichbleibender Dicke. Bei ungespannten Grundwasserleitern mit einem Wasserstandsgefälle ist die DUPUIT-FORCHENHEIMER- Gleichung anzuwenden, die um den Term der Neubildung erweitert wird (4.2.2).

**Abfluss Bestimmung**

Darunter versteht man den Abzug des Basisabflusses vom Gesamtabfluss des Oberflächengewässers. Diese Abtrennung wird entweder manuell oder mittels Computerprogramm durchgeführt und hängt wesentlich von der Messhäufigkeit und Messgenauigkeit der Abflussmessung im Vergleich zur Größe des Grundwasserkörpers ab. Je kleiner das Aquifer, desto mehr Messungen sind nötig um relevante Ergebnisse zu produzieren.

**Wasserwerksmethode**

Hölting & Coldewey (2012, S.248) nennen noch eine einfache Methode, welche die Daten von **Wasserwerken** nutzt. Demnach ist die minimale Grundwasserneubildung die langjährige Entnahmerate des Wasserwerks dividiert durch die Fläche des unterirdischen Einzugsgebiets.

In der folgenden

Tabelle 7.3 sind mögliche Methoden zur Abschätzung der Grundwasserneubildung nach Grundwasserkörper aufgeteilt.

Tabelle 7.3: Methoden zur Abschätzung der GW-Neubildung nach Hölting & Coldewey (2012)

Grundwasserkörper	Methode
Lockergesteine mit Vorfluter	Wasserhaushaltsgleichung, Trockenwetter Abflussmessungen, Lysimeter, Bodenwasserhaushalt, Wasserwerksmethode, Chlorid-Methode, Tritium-Markierung
Lockergestein ohne Vorfluter	Wasserhaushaltsgleichung, Lysimeter, Bodenwasserhaushalt, Wasserwerksmethode  Unter Voraussetzungen anwendbar: Chlorid Methode, Tritium-Markierung

**7.1.1.2.4 Wasserhaushalt im Einzugsgebiet und Modellierung**

Die Schätzungen für die Neubildung aus den zuvor beschriebenen Methoden sollten anschließend in eine Bilanzierung des Systems des gesamten Grundwasserkörpers eingehen, um ihre Reaktion auf verschiedene meteorologische Verhältnisse, Grundwasserspiegelschwankungen, Wasserentnahmen und Oberflächenabflüsse zu testen.

Passen die Schätzungen nicht zum konzeptionellen Modell des Grundwassersystems, so ist dieses zu überdenken und anzupassen. Grundsätzlich lässt sich folgende Formel aufstellen:

$$P + Q_{in} = AE + Q_{out} \pm \Delta\sigma \quad 7.2$$

wobei

- P ... Niederschlag
- $Q_{in}$  ... Oberflächenwasserzufluss
- AE ... tatsächliche Evapotranspiration
- $Q_{out}$  ... Abfluss durch Oberflächenabfluss, Quellen, Entnahmen von Grundwasser und Oberflächenwasser
- $\Delta\sigma$  ... Veränderung im Bodenwasserspeicher

Die Veränderung des Bodenwasserspeichers kann bei Betrachtung längerer Zeiträume jedoch vernachlässigt werden.

Die Bilanzierung des Grundwasserhaushalts ermöglicht eine Abschätzung des möglichen Überschusses, der zur Grundwasserneubildung führt und schließlich zur Entnahme genutzt werden kann. Während der Überfluss früher schlicht als Differenz zwischen Neubildung und bestehenden Entnahmen gesehen wurde, und so der Abflusses zu Oberflächengewässern, Feuchtgebieten und Quellen oft außer Acht gelassen wurde, wird heute im Sinne der Nachhaltigkeit eine minimale Abflussmenge zu eben solchen Gebieten definiert. So ist es beispielsweise in England üblich die nutzbare Grundwassermenge auf 30-50% der gesamten langjährigen Neubildung zu reduzieren. Im deutschen Bundesland Hessen werden ca. 34% des nutzbaren Grundwasserdargebots jährlich gefördert (Höling & Coldewey, 2012, S.243).

In der EU definiert die WRRL, dass grundsätzlich ein guter chemischer und mengenmäßiger Zustand des Grundwassers erreicht werden soll und eine Verschlechterung dieses Zustands und weiterführend eine Verschlechterung des Zustands von Oberflächengewässern, die mit dem Grundwasserkörper in Verbindung stehen, verboten ist. Dabei ist laut Gesetz die Wasserentnahme auf einen Teil des jährlich neugebildeten Grundwassers beschränkt. Ein guter mengenmäßiger Zustand ist dann gegeben, wenn die mittlere jährliche Wasserentnahme die verfügbaren Ressourcen langfristig nicht übersteigt. In einem Begleitdokument zum NGP 2009 werden die Porengrundwasserkörper Österreichs in drei Kategorien in Bezug auf den mengenmäßigen Zustand eingeteilt. Kategorie A befindet sich in einem guten mengenmäßigen Zustand, wenn in 60% der Grundwassermessstellen der mittlere Grundwasserstand (MGW) über dem maßgeblichen Grundwassertiefstand (GWT) liegt. In Kategorie B und C soll die aktuelle Summe der mittleren jährlichen Entnahmemengen, aus dieser Gruppe von Grundwasserkörpern, 90% der für diese Gruppe verfügbare Grundwasserressourcen nicht übersteigen.

Trotz der scheinbaren Einfachheit einer solchen Bilanzierung und einer sehr guten Datenlage ist die Verwendung von numerischen Modellen empfehlenswert. Besonders wenn die Randbedingungen klar sind und ausreichend Daten zu den Eigenschaften des Grundwasserleiters, zu den Abflussverhältnissen im Untergrund und langjährigen Wasserspiegelhöhen verfügbar sind, eignen sich Modelle, um mögliche Entnahme-Szenarien zu simulieren.

### 7.1.1.3 Pumpversuche

(nach Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000)

Der Pumpversuch ist das wichtigste kontrollierbare, jedoch auch relativ aufwendige, hydrogeologische Feldexperiment, das zu unterschiedlichen Zeitpunkten während des Lebenszyklus eines Brunnens zur Anwendung kommt. Dieser Zeitpunkt bestimmt wesentlich die

Art und Ausführung. Im Allgemeinen versteht man unter einem Pumpversuch die Grundwasserentnahme aus einem oder mehreren Brunnen und die Beobachtung und Messung der Änderung der Wasserstände im Brunnen und in Messstellen sowie die Beschaffenheit und Temperatur des Grundwassers. Der Pumpversuch dient der Beschaffung wesentlicher hydraulischer, hydrochemischer und betrieblicher Informationen, die die Bestimmung der Leistungsfähigkeit des Brunnens, der wasserleitenden ( $k_f$ -Wert, Transmissivität) und wasserspeichernden (Speicherkoefizient) Eigenschaften des Grundwasserleiters und der Grundwasserbeschaffenheit zum Ziel haben. Dabei liefert der Pumpversuch zuverlässigere und repräsentativere Ergebnisse als ein Laborversuch, er ist aber auch mit erheblich mehr Aufwand und Kosten verbunden.

Man unterscheidet also je nach Aufgabenstellung, Zeitpunkt und Durchführung folgende Arten von Pumpversuchen:

- **Brunnentests** werden hauptsächlich eingesetzt, um die Leistungscharakteristik eines Brunnens zu ermitteln. Außerdem liefern sie erste Einschätzungen zu den geohydraulischen Parametern und der Grundwasserbeschaffenheit. Darum sind sie oft die Grundlage für die Planung weiterer Pumpversuche.
- **Grundwasserleitertests** dienen der Bestimmung von wasserleitenden und wasserspeichernden Eigenschaften des Grundwasserleiters und der angrenzenden Gesteine. Des Weiteren können Rückschlüsse auf den Aufbau des Grundwasserleiters, wie Stockwerksbau und geohydraulische Randbedingungen sowie auf die Wasserbeschaffenheit gezogen werden. In Kombination mit anderen geophysikalischen Messungen lassen die Ergebnisse eine weiterführende Interpretation des Gebiets zu. Ergänzende Tracerversuche können Aufschluss über die Migrationseigenschaften des Wassers geben.
- **Zwischenpumpversuche** werden verwendet, um die Brunntiefe und den Brunnenausbau zu überprüfen und den Endausbau zu fixieren.
- **Pumpversuche zur Brunnenentwicklung** dienen der Leistungsoptimierung. Das sogenannte Entsandn soll die technische Sand-Freiheit garantieren und durch Ausspülen eines Stützfilters eine Verbesserung der Brunnenhydraulik im Bereich der Filterstränge erreicht werden ( auch 7.2.7).
- **Betriebstests** werden zur Klärung des Anfahrtsbetriebs, der Pumpenauslegung und der Abschätzung der Sandführung eingesetzt. Des Weiteren helfen sie den späteren Brunnenbetrieb zu optimieren, indem sie die Grundlage für die Wasserandrangskurve (Q/s-Diagramm) liefern.
- **Langzeitpumpversuche** helfen die ökologischen Auswirkungen einer Grundwasserentnahme und ihre Nachhaltigkeit nachzuweisen und zu dokumentieren. Außerdem lassen sie Rückschlüsse auf die langfristige Grundwasserbeschaffenheit und dadurch auf die Herkunft des Wassers zu.

Abbildung 7.5 zeigt die Verwendung der verschiedenen Pumpversuche im Laufe des Lebenszyklus eines HFB. Dabei ist es oft zielführend eine Kombination aus den unterschiedlichen Pumpversuchen einzusetzen. Sie sind aber auf jeden Fall durch Wiederanstiegs-Phasen zu trennen. Ob eine Kombination mehrerer Versuchsarten möglich ist und wie diese durchzuführen sind, sollte im Rahmen einer ausführlichen Planung festgestellt werden. Informationen zu den ermittelbaren Parametern der jeweiligen Pumpversuche und die Kombinationsmöglichkeit mit anderen Versuchen sind zum Beispiel Tabellen der DVGW W 111 (1997) zu entnehmen.

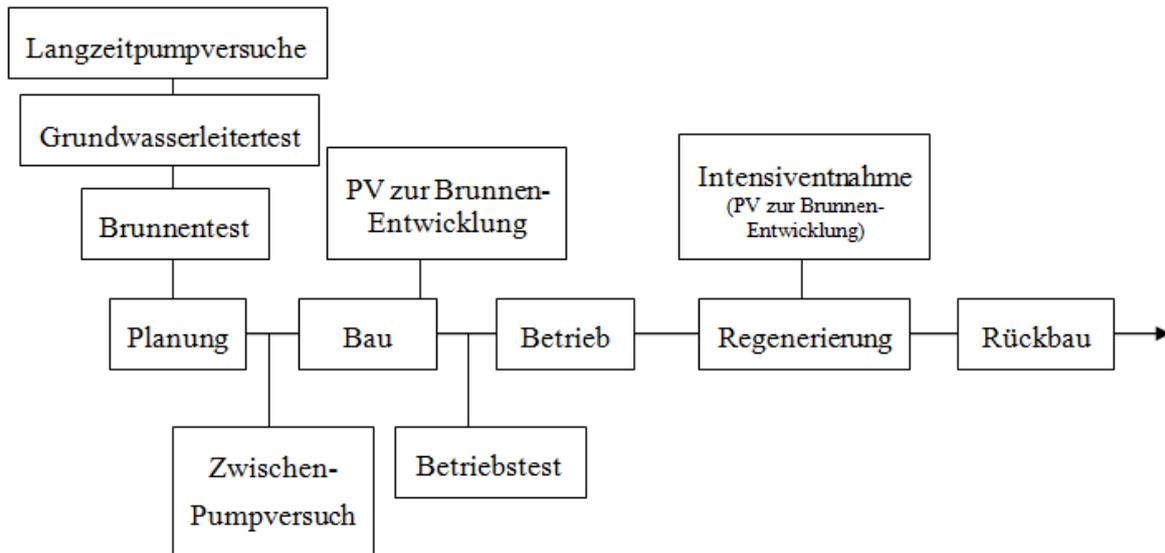


Abbildung 7.5: Lebenszyklus eines Brunnens inkl. Zeitpunkte der verschiedenen Pumpversuche

#### 7.1.1.3.1 Planung von Pumpversuchen

Die Planung von Pumpversuchen hängt grundsätzlich von der Art des Pumpversuchs und der hydrogeologischen Ausgangssituation ab. Vor allem die terminliche Koordinierung der folgenden unbedingt enthaltenen Punkte ist laut DVGW W 111 (1997) dabei wichtig:

- Wasserrechtliche Beantragung des Pumpversuchs, bezüglich Grundwasserentnahme und Einleitung des geförderten Wassers
- Notwendigkeit neuer Messstellen
- Bekanntmachung des Pumpversuchs bei Beteiligten und Betroffenen
- Sicherungs- und Schutzmaßnahmen
- Einweisung des Messtrupps in das Messprogramm und die Genauigkeitsanforderungen
- Verfahrensverweise bei Störfällen
- Absicherung einer exakten Messwerte-Erfassung für die Absenkungs- und Wiederanstiegsphase, Verwendung von Datenloggern anstatt Handmessung
- Auswahl der Pumpe und der Steuerorgane: möglichst steile Pumpenkennlinie, um konstante Pumpenleistung zu gewährleisten
- Funktionsprüfung der Grundwassermessstellen durch Abpumpen oder Bohrlochgeophysik
- Vorbereitung der Probenahme und der Untersuchung des abgepumpten Wassers

Bei Grundwasserleitertest und Langzeitpumpversuchen sollte darüber hinaus darauf geachtet werden, dass sich der Absenkungsverlauf nach Beginn der Entnahme in mehrere Phasen gliedert. Dabei ist die Dauer des Pumpversuchs so zu wählen, dass die Ermittlung der zur jeweiligen Phase gehörenden Parameter auf jeden Fall möglich ist. Außerdem hängt die Dauer des Versuchs davon ab, ob das Grundwasser gespannt oder ungespannt ist, da die Grundwasserdruckfläche dadurch unterschiedlich schnell auf die Entnahme reagiert. Zusätzlich sollten Inhomogenitäten und Anisotropie in die Gestaltung des Messnetzes und der Messintervalle miteinbezogen werden (DVGW W 111, 1997).

Als Output der Planung eines Pumpversuchs sollte zudem ein detaillierter Versuchsplan entstehen, der neben allgemeinen Angaben zum Messprogramm, den zeitlichen Verlauf des Pumpversuchs (Beginn, Pumpende und Ende der Wiederanstiegsmessungen) sowie die Festlegung der Pumpraten und der zugehörigen Förderdauer enthält. Folgende Messprogramme sollten nach DVGW W 111 (1997) außerdem enthalten sein und auf entsprechenden Formularen protokolliert werden:

- Programm zur Wasserstandsmessung zur Erfassung des Ruhewasserspiegels, der Absenkung und des Wiederanstiegs. Messgrößen, -intervalle und -genauigkeiten sind für den Einzelfall festzulegen.
- Programm für die Entnahme von Wasserproben und die Bestimmung von Probennehmer, Probenahmestelle, -gerät, -menge, Abpumpzeit, Analysenumfang und Probenbehandlung (siehe auch DVGW W 112(A), 2011)
- Programm für Begleitmessungen wie Niederschlag, Luftdruck, Temperatur, sowie Wasserstand und Beschaffenheit von Oberflächengewässern
- Programm für Sonderuntersuchungen wie differenzierte Druckmessungen in Grundwasserstockwerken, geophysikalische Bohrlochmessungen, chemische Profile für Leit- und Spezialparameter und Tracerversuche.

### 7.1.1.3.2 Durchführung von Pumpversuchen

Ein Pumpversuch soll nach den Vorgaben im Versuchsplan durchgeführt werden und jede Abweichung davon soll dokumentiert werden. Besondere Vorkommnisse während der Versuchsdurchführung, wie beispielsweise Starkregen, Ausfall von Geräten, Änderungen in der Entnahme benachbarter Nutzungen usw., sollen ebenfalls mit aufgenommen werden. Jede Art von Pumpversuch weist Eigenheiten in der Durchführung auf. Eine genauere Beschreibung findet sich in der DVGW W 111 (1997).

### 7.1.1.3.3 Auswertung von Pumpversuchen

Die Auswertung von Pumpversuchen funktioniert anhand eines geeigneten theoretischen hydraulischen Grundwassermodells, welches den tatsächlichen geologischen Verhältnissen des Pumpversuchs angepasst wird und welches mit den Absenk- und Wiederanstiegskurven des Pumpversuchs größtenteils übereinstimmen muss. Ist dies der Fall, so werden anhand des Modells die Parameter des Grundwasserleiters berechnet. Ist dies nicht der Fall, so kann ein anderes Modell zur Interpretation herangezogen werden, es besteht jedoch die Möglichkeit, dass Pumpversuche schlichtweg nicht auswertbar sind. Die Auswertung von Pumpversuchen entspricht im Grunde einem Blackbox-Modell, indem man Input (Förderrate) und Output (Reaktion, Absenkung und Wiederanstieg) kennt, jedoch nicht weiß, warum es zu diesem Output kommt. Das „warum“ entspricht somit den Eigenschaften des Grundwasserleiters, die wie zuvor schon erwähnt, durch Grundwasserleitertests und Langzeitpumpversuche erhoben werden (DVGW W 111, 1997).

Die Auswertung von Pumpversuchen erfolgt dann anhand von verschiedenen Verfahren:

#### **Grafisch-Analytische Verfahren**

(nach DVGW W 111, 1997)

Diese werden wiederum unterschieden in Verfahren der Ausgleichsgeraden und Verfahren der typischen Kurven. Ersteres ist bestimmt durch den Versuch, die einfachste Abhängigkeit der unabhängigen und abhängigen Variablen des mathematischen Prozessmodells zu finden, ein dementsprechendes Achsensystem zu entwickeln und die Messwerte dort einzutragen. Dabei entsteht eine Gerade, aus deren Kenngrößen dann die gesuchten Parameter bestimmt werden.

Diese Methode ist sehr einfach handzuhaben, was jedoch einen hohen Idealisierungsgrad zur Folge hat. Darüber hinaus lässt sie im Vergleich zu anderen Methoden wenig Manipulation zu und bringt meist eine schnelle Ermittlung der Ergebnisse. Nachteile zeigen sich vor allem, da nur Teilinformationen ausgewertet werden und oft mehrere Einzelwerte für die Parameter existieren.

Das Verfahren der typischen Kurven nutzt den Absenkungsverlauf eines Pumpversuches, entsprechend einem mathematischen Modell, als typische Kurve. Die Parameterbestimmung basiert dann auf dem direkten Vergleich der theoretischen Absenkungswerte und der Messwerte. Neben der Transmissivität und dem Speicherkoeffizienten können eventuell auch andere Parameter berechnet werden. Dieses Verfahren zeichnet sich durch die einfache Handhabung, keine zeitliche Beschränkung und die Ermittlung von zusätzlichen Parametern aus. Im Gegensatz dazu zeigt es jedoch wieder das Problem eines hohen Idealisierungsgrades und mehrerer Einzelwerte für Parameter. Zudem ist es nur für Einzelbrunnen auswertbar und weist gegen Ende des Pumpversuchs eine abnehmende Sensitivität auf.

Die beiden Verfahren sind in der Praxis auf Grund ihrer einfachen Handhabung sehr verbreitet. Jedoch weisen sie, wie bereits angedeutet, große Mängel auf, die nicht außer Acht gelassen werden sollten. So nützen sie meist nur einen Teil, der mit großem Aufwand gewonnenen Daten und analysieren diese entweder nach zeitlichen oder räumlichen Aspekten. Aus den vielen gewonnenen Einzelwerten für die Parameter muss schließlich ein repräsentativer Parameter ermittelt werden. Diese Nachteile werden von den folgenden Verfahren größtenteils ausgeschaltet.

### **Rechnergestützte Verfahren**

(nach DVGW W 111, 1997)

Hier unterscheidet man wiederum zwei Programme, eines besteht schlicht aus der Verlagerung der zuvor manuellen graphisch-analytischen Auswertung, wie der Auftragung der Messergebnisse und die Darstellung der Ausgleichsgeraden, auf den Computer. Danach werden aus den Geraden-Kennwerten die Parameter berechnet. Das andere Programm benutzt Optimierungsalgorithmen, bei denen mit Hilfe von Suchverfahren eine Gütefunktion minimiert wird. Dabei basieren beide Programme auf der zyklischen Lösung des Grundproblems. Es wird also das Grundproblem mit sogenannten Starparametern erstmalig gelöst und die berechneten Werte mit den vorhandenen Messwerten verglichen. Danach werden die Parameter optimiert und abermals berechnet, bis die Abweichung der berechneten Werte von den Messwerten minimal ist. Vorteile dieses Verfahrens sind die Auswertung ohne zeitliche Beschränkung, die Möglichkeit alle Pumpversuchsdaten gleichzeitig zu nutzen, die Ermittlung eines für den Pumpversuchsstandort repräsentativen Parametersatzes und die Ausnutzung des Superpositionsprinzips. Nachteile ergeben sich durch den immer noch hohen Idealisierungsgrad, die Verfügbarkeit von Hard- und Software und durch die Vorgabe eines Grundwassermodells.

### **Numerische Verfahren**

(nach DVGW W 111, 1997)

Während die vorherigen Verfahren auf der analytischen Lösung der Strömungsprozesse basieren und darum einen hohen Idealisierungsgrad aufweisen, gelingt es mit den numerischen Verfahren auch komplizierte Grundwasserleiter- und Brunnenausbauverhältnisse ohne Vereinfachungen zu berechnen. Daraus ergeben sich folgende Vorteile für die Auswertung des Pumpversuchs:

- Analyse der Bedeutung von Approximationen und Annahmen, die den verschiedenen analytischen Lösungen zugrunde liegen
- Ermittlung der Strömungsverhältnisse in unmittelbarer Nähe des Brunnens
- Berechnung von typischen Kurven für solche Grundwasserleiter- und Brunnenverhältnisse, für die noch keine analytischen Lösungen verfügbar sind

- interaktive Pumpversuchsauswertung durch manuelle Datenmanipulation

Als nachteilig werden die anspruchsvolle Handhabung und die Verfügbarkeit der Hard- und Software beschrieben. Zudem ist dieses Verfahren wiederum nur auf Einzelbrunnen anwendbar.

### **Praktische Hinweise – Mängelermittlung**

Laut Balke, Beims, Heers, *et al.* (2000) sind mangelhafte Planung, unsachgemäße Durchführung und die subjektiv manipulierte Auswertung des Versuchs ein Hauptgrund für die Ermittlung von ungenauen oder falschen Parametern aus dem Pumpversuch. Sie deuten darauf hin, dass dies besonders schwerwiegend ist, da Pumpversuche nur in Ausnahmefällen wiederholt werden können und die Gestaltung von Pumpversuchsgruppen im Nachhinein nicht mehr verändert werden kann.

Bei der Planung ist es laut Balke, Beims, Heers, *et al.* (2000) hilfreich, den Pumpversuch mit geschätzten Parametern voraus zu berechnen, um die zu erwartenden Absenkungen, notwendigen Volumenströme, Pegelanordnungen und Pumpzeiten abschätzen zu können. Zudem sollte das erzeugte Grundwassergefälle mindestens 50-mal größer sein als das natürliche und auch im entferntesten Pegel noch deutliche Absenkungen erzeugen. Generell sollten bei allen Pumpversuchen Pegel angeordnet werden, da Auswertungen, die nur die Brunnenabsenkung miteinbeziehen, häufig zu fehlerhaften Parametern führen. Wenn eine Vereinfachung des Gebietes notwendig ist, dann sollten die Messstellen möglichst weit entfernt von den Randbedingungen angeordnet werden. Das geförderte Wasser sollte zudem so abgeleitet werden, dass kein hydraulischer Kurzschluss entstehen kann. Schließlich sollte bedacht werden, dass nach Abschalten der Pumpe Wasser aus den Rohrleitungen in den Brunnen zurück fließt und so die Wiederanstiegskurve manipulieren kann.

Balke, Beims, Heers, *et al.* (2000) geben auch Hinweise für die Optimierung der Auswertung, in der es zu allererst darauf ankommt die Pumpversuche so ausführlich wie möglich zu analysieren und auftretende Widersprüche zu klären. Außerdem weisen sie darauf hin, dass Wiederanstiegsauswertungen oft bessere Ergebnisse liefern als Absenkungsauswertungen, da sie von den Förderschwankungen und Ungenauigkeiten bei der Wassermengenmessung unabhängig sind. Im Regelfall lassen sich aus den Wiederanstiegsauswertungen auch für den Brunnen gültige Transmissivitätswerte ableiten. Schließlich stellen sie zudem fest, dass die ermittelten Parameter bei zu geringer Förderleistung unzuverlässiger sind.

### **7.1.1.4 Grundwasserqualität**

Die EU-WRRL (WRRL, 2000/60/EG) definiert, wie zuvor schon erwähnt, nicht nur den guten mengenmäßigen sondern auch einen guten chemischen Zustand des Grundwassers. Im Bezug auf die Brunnenplanung ist die Erhebung der Grundwasserqualität und Zusammensetzung vor allem im Bezug auf folgende Punkte wichtig:

- Die Grundwasserqualität sollte den Anforderungen ihrer Nutzung (Trinkwasser, Brauchwasser) entsprechen.
- Mögliche Korrosions- oder Inkrustationsprobleme können bereits vorab geklärt werden und Brunnendesign, Betrieb und Instandhaltung dementsprechend geplant werden
- Mögliche Rückschlüsse auf die Grundwasserbewegung können gezogen werden
- Feststellen von anthropogene Einflüssen

#### **7.1.1.4.1 Generelle Zusammensetzung und Schlüsse auf die Herkunft**

Grundwasser wird auf seinem Weg von der Atmosphäre (Niederschlag), über die Bodenpassage (Neubildung) bis in den Grundwasserleiter von diversen chemischen, physikalischen, biologischen und mikrobiologischen Prozessen beeinflusst, die Ausbreitung und Persistenz

bestimmen. Gewisse Zusammensetzungen lassen jedoch Schlüsse auf die Herkunft des Grundwassers zu. Normalerweise ist Niederschlag leicht sauer, jedoch kann es in Industriegebieten durch Emission von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>), Chlorwasserstoff (HCl) oder Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) zu stark sauren Regenfällen kommen. In maritimen Gegenden enthält der Niederschlag vermehrt Natrium und Chlor Salze. Durch anthropogene Emissionen findet man im Niederschlag vermehrt Sulfate, Chloride und Nitrat. Beim Durchgang durch die Bodenpassage wird Nitrat oft von Pflanzen aufgenommen und durch mikrobiellen Stoffwechsel CO<sub>2</sub> angereichert. Das leicht saure, oxidierende Wasser tritt nun in Wechselwirkung mit dem Gestein des Grundwasserleiters und bildet so einen charakteristischen chemischen Fingerabdruck aus. Diverse Reaktionen in verschiedenen Intensitäten können zudem ein Indikator für die Aufenthaltsdauer des Grundwassers und sein Gefährdungspotential sein. In jungen Grundwasserkörpern dominieren meist Hydrogenkarbonate, aufgrund von raschen Lösungsprozessen von Kalzit und Dolomit Mineralisierungsprodukten. Reifere Wässer zeigen oft einen höheren Natrium Gehalt und sehr alte, stagnierende Grundwasserkörper zeichnen sich durch einen hohen Mineralisationsgrad, dominiert von Natrium und Chlorid, aus. (Misstear, Banks & Clark, 2007, S.72)

In Österreich wurde im Zuge der Erhebung der Grundwasserkörper (3.3.1) für die EU – WRRL die Datengrundlage der Messwerte der österreichischen WGEV (Wassergütererhebungsverordnung) Messstellen für Grund- und Fließgewässer verwendet, um eine hydrochemische Karte Österreichs zu erstellen. Dabei werden Wassertypen nach FURTA und LANGGUTH (1967, zit. in Umweltbundesamt, 2005) nach Äquivalent-% mit kleineren Modifikationen abgegrenzt. So ergeben sich für die österreichischen Grundwasserleiter sieben unterschiedliche Wassertypen, für die Fließgewässer fünf. Am Häufigsten findet sich, sowohl im Grundwasser als auch in den Fließgewässern, erdalkalisch-carbonatisches Wasser in Calcium und Magnesium reichen Karbonatgesteinen. Fließgewässern und Porengrundwässern weisen zudem eine sehr ähnliche Ionenverteilung auf, was das intensive Zusammenspiel dieser beiden Wässer beweist. (Umweltbundesamt, 2005)

Je nach geplanter Nutzung sollte Grundwasser gewisse Voraussetzungen erfüllen. Die Trinkwasserrichtlinie der WHO und die österreichische Trinkwasserverordnung setzen bestimmte chemische und mikrobielle Grenzwerte und Indikatorwerte für die Verwendung eines Grundwassers als Trinkwasser voraus (Anhang TWV).

Brauchwasser oder Betriebswasser muss je nach Einsatzgebiet unterschiedliche Zusammensetzungen haben, Wasser zur Pflanzenbewässerung sollte beispielsweise keine boden- und pflanzenschädlichen Stoffe enthalten, zudem ist der Natriumgehalt von Bedeutung.

Entspricht das Grundwasser nicht den Voraussetzungen, so ist eine Aufbereitung oder ein Standortwechsel vorzusehen.

### 7.1.1.4.2 Probenahme

Die Grundwasserüberwachung übernimmt eine zentrale Rolle im Grundwasserschutz. Neben der Dokumentation des aktuellen Zustandes und der Veränderung der qualitativen und quantitativen Grundwasserbeschaffenheit, hilft die Grundwasserüberwachung beim frühzeitigen Erkennen von Grundwassergefährdungen. Darüber hinaus überprüft sie die Wirksamkeit von Sanierungs- und Vorsorgemaßnahmen zum Grundwasserschutz (DVGW W 121, 2003).

Grundwassermessstellen oder Beobachtungsbrunnen dienen in erster Linie der Grundwasserstandmessung aus den Standrohrspiegelhöhen und somit der quantitativen Erfassung der Änderung des Grundwasserhaushalts. Des Weiteren müssen sie so beschaffen sein, dass sie auch die Entnahme von Grundwasserproben und die Messung physikalischer, chemischer und biologischer Parameter, vor allem der Temperatur und der spezifischen Leitfähigkeit sowie anderer geophysikalischer Daten erlauben (Balke, Beims, Heers, *et al.*,

2000, S. 505). Außerdem sollte die Durchführung von Pflegemaßnahmen möglich sein. Wichtig ist, dass verschiedene Grundwasserstockwerke durch eigene Messstellen mit eindeutig zuordenbarer Filterrohrstrecke erfasst werden, sodass eine Mischung der Wässer der verschiedenen Stockwerke ausgeschlossen werden kann (DVGW W 121, 2003).

Wichtigstes Gütekriterium für Grundwasserproben ist, dass die natürlichen Bedingungen des jeweiligen Grundwasserleiters gut repräsentiert werden. Dazu ist es unter anderem notwendig zu Beginn der Probenahme Wasser aus der Messstelle abzupumpen (sog. hydraulisches Kriterium), damit der Einfluss der Messstelle ausgeschlossen werden kann (DVGW W 121, 2003).

Der Umfang der Probenahme richtet sich nach den jeweiligen örtlichen Gegebenheiten und dem Untersuchungsziel und ist sorgfältig zu planen.

Während der Fokus der Grundwasserüberwachung früher eher auf der Informationsbeschaffung und der Dokumentation der Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit lag, so setzt man heute vermehrt auf entscheidungsorientierte und prozessbezogene Untersuchungen, welche Interpretationen der Ergebnisse beinhalten und das Verständnis der Prozesse im Grundwasserleiter anstreben. Zu diesem Zweck werden auch vermehrt Modelle eingesetzt (DVGW W 112(A), 2011).

Folgende Untersuchungen sind wegen möglicher Veränderung der Probe durch den Transport bereits im Feld zu erledigen: Organoleptik (Geruch, Geschmack, Farbe; bei unbelastetem Wasser), Wassertemperatur, Leitfähigkeit, pH-Wert, Sauerstoffkonzentration und Redoxspannung. Zudem sollten diese Parameter, ausgenommen Organoleptik, bei Pumpvorgängen laufend dokumentiert werden. Eine digitale Aufzeichnung wäre dabei vor allem zur Qualitätssicherung sinnvoll (Hölting & Coldewey, 2012).

Neben den genormten Verfahren zur Untersuchung der jeweiligen Parameter, gibt es auch Schnelltests für eine erste Orientierung im Feld. Diese verwenden vorgefertigte Reagenzien-Sätze, die schnelle Ergebnisse liefern, jedoch häufig auch Querempfindlichkeiten aufweisen und so Fehler mit sich bringen. Deshalb sind genaue Laboruntersuchungen auch nicht zu ersetzen (Hölting & Coldewey, 2012, S.190).

### 7.1.1.4.3 Grundwassergefährdung und Grundwasserschutz

Die Gefährdungen von Grundwasservorkommen können vielfältig sein. Einerseits ergeben sich Bedrohungen über Punktquellen, wie Abfalllagerplätze, Senkgruben, Industrie oder Treibstofflager andererseits können auch diffuse Einträge wie intensive Landwirtschaft, Salzstreuung oder städtische Gebiete negative Auswirkungen haben. In der ÖVGW W 72 (2004) wird zwischen qualitativen und quantitativen Beeinträchtigungen unterschieden.

- Quantitative Beeinträchtigungen sind Maßnahmen, die die Grundwassererneuerung vermindern, die Grundwasserexfiltration beschleunigen, die unterirdische Strömung behindern oder zwei oder mehrere Grundwasserstockwerke verbinden.
- Unter qualitativer Beeinträchtigung versteht man mikrobiologische, chemische, radioaktive Kontaminationen und physikalische Beeinflussungen.

Folgende Eigenschaften möglicher Grundwassergefährdungen sind nach ÖVGW W 72 (2004) zu erfassen:

- Die Lage zur Wasserfassung
- Menge und die chemisch, physikalischen, bakteriologischen Eigenschaften der Stoffe, die ins Grundwasser gelangen könnten
- Abbaubarkeit dieser Stoffe

- Beschaffenheit und Rückhaltevermögen der Grundwasserüberdeckung und des Grundwassers
- Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Schadensfalls

Gibt es im Untersuchungsgebiet ein signifikantes Risiko einer Verschmutzung, so ist die Standortwahl zu überdenken oder vorab eine geeignete Aufbereitung für den Fall einer Verschmutzung zu planen. Außerdem sollten mögliche zukünftige Gefährdungen abgeschätzt werden und um diese zu verhindern, Schutzgebiete ausgewiesen werden. Um die volle Funktion solcher Schutzgebiete zu gewährleisten, sind entsprechende Anordnungen einzuhalten und die Qualität des Grundwassers laufend zu kontrollieren.

### **7.1.1.5 Errichtung und Dimensionierung von Schutzgebieten**

Schutzgebiete werden zum Schutz bereits bestehender Wasserversorgungsanlagen festgelegt. Sie stellen sicher, dass eine Verunreinigung oder eine Beeinträchtigung der Ergiebigkeit ausgeschlossen wird.

In Schutzgebieten darf die zuständige Wasserrechtsbehörde (je nach Größe der Anlage BMLFUW, LH, Bezirksverwaltungsbehörde) besondere Anordnungen über die Bewirtschaftung oder die sonstige Benutzung von Grundstücken und Gewässern treffen. Es ist möglich, die Errichtung bestimmter Anlagen zu untersagen oder ihren Betrieb einzuschränken und die entsprechenden Schutzgebiete zu bestimmen. Die Änderung von Schutzgebieten ist möglich und geboten, wenn es dem Schutz der Wasserversorgung dient (WRG, 1959).

Schutzgebiete dienen der Abwehr akuter Gefahren und stellen eine Verbotszone dar. Eine Schutzzone wird per Bescheid von der zuständigen Wasserrechtsbehörde in grundstücksscharfer Form festgelegt. Sie wird unabhängig von der Größe der Wasserversorgungsanlage definiert und kann auch dem Schutz von Anlagen dienen, die keiner wasserrechtlichen Bewilligungspflicht unterliegen.

Bei der Definition von Schutzgebieten sind die jahreszeitlichen Schwankungen der hydrologischen Bedingungen zu beachten.

Es werden drei Arten von Schutzzonen unterschieden:

- Zone I dient dem Schutz des direkten Fassungsgebietes. Der Schutz dieses Bereichs ist besonders wichtig, da die Reinigungsleistung des Bodens bei Verunreinigung aufgrund einer ungenügend großen Fließstrecke und der kurzen Verweildauer nicht ausreicht. Auch Maßnahmen können kaum rechtzeitig ergriffen werden. Jede weitere Nutzung ist in diesem Gebiet ausgeschlossen. Die Fläche ist nach Möglichkeit zu erwerben und einzuzäunen. Sie darf von Unbefugten nicht betreten werden.
- Zone II soll anthropogen unbeeinflusstes Zuströmen sichern. Der Erwerb dieser Fläche wird empfohlen und die Flächennutzung ist einzuschränken. Die Verweildauer des Grundwassers von der oberstromigen Begrenzung her soll mindestens 60 Tage betragen.

Die Verweildauer von 60 Tagen wurde 1951 von KNORR ermittelt. Dieser nahm an, dass grundwasserfremde Keime nach einer Verweilzeit von 60 Tagen im Grundwasser inaktiv werden. Diese Annahme ist zwar heutzutage widerlegt (die Lebenszeit von Viren und Bakterien kann um ein Vielfaches länger sein), dennoch hat sich die 60-Tage-Grenze aufgrund zahlreicher Eliminationsvorgänge im Boden als hygienisch wirkungsvoll erwiesen. Eventuell vorhandene mikrobiologische Belastungen werden auf ein erforderliches Maß reduziert.

- Zone III dient zur Abwehr von Gefährdungen insbesondere persistenter Stoffe. Die Größe der Schutzzone hängt von Grundwasserneubildungs- und

Überdeckungsverhältnissen ab. Bei günstigen naturräumlichen Bedingungen kann auf die Einrichtung einer solchen Zone verzichtet werden. Falls Gefährdungen des Grundwassers nicht auszuschließen sind, sind am äußeren Rand der Zone III Vorfeldsonden zu errichten, um jegliche Verunreinigungen frühzeitig zu erkennen. (ÖVGW W 72, 2004)

In der nachfolgenden Abbildung 7.6 sind schematisch die zuvor beschriebenen Schutzzonen I-III eingetragen.

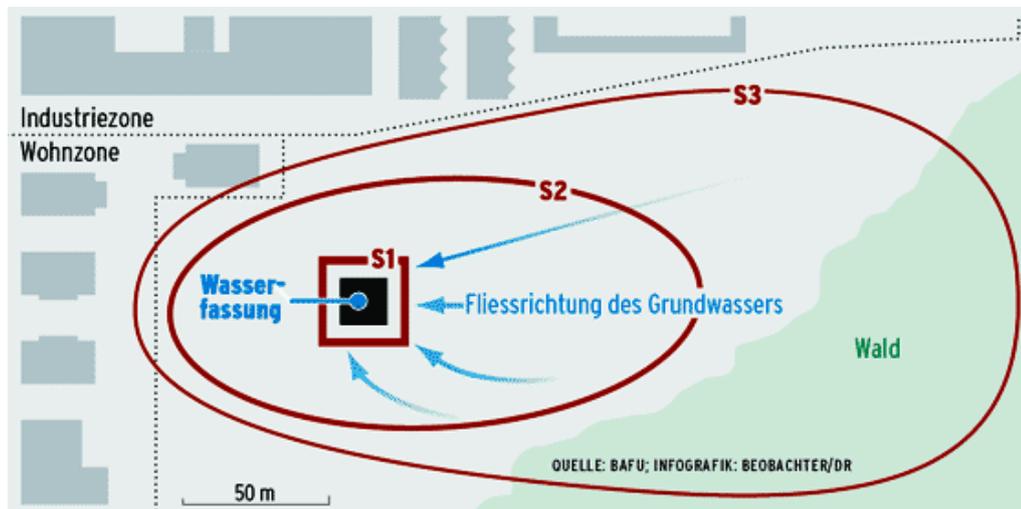


Abbildung 7.6 Schematische Darstellung der Schutzzonen I-III (Bundesamt für Umwelt Schweiz, 2015)

Bei Horizontalfilterbrunnen gibt es einige Besonderheiten. Schutzzone I ist laut Fritsch et al. (2011) bei Brunnen allgemein zu jeder Seite mindestens 10 m breit, bei Quelfassungen oder Sickerleitungen, zu denen man HFB in diesem Sinne zählen kann, in Richtung des zuströmenden Grundwassers, jedoch mindestens 20 m. Grombach (2000) gibt an, dass der Grenzabstand der Zone I bei HFB 5-20m ab Ende der Filterstränge beträgt, während bei VFB 10-20 m ab Brunnenachse gelten.

Durch die Nutzung von Uferfiltrat befinden sich HFB zudem meist in der Nähe von Flüssen, diese stellen dann die einseitige Begrenzung der Schutzgebiete dar. Schwankungen der Grundwasserfließrichtung, beispielsweise durch Hochwasser, müssen darum auf alle Fälle berücksichtigt werden. Abbildung 7.7 zeigt die Schutz- und Schongebiete am Beispiel der HFB Friesach der Stadtwerke Graz.

### 7.1.1.6 Schongebiete

Schongebiete dienen dem Schutz des zukünftigen Trink- und Nutzwasserbedarfs. Sie werden per Verordnung vom LH oder BMLFUW festgelegt. In dieser Zone gelten je nach Bedarf Wirtschaftseinschränkungen und Verbote. Weiters werden Maßnahmen definiert, für die eine Anzeige- oder Bewilligungspflicht besteht. Dies sind Maßnahmen, welche Einfluss auf die Beschaffenheit, die Ergiebigkeit oder die Spiegellage des Wasservorkommens nehmen könnten.

Als Schongebiet wird ein Teil eines Einzugsgebietes oder auch ein ganzes Einzugsgebiet definiert. Die Größe wird nach hydrogeologischen Kriterien wie Grundwasserströmung, Grundwasserfließgeschwindigkeit und Grundwasserentnahmemenge festgelegt. Die Abgrenzung erfolgt grundstücksscharf.

Schongebiete können in eine Kern- und Randzone gegliedert werden. Die Kernzone richtet sich gegen Gefährdungen des Sicker- und Grundwassers. Sie umschließt das Schutzgebiet von allen Seiten. Die Randzone soll die Wasserversorgungsanlage vor Gefährdungen aus der Atmosphäre schützen.

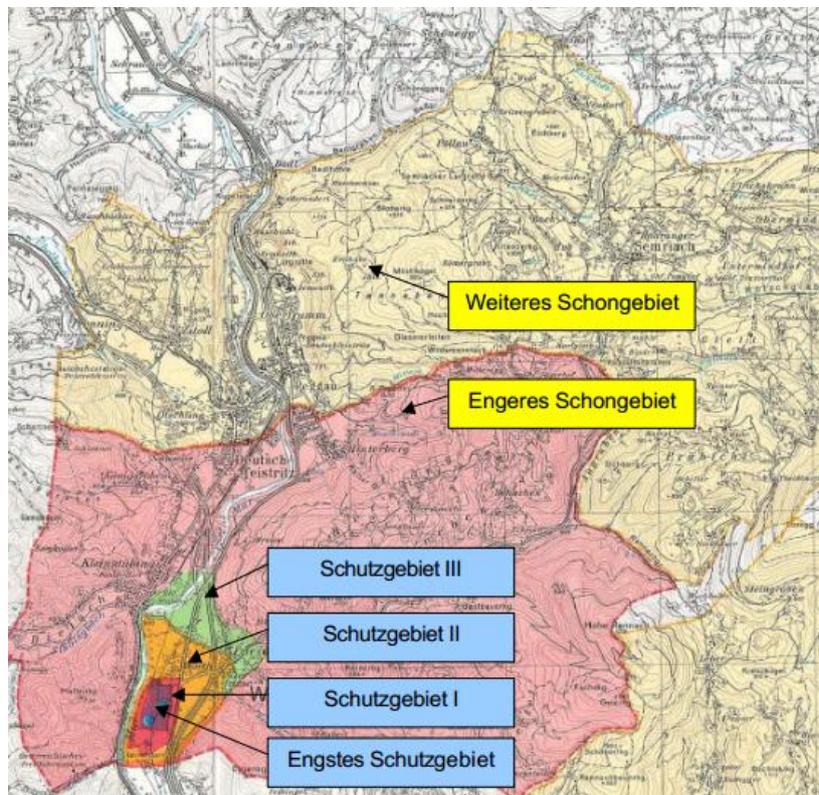


Abbildung 7.7 Schutz und Schongebiete der HFB Friesach (Stadtwerke Graz) (Zimmermann, 2003)

### 7.1.2 Rechtliche Aspekte bei der Planung

(nach WRG 1959 (2017) und Oberleitner (2007))

Grundsätzlich sollten im Zuge der Planung laut ÖNORM B 2601 (2004) folgende Grundlagen für die Projekterstellung ermittelt worden sein:

- Wasserbedarf und verbrauchsspezifische Kennwerte
- Hydrologische und hydrogeologische Grundlagen
- Erkundung der Infrastruktur des Umfeldes
- Hydrographische Daten
- Wasserqualität (im Hinblick auf vorgesehene Nutzungsart, Ausbauart und Ausbaumaterialien)
- Festlegung von Beweissicherungsmaßnahmen (Dokumentation, Messprogramme, etc.)
- Festlegung von Objektschutzmaßnahmen (Schutzgebiet, Betriebssicherheit bei HW100 etc.)
- Festlegung der Güteanforderungen an Baustoffe und Bauteile (Betonqualität Schacht C20/25/XC3, etc.)

Und besonders bei Horizontalfilterbrunnen:

- Abmessungen des Brunnenschachts
- Herstellungsart des Schachts
- Herstellungsverfahren der Horizontalfilterstränge
- Vorgesehener Brunnenausbau und Fördereinrichtungen
- Fassungsvermögen mit Angabe der Ermittlungsgrundlage

Nach Auswertung dieser Grundlagen ist das Projekt mit Rücksicht auf die behördliche Bewilligung zu erstellen.

Das nächste Kapitel beschreibt allgemeine Begriffe und Zuständigkeiten im Bereich des Wasserrechts und schließlich den Weg der Bewilligung.

### **7.1.2.1 Allgemeines**

Das Wasserrechtsgesetz 1959 (2017) unterscheidet grundsätzlich zwischen öffentlichen und privaten Gewässern (§§ 1 bis 3). Diese Unterscheidung ist wichtig für die Reichweite von Nutzungsbefugnissen sowie für die Bewilligungspflicht von Wasserbenutzungen und -anlagen und entspricht den sachenrechtlichen Bestimmungen des ABGB (Oberleitner, 2007). Grundwasser ist dabei immer ein privates Gewässer. Daneben zählen sich auf der Erdoberfläche sammelnde Niederschlagswässer, Wasser in Brunnen, Teichen etc. und das in Leitungen für Verbrauchszwecke abgeleitete Wasser, sowie Seen, die nicht von einem öffentlichen Gewässer durchflossen sind und Abflüsse aus den vorgenannten Gewässern bis zu ihrer Vereinigung mit einem öffentlichen Gewässer als private Gewässer.

Privatgewässer gehören, wenn nicht von anderen erworbene Rechte vorliegen, dem Grundeigentümer und können von ihm genutzt werden. Öffentliche Interessen und die Beachtung fremder Rechte haben jedoch eine beschränkende Wirkung auf diese Verfügungsmacht (Oberleitner, 2007). Darum sind Anlagen, die öffentliche Interessen oder fremde Rechte berühren, bewilligungspflichtig.

Dies ermöglicht die vorausschauende Prüfung, ob ein Vorhaben mit öffentlichen Interessen oder fremden Rechten vereinbar ist. Die Bewilligungspflicht dient also der Wahrung des öffentlichen Interesses und schützt jene, in deren Rechtspositionen eingegriffen wird oder werden soll (Grundeigentümer, Wassernutzer, Fischereiberechtigte). Dadurch gewährt die Bewilligung ihrem Inhaber letztlich Rechts- und Investitionssicherheit (Oberleitner, 2007).

### **7.1.2.2 Öffentliche Interessen und fremde Rechte**

Das öffentliche Interesse stellt das Gemeinwohl über die Individualinteressen, im Bezug auf Wasserentnahme kann eine Anlage im öffentlichen Interesse nicht bewilligt werden wenn u.a. (nach § 105, WRG)

- eine Beeinträchtigung der Landesverteidigung oder eine Gefährdung der öffentlichen Sicherheit oder gesundheitsschädliche Folgen zu befürchten wären;
- ein schädlicher Einfluss auf den Lauf, die Höhe, das Gefälle oder die Ufer der natürlichen Gewässer herbeigeführt würde;
- die Beschaffenheit des Wassers nachteilig beeinflusst würde;
- eine wesentliche Behinderung des Gemeingebrauches, eine Gefährdung der notwendigen Wasserversorgung, der Naturschönheit oder des Tier- und Pflanzenbestandes entstehen kann;
- durch die Art der beabsichtigten Anlage eine Verschwendung des Wassers eintreten würde;

- das Vorhaben den Interessen der wasserwirtschaftlichen Planung an der Sicherung der Trink- und Nutzwasserversorgung widerspricht;
- eine wesentliche Beeinträchtigung des ökologischen Zustandes der Gewässer zu befürchten ist und
- aus der WRRL: der gute mengenmäßige und chemische Zustand des Grundwassers durch die Bewirtschaftung nicht gewährleistet wird.

Zu bestehenden Rechten Dritter und fremden Rechte gehören rechtmäßig ausgeübte Wassernutzungen mit Ausnahme des Gemeingebrauches, bewilligungsfreien Nutzungsbefugnissen an Privatgewässern und das Grundeigentum. Unter Rechten Dritter versteht man unter anderem Fischereirechte. Sind besagte Rechte mit einem geplanten Vorhaben nicht vereinbar, so wird eine Bewilligung nur erteilt, wenn es zugleich zu einer Enteignung dieser Rechte, zur Einräumung von behördlichen Zwangsrechten oder zu einer Einigung zwischen dem Rechtsinhaber und dem Bewilligungswerber kommt (Oberleitner, 2007).

Zusätzlich muss gesagt sein, dass fremde Rechte im Bereich von Grundwasser nicht immer eindeutig feststellbar sind. Das Eigentumsrecht am Grundwasser kann für den Umfang allfälliger Entschädigungsansprüche relevant sein, wie sie beispielsweise bei einer möglichen Vermarktung von Wasservorkommen diskutiert werden. Der Verwaltungsgerichtshof vertritt in seiner Rechtsprechung/ in ständiger Rechtsprechung, dass der Grundeigentümer Wasserentnahmen, die seine Nutzungsbefugnisse oder Wasserrechte sowie die Bodenbeschaffenheit und Oberflächennutzung nicht beeinträchtigen, entschädigungslos hinzunehmen hat.

### **7.1.2.3 Zuständigkeit**

Bei der Bewilligung von Wasserbauten überschneiden sich die Kompetenzen von Bund und Land. So sind Wasserbauten im engeren Sinne auf Bundesebene geregelt, während die Wasserversorgung auf Landes- oder Bezirksebene geregelt wird. Die wasserrechtlich zuständige Behörde ist im Allgemeinen die Bezirksverwaltungsbehörde. Die Zuständigkeit geht auf den Landeshauptmann über, wenn die höchstmögliche Wasserentnahme aus Grundwasser oder Quellen 300 l/min übersteigt, und bei der Wasserversorgung eines Versorgungsgebietes von mehr als 15.000 Einwohnern. Größere Anlagen sind vom BMLFUW zu genehmigen.

Jedenfalls bekennen sich Bund, Länder und Gemeinden aber zum umfassenden Umweltschutz (BVG BGBl. Nr. 491/1984) und richten daher ihr Handeln auch auf den Schutz der Gewässer aus. Um die jeweils andere Seite nicht zu behindern, müssen Bund und Länder im Sinne des Berücksichtigungsprinzips ihre Maßnahmen abstimmen (Oberleitner, 2007).

Im Bereich der Wasserwirtschaft treffen verschiedene Regelungsbereiche der Landesgesetzgebung aufeinander. So müssen die Belange aus Raumordnung und Flächenwidmung, Baurecht (u.a. Kanalanchlusszwang), Wasserversorgung, Natur- und Landschaftsschutz, Fischerei und land- und forstwirtschaftliche Bodennutzung koordiniert werden. Die Trinkwasserversorgung hat dabei einen besonderen Stellenwert.

### **7.1.2.4 Bewilligung – Antrag**

(nach Oberleitner, 2007)

Wie bereits zuvor erwähnt, sind Wassernutzungen, die öffentliches Interesse oder fremde Rechte betreffen, bewilligungspflichtig. Im Zusammenhang mit der Grundwassernutzung sind das speziell die Erschließung oder Benutzung des Grundwassers, damit zusammenhängende Eingriffe in den Grundwasserhaushalt sowie die Errichtung oder Änderung der dafür dienenden Anlagen (§ 10 Abs. 2, WRG), artesischen Brunnen (§ 10 Abs. 3, WRG) und Änderungen des Zweckes der Wasserbenutzung (§ 21 Abs. 4, WRG).

Wenn die Nutzung aber nur der Deckung des notwendigen Haus- und Wirtschaftsbedarfes dient und die Förderung nur durch handbetriebene Pump- oder Schöpfwerke erfolgt oder die Entnahme in einem angemessenen Verhältnis zum eigenen Grund steht (§ 10, WRG), benötigt der Grundstückseigentümer keine behördliche Bewilligung.

Wasserrechtlich bewilligungspflichtige Vorhaben sind bereits vor der Antragstellung dem wasserwirtschaftlichen Planungsorgan anzuzeigen, um geplante Maßnahmen mit anderen Maßnahmen sowie mit übergeordneten wasserwirtschaftlichen Interessen ehestens abzustimmen. Außerdem ist die Wahrung der öffentlichen Interessen und bestehenden Rechte zu prüfen.

Darum muss das Ansuchen um wasserrechtliche Bewilligung, neben den von einem Fachkundigen entworfenen Plänen, Zeichnungen und erläuternden Bemerkungen, Folgendes enthalten (§ 103):

- Angaben über Art, Zweck, Umfang und Dauer des Vorhabens und über das betroffene Gewässer mit grundbuchmäßiger Bezeichnung der Örtlichkeit
- die Darstellung der vom Vorhaben zu erwartenden Vorteile oder der im Fall der Unterlassung zu befürchtenden Nachteile
- die Angabe aller Wasserberechtigten und sonstigen Personen, deren Rechte durch das beabsichtigte Unternehmen berührt werden, sowie die Angabe der erforderlichen Zwangsrechte. Außerdem Angaben über die Vorinformation der Betroffenen und über bereits erzielte Übereinkommen, sowie Angaben über Förderungsansuchen
- Angaben über die zum Schutz der Gewässer vorgesehenen Maßnahmen (u.a. Schutz und Schongebiete)
- Angaben über die erwarteten Auswirkungen auf Gewässer
- Angaben über den Bedarf in sachlicher und zeitlicher Hinsicht (§§ 13 und 21), sowie die Eignung des Gewässers für den bestimmten Zweck
- Betriebs- und Überwachungsprogramme (Angaben über die Bekämpfung von Störfällen)
- Angaben über die beim Betrieb der Wasseranlagen zu erwartenden Abfälle und über betriebliche Vorkehrungen zu deren Vermeidung, Verwertung und Entsorgung (Abfallwirtschaftskonzept gem. AWG)
- Angaben über Menge, Art und Beschaffenheit der Abwässer, besonders über Fracht und Konzentration schädlicher Abwasserinhaltsstoffe

Die behördliche Überprüfung stellt dann fest, ob das Vorhaben aus öffentlichen Rücksichten zulässig ist. Ist das der Fall, dann folgt eine Bewilligungsverhandlung, in der die Wahrung öffentlicher Interessen und der Schutz fremder Rechte thematisiert werden, andernfalls, wird das Gesuch auf Bewilligung abgewiesen.

### **7.1.2.5 Bewilligung – Vorprüfverfahren**

In bestimmten Fällen wird ein ordnungsgemäß eingebrachtes Ansuchen von der Behörde akzeptiert. Dies erspart ein aufwändiges Bewilligungsverfahren und gilt als Bewilligung (§§ 12b, 32b, 34, 114, 115, WRG) (Oberleitner, 2007).

Ansonsten wird ein solches Ansuchen einer ausführlichen Überprüfung unterzogen (§ 104, WRG). Dabei werden unter anderem die Eignung des Vorhabens für den angestrebten Zweck, Auswirkungen auf die Umwelt, auf die Wasserwirtschaft und auf andere öffentliche Interessen und fremde Rechte untersucht. An der Untersuchung beteiligt werden die sachlich in Betracht kommenden Stellen und Sachverständigen sowie die Gemeinden, das wasserwirtschaftliche Planungsorgan, die Fischereirevierausschüsse, Handels- und Landwirtschaftskammern, die Naturschutzbehörden und sonst beteiligte Behörden, Umweltschützer, Förderungsstellen etc. Bei

kleineren Vorhaben kann die Prüfung vereinfacht werden. Bei Großprojekten kann es vorkommen, dass in einer Vorprüfung zuerst nur die grundsätzliche Durchführbarkeit untersucht wird, um den Beteiligten etwaigen weiteren Planungsaufwand zu ersparen (Oberleitner, 2007).

### **7.1.2.6 Bewilligung - Mündliche Verhandlung**

(nach Oberleitner, 2007)

Wird ein Vorhaben im Zuge des Vorprüfverfahrens nicht abgewiesen, so wird zur Klärung von Widersprüchen mit öffentlichen Interessen und fremden Rechten eine mündliche Verhandlung angesetzt (§ 107 WRG; §§ 40 ff AVG). Auf diese Weise sollen alle Betroffenen, alle zur Wahrung öffentlicher Interessen berufenen Stellen und alle Sachverständigen die Möglichkeit erhalten das Vorhaben zu erörtern. Dabei können Kompromisse erzielt und Übereinkommen getroffen werden, die schließlich zu einer Genehmigung des Vorhabens führen.

Parteien im Bewilligungsverfahren sind gem. § 102 - neben dem Antragsteller:

- diejenigen, die zu einer Leistung, Duldung oder Unterlassung verpflichtet werden sollen oder deren Rechte (rechtmäßig geübte Wasserbenutzungen mit Ausnahme des Gemeingebrauches, bewilligungsfreie Nutzungsbefugnisse an Privatgewässern, Grundeigentum) sonst berührt werden,
- die Fischereiberechtigten,
- die Einforstungsberechtigten (gem. BGBl. Nr. 103/1951),
- die Gemeinden zur Sicherung des Wasserbedarfes ihrer Bewohner (vgl § 13 Abs. 3),
- diejenigen, deren wasserwirtschaftliche Interessen durch eine wasserwirtschaftliche Rahmenverfügung (§ 54) als rechtliche Interessen anerkannt wurden,
- das wasserwirtschaftliche Planungsorgan zur Sicherung der Wasserversorgung im Lande

### **7.1.2.7 Bewilligung – Bescheiderlassung**

(nach Oberleitner, 2007)

Die Verleihung von Wasserbenutzungsrechten erfolgt unter Beachtung wasserwirtschaftlicher Gesichtspunkte bedarfsbezogen und zeitlich befristet. Das maximale Wasserbenutzungsrecht ist mit 90 Jahren begrenzt. Des Weiteren haben behördlich verliehene Wasserbenutzungsrechte dingliche Wirkung, sind im Allgemeinen mit Grundstücken oder Betriebsanlagen verbunden (§ 22, WRG) und bestandsgeschützt (§§ 12, 16, WRG).

Die Art und das Maß der bewilligten Wassernutzung, sowie die im Detail beschriebenen Anlagen werden im Wasserbuch eingetragen. Der angegebene Bedarf in sachlicher und zeitlicher Hinsicht darf nicht überschritten werden, um die Erhaltung des ökologischen Zustandes der Gewässer und die für höherwertige Nutzungen notwendige Wassermenge sicherzustellen (§ 13, WRG). Zum Schutz öffentlicher Interessen und fremder Rechte sind Auflagen und Nebenbestimmungen vorzusehen (§ 105, WRG). Grundwasser ist dabei so zu schützen, dass eine schrittweise Reduzierung der Verschmutzung des Grundwassers und Verhinderung der weiteren Verschmutzung sichergestellt wird. Dazu wird der Wasserberechtigte unter anderem zur Ausweisung von Schutz und Schongebieten verpflichtet. Zum Schutz von Wasserversorgungsanlagen gegen Verunreinigung oder gegen eine Beeinträchtigung ihrer Ergiebigkeit können gem. § 34 vorsorglich mit Bescheid besondere Anordnungen über die Bewirtschaftung oder sonstige Benutzung von Grundstücken getroffen, die Errichtung bestimmter Anlagen untersagt und entsprechende Schutzgebiete bestimmt werden. Darüber hinaus können im Schongebiet der Anlage Maßnahmen, die die Beschaffenheit, Ergiebigkeit oder Spiegellage des Wasservorkommens zu gefährden vermögen, durch Verordnung als

anzeige- oder bewilligungspflichtig erklärt, gegebenenfalls auch verboten oder beschränkt werden (§ 34, WRG).

Soweit erforderlich und zulässig, können also Zwangsrechte eingeräumt werden, wofür jedoch Entschädigungen festzusetzen sind (vgl. §§ 60 ff, 117, 118).

Ebenso wird die Bestimmung von Baufristen vorgesehen (§ 112). Des Weiteren kann die Behörde besondere Regelungen (z.B.: Widerstreitverfahren, Wiederherstellung zerstörter Anlagen) oder zusätzliche Vorschriften (z.B.: Sicherstellung gem. § 11, Bauaufsicht gem. § 120, Überwachung gem. § 134) geltend machen.

### **7.1.3 Fehler und Mängel bei der Planung**

Mängel im Brunnenbau sind auf Fehler in allen Phasen der Bauplanung, aber auch auf mangelnde planerische Vorgaben zurückzuführen. Oft werden diese Fehler erst nach mehreren Jahren im Betrieb sichtbar. Laut Tholen und Baumann (2002) sind es vor allem folgende Bereiche in denen sich Fehler einschleichen:

- Bohrarbeiten, Probenahme und falsche geologische Schichtenansprache
- unzureichende bohrlochgeophysikalische Vermessung der Bohrung
- fehlende oder nicht ausreichende Recherche zu den geologischen/hydrogeologischen Verhältnissen
- ungenügende Kenntnisse über die zu erwartende Grundwasserqualität, insbesondere im Hinblick auf mögliche anthropogene Kontaminationen oder geogen bedingte Versalzungen und daraus folgende Inkrustationen
- Auswahl und Einbau der Ausbauperforierung
- Ringraumverfüllung
- Brunnenentwicklungsmaßnahmen

Drei dieser sieben Punkte gehören konkret dem Bereich der Planung an, die anderen sind zumindest vom Planer vorgegeben.

Diesen Punkt greift Conrad (2010) auf, indem er behauptet, dass der Großteil der Fehler im Wesentlichen auf Mängel in den Vorgaben, in der Planung oder in der Ausführung zurückzuführen ist. Außerdem bemerkt er, dass solche Fehler die Werterhaltung des Brunnens viel deutlicher beeinflussen, als Fehler, die sich später in Betrieb und Unterhalt einschleichen.

#### **7.1.3.1 Ursachen**

Laut Conrad (2010) liegen die Ursachen zum einen in der Vorgabe der Bauherrn. Diese haben oft Vorstellungen, die sich nicht oder nur unter Bedenken realisieren lassen. Außerdem stellen sie nicht genügend Mittel für die Realisierung zur Verfügung. Seitens der Planung liegt die Ursache für Fehler, eine unzureichende, fehlerhafte oder unsorgfältige Planung, meist in der mangelhaften Qualifikation und Erfahrung der Ingenieure und Planer.

Tholen und Baumann (2002) teilen diese Einschätzung und betonen ebenfalls, dass die Gründe für Fehler meist der herrschende Preisdruck sowie die mangelnde Qualifikation der Beteiligten sind. Des Weiteren merken sie an, dass für die planerischen Vorgaben ein umfassendes Wissen über die baulichen Zusammenhänge und das Zusammenwirken der einzelnen Ausbauteile eines Brunnens notwendig ist, um Fehler bereits in der Ausschreibung zu vermeiden.

Abschließend lässt sich laut Conrad (2010) feststellen, dass schlechte Randbedingungen auf Vorgaben der Bauherren bzw. deren Berater zurückzuführen sind, während die meisten Verstöße gegen die Regeln des Brunnenbaus von Ingenieuren und Planern begangen werden.

Um Fehler in der Planung zu vermeiden, ist es also wichtig durch die Voruntersuchung einen geeigneten Standort auszuwählen und dessen Eigenschaften und sein Verhalten in bestimmten Situationen gut zu kennen. Untersuchungsmethoden hierfür wurden im vorangegangenen Kapitel vorgestellt. Es liegt dann zum einen am Bauherrn, genügend Mittel für den Bau und die Planung bereitzustellen, sowie qualifizierte Beauftragte auszuwählen. Zum anderen sind Planer und Ingenieure gefordert, kompetente Fachleute einzusetzen, denkbare Risiken und Störfälle abzuschätzen und sorgfältige Ausschreibungen mit klaren Vergabekriterien durchzusetzen (Conrad, 2010).

## 7.2 Bau

Dieses Kapitel widmet sich dem Bau von HFB: angefangen vom Schachtbau über den Vortrieb der Horizontalstränge in den verschiedenen Verfahren bis zum Ausbau des Ringraums und der Fördertechnik.

### 7.2.1 Schachtbau

(nach Nemeček, 2006)

Zu Beginn eines HFB Baus wird der Brunnenschacht abgeteuft, von welchem aus anschließend die horizontalen Filterstränge vorgetrieben werden und welcher durch entsprechende Einbauten und Aufbauten die Grundlage für das Abschlussbauwerk darstellt.

Vor Beginn der Schachtabsenkung wird eine Zentralbohrung, bevorzugt im Greiferbohrverfahren, abgeteuft. Dieses Verfahren gewährleistet eine gute Dokumentation der vorhandenen Bodenverhältnisse und sollte durch kontinuierliche Bodenprobenahme samt Ermittlung der Kornverteilung unterstützt werden. Haertl (zit. in Nemeček, 2006) empfiehlt zudem im Zuge der Zentralbohrung Pumpversuche durchzuführen, um den optimalen Vortriebshorizont zu finden.

Die Schächte werden meist als Senkschächte ausgeführt und entstehen dabei entweder auf der Baustelle als Ortbetonschächte oder werden aus Betonfertigteilen zusammengesetzt. Haertl (zit. in Nemeček, 2006) merkt an, dass dies auch von den Untergrundverhältnissen abhängig ist. So setzt man in den meist grobkörnigen Böden in Österreich auf Ortbetonschächte während in den feinkörnigeren Böden in Deutschland mit Fertigteilen gearbeitet wird.

Das Absenken der Schächte erfolgt dann, neben dem Unterbaggern, größtenteils durch das Eigengewicht der Schächte, die immer wieder aufbetoniert werden. Zu diesem Zweck werden Wandstärken eingesetzt, welche aus rein statischen Gründen nicht notwendig sind. Haertl (zit. in Nemeček, 2006) nennt eine Faustformel, nach welcher Brunnenschächte mit einer lichten Weite von 4 m mit einer Wandstärke von 0,40 m ausgeführt werden, Schächte mit einer lichten Weite von 2,8 - 3m mit Wandstärken von 0,30 - 0,40 m und Schächte von Kleinhorizontalfilterbrunnen mit lichten Weiten von 2m mit 0,20 – 0,30 m Wandstärke.

Prinzipiell werden die Schächte auf drei Belastungsfälle bemessen:

- hydraulischer Grundbruch und Überdruck im Schacht
- Schachtabreißen (Schacht ist oben festgehalten und unten frei, d.h. das gesamte Gewicht muss von der Armierung gehalten werden)
- Auftriebssicherheit

Darüber hinaus muss der untere Schachtbereich so bewehrt werden, dass die relativ hohen Pressdrücke aufgenommen werden können (Haertl zit. in Nemeček, 2006). Laut DVGW W 128 (2008) sollen Brunnenschächte aus Ortbeton der Nutzungsklasse B (Begrenzte Wasserundurchlässigkeit) zugeordnet werden. Danach gilt bei Schächten, die im Förderbetrieb geflutet sind, die Klassifizierung „kapillar durchfeuchtet“, bei Schächten im Trockenbetrieb gilt „weitgehend trocken“. Bei Brunnenschächten aus Betonfertigteilen gelten für die einzelnen Betonsegmente die Vorschriften der Werksprüfung nach DIN EN 640 (DVGW W 128, 2008). Laut ÖNORM B 2601 ist eine Mindestbetonqualität von C20/25/XC3 gemäß ÖNORM B 4710-1 vorzusehen. Die ÖNORM 2601 regelt Planung, Bau und Betrieb von Brunnen. Sie verweist auf die ÖNORM B 5014-1 und 2, die die Anforderungen und Prüfung von Werkstoffen im Trinkwasserbereich thematisieren, sowie ÖNORM B 5072, welche sich u.a. mit Schachtringen aus Stahlbeton und somit Betonfertigteilen beschäftigt.

### 7.2.1.1 Schrittweise Herstellung

In einem ersten Schritt vor Beginn der Schachtbauarbeiten wird ein sogenannter Vorschacht hergestellt. Dieser ist in etwa 2-4m tief und hat einen ca. 1m größeren Radius als der geplante Schacht. Auf der plan abgezogenen Sohle des Vorschachts wird dann eine Senkscheide aus schweren Stahlprofilen aufgesetzt. Der Durchmesser der Senkscheide ist meist einige cm größer als der geplante Schachtaußendurchmesser, um einen entsprechenden Freischnitt zu gewährleisten. Der Vorschacht ist eine wichtige Bauhilfsmaßnahme, die einerseits das Einbringen von Absenkhilfen ermöglicht und andererseits Maßnahmen zum lotrechten Abteufen möglich macht (Abbildung 7.8).



Abbildung 7.8: Senkscheide für 3m Schacht, man sieht die Innenschalung mit aufkaschierter Vließbahn, sowie das Fugenband (Nemeček, 2006)

Anschließend wird der erste Schachtabschnitt geschalt und betoniert. Dieser enthält meist auch die Führungsstücke für die Horizontalvortriebe. Laut Haertl (zit. in Nemeček, 2006) können bis zu 20 Führungsstücke in einer Ebene eingebaut werden. Sie bestehen im Allgemeinen aus einem Stahlhüllrohr mit speziellen Flanschen und müssen beim Abteufen des Schachtes an beiden Stirnseiten druckwasserdicht verschlossen sein. Zur Schachtinnenseite ist zunächst ein normgerechter Blindflanschverschluss vorzusehen, der später durch den endgültigen Strangverschluss ersetzt wird. Die Außenseite ist durch eine Sollbruchscheibe abgedichtet, welche aus möglichst sprödem Material gefertigt sein sollte, damit sie nach dem Durchstoßen nicht zum Vortriebshindernis wird. Falls Schachtwanddurchführungen nachträglich in Schachtwände eingesetzt werden sollen (z. B. für Ersatzstränge), so müssen zunächst Beton-Kernbohrungen ausgeführt werden, in die hinein die Formstücke eingeklebt werden (DVGW W 128, 2008).

Danach beginnt Segment um Segment der Absenkvorgang bis die Endteufe erreicht ist. Dabei ist stets auf die Vertikalität zu achten und bei Abweichungen von jener sind entsprechende Korrekturmaßnahmen zu setzen. Als Absenkhilfe setzt man bei grobkörnigen Böden Rollkies ein, was einen Kugellagereffekt bewirkt. Bei feinkörnigen und bindigen Böden können Gleitsuspensionen, wie z.B.: Bentonit, unterstützend eingesetzt werden. Dennoch treten vor allem bei fluvialen Schotterkörpern immer wieder Hindernisse, wie z.B.: Steine und Blockwerk auf, welche jedoch meist durch Meißel beseitigt werden können. Reicht diese Maßnahme nicht aus, so kann der Einsatz von Tauchern notwendig sein.

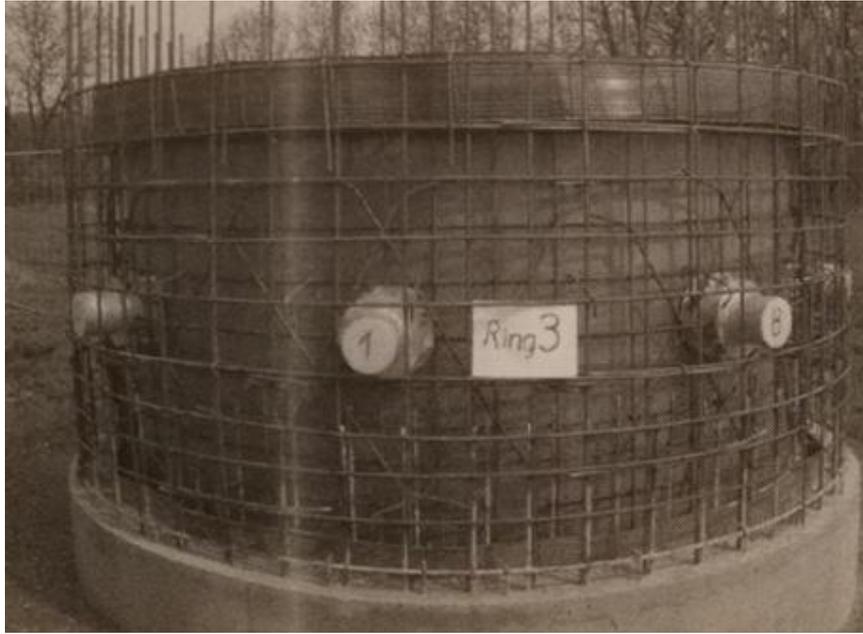


Abbildung 7.9: Erstes Segment mit Anschlüssen für die Filterstränge (Nemeček, 2006)

Der nächste Schritt ist die Einbindung in den Grundwasserstauer bzw. der Abschluss des Schachtes durch eine Betonplombe. Beim Einbringen des Schachtes in den Grundwasserstauer kann bei einem relativ horizontalen Grundwasserstauer, der den Wassereintritt in den Schacht weitestgehend verhindert, mit offener Wasserhaltung gearbeitet werden. Ist dies nicht möglich, so erfolgt das Einbringen der Plombe mit Hilfe von Tauchern. Zuvor werden jedoch Feinteile weitestgehend abgesaugt, um Undichtigkeiten zu vermeiden. Danach wird die Plombe im Kontraktorverfahren eingebracht, dabei müssen die Schüttrohre immer in den frischen Beton eingetaucht sein, um ein Entmischen zu verhindern. Bei tiefen Schächten kann darüber hinaus der Einsatz einer Betonpumpe notwendig sein. Damit ein Durchströmen verhindert wird und die Betonplombe einwandfrei abbinden kann, muss der Wasserspiegel innerhalb und außerhalb des Schachtes zumindest 48h gleich hoch gehalten werden. Nach dem Aushärten der Plombe wird diese begradigt und eine stark armierte Betonsohle, die mit dem Schacht verzahnt ist, eingebaut. Anschließend beginnen die Vorbereitungsarbeiten für die horizontalen Filterstränge.

### 7.2.2 Horizontale Bohrtechnik

Grundsätzlich werden zwei horizontale Bohrverfahren für den Einsatz bei HFB unterschieden. Zum einen HFB-Bohrverfahren, die zur Gruppe der horizontalen Richtbohrtechnik gehören, und die VHB-Verfahren, die zur steuerbaren Horizontalbohrtechnik zählen. Beide Verfahren werden meist verrohrt durchgeführt. Der problemlose Ablauf und schließlich der Erfolg der Bohrung hängen dabei einmal mehr von einer detaillierten Erkundung der Filterstrangwege durch Aufschlussbohrungen ab (DVGW W 128, 2008).

### 7.2.2.1 HFB Verfahren

Beim horizontalen Vortrieb kann nicht mit den üblichen Verfahren des Vertikalfilterbrunnenbaus vorgegangen werden kann. Da rotierende oder schlagende Bohrwerkzeuge oder Greifer zum Lösen und Fördern des zu entfernenden Bodens nicht verwendet werden können, setzt man beim HFB auf ein Entsandungsgestänge. Dieses ist mit einem Bohrkopf oder Bohrpilot mit Eintrittsöffnung versehen und transportiert allein durch die Schleppkraft des Wassers das Bohrgut von der Bohrspitze zum Brunnenschacht. Dabei ist es so zu dimensionieren, dass die Schleppkraft des Wassers für den Transport ausreicht und grobe Bohrgutbestandteile das Gestänge noch passieren können (DVGW W 128, 2008).



Abbildung 7.10: Vortriebspresse mit Filterrohr und Entsandungsgestänge beim Einbau (Nemeček, 2006) und Vortriebspresse am Bauhof

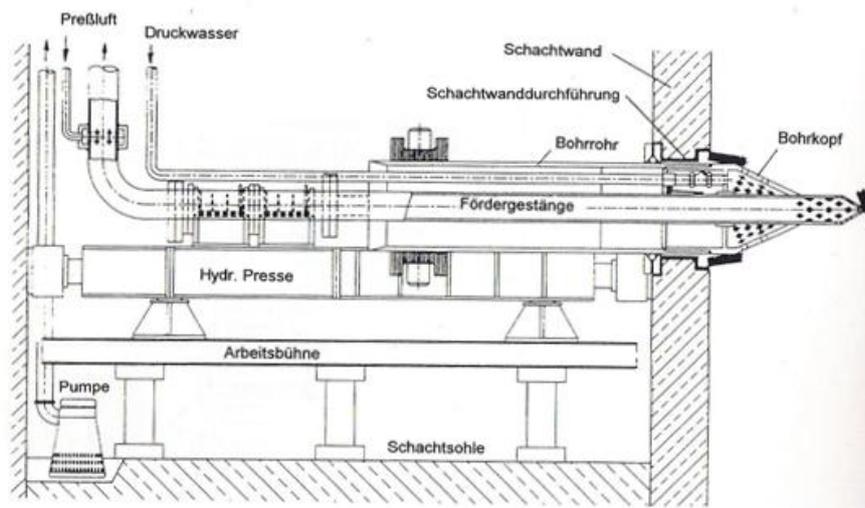


Abbildung 7.11: Beginn des Bohrvorgangs (aus Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000)

Der Bohrkopf bzw. Bohrpilot sollte so konstruiert sein, dass er laut DVGW W 128 (2008) folgende Aufgaben und Funktionen übernehmen kann:

- Lösen und Erfassen des Bohrgutes durch Längsbewegungen des Bohrrohres
- Austragen des Bohrgutes unter Ausnutzung des hydrostatischen Überdruckes
- Ausspülen eines möglichst großen Anteils an Unterkorn aus den Gesteinsschichten mit relativ hoher Ungleichförmigkeit sowie Verdrängung und Anreicherung des Grobkorns längs der Bohrung, um dadurch einen grobkörnigen, gut wasserwegsamem Stützfilterkörper um die Bohrung entstehen zu lassen
- Möglichkeit eine Hochdruckspülung (an den Bohrkopf) anzuschließen, um einerseits das Lösen des Bohrgutes zu erleichtern und andererseits die Bohrgutförderung beim Durchbohren von stark bindigen Schichten zu verbessern

Ein wesentliches Problem beim horizontalen Vortrieb ist, dass die Bohrspitze, wegen der Längsbewegung der Verrohrung, dazu neigt nach oben auszuweichen. Damit ein Ansteigen und Krümmen der Bohrung verhindert wird und es so gar nicht zu einem Abbruch und einem erneuten Vortriebsversuch kommen muss, ist neben dem genauen Ansatz der ersten Rohre die Modifikation des Bohrkopfes an die Untergrundverhältnisse wichtig (Nemeček, 2006). Haertl (zit. in Nemeček, 2006) weist in diesem Zusammenhang auf die Möglichkeit hin, die Eintrittsöffnung so zu setzen, dass Materialentnahme hauptsächlich von unten geschieht.

Nach Erreichen der Endteufe wird das Entsandungsgestänge gezogen. Der Bohrkopf verbleibt je nach Verfahren im Untergrund. Dafür ist es wichtig die Verbindung zwischen Bohrspitze und Verrohrung so zu wählen, dass sie einerseits druckwasserdicht ist und andererseits ein Abstoßen des Bohrkopfes von der Rohrtour mit vertretbarem Kraftaufwand gelingt. Außerdem muss gewährleistet sein, dass die vorhandene Anschlussöffnung im Bohrkopf beim Ausbau des Gestänges sofort selbstständig druckwasserdicht schließt, um das Einspülen von Unterkorn in die Bohrung zu verhindern (DVGW W 128, 2008).

Im Zuge der Baudokumentation wird heute während des gesamten Vortriebs die Steigung der Filterstränge mit einem eigens dafür entwickelten Schlauchwaagen-Messsystem kontrolliert (Haertl zit. in Nemeček, 2006). Das ausgespülte Bodenmaterial sollte zudem im Idealfall strangweise gelagert werden, um einen Überblick über die Bodenverhältnisse zu haben und um die Berechnung des wirksamen Filterdurchmessers nach NEMECEK durchzuführen (4.4).

Im Laufe der Jahre wurden verschiedene Vortriebsverfahren entwickelt, die je nach Untergrundverhältnissen und Präferenzen der Firmen eingesetzt werden. Zuerst wurde das Verfahren nach RANNEY entwickelt, danach folgten die Verfahren nach FEHLMANN und PREUSSAG und schließlich Abwandlungen und Kombinationen dieser.

Ein Beispiel für eine Kombination des Fehlmann Verfahrens mit dem Ranney Verfahren sind die Horizontalfilterbrunnen der Stadt Wien auf der Donauinsel Nord, für die eigens ein neues Kopfsystem entwickelt wurde (Haertl zit. in Nemeček, 2006).

Eine weitere Möglichkeit horizontale Filterstränge einzubauen, ist die Filterstrangebene von der Oberfläche aus freizulegen, die sogenannte offene Bauweise. Dabei wird bis zur wasserführenden Schicht ausgehoben und anschließend mit Filterkies verfüllt und die Deckschicht wieder eingebracht. Danach werden die Filterstränge wie gewohnt vom Schacht aus vorgepresst. Diese Möglichkeit ist freilich nur bei Brunnen sinnvoll, bei denen die Stränge nicht in großer Tiefe liegen, dennoch hat sich beispielsweise Hessen Wasser bei manchen Brunnen dafür entschieden (Hessenwasser-Magazin, 2013). Laut ÖNORM B 2601 müssen die Filterkünetten zudem durch Sperrschichten (Tonsperren) nach oben hin abgedichtet werden. Außerdem ist eine intensive Entsandung vorzusehen, um einen möglichst kontinuierlichen Übergang zwischen Filterkies und gewachsenem Boden zu gewährleisten.

### 7.2.2.1.1 Ranney-Verfahren

Der wesentliche Unterschied bei diesem Verfahren besteht darin, dass die Bohrröhre gleichzeitig die Filterrohre darstellen. Zu diesem Zweck werden starkwandige geschlitzte Filterrohre mittels hydraulischer Presse vorgetrieben. Die Wandstärke muss auf Grund der großen axialen Belastung mit den Vortriebskräften abgestimmt werden. Gleichzeitig erfolgt eine Intensiventsandung durch Entnahme des Unterkorns über den Vortriebskopf. Die Entsandungsrohre können dabei unabhängig von den Filterrohren bewegt werden. Dadurch entsteht ein Stützkörper mit stufenlosem Übergang zum gewachsenen Boden, der die Aufgabe der Filterkiesschüttung übernehmen soll. Dies setzt allerdings voraus, dass der Kornaufbau des zu durchbohrenden Grundwasserleiters und die Schlitz- und Spaltweiten des Filterrohres aufeinander abgestimmt werden (5.3.1). Da diese Abstimmung vor der Bohrung erfolgen muss, ist ein engmaschiges Raster vertikaler Aufschlussbohrungen entlang der Strangachse zur Erkundung des Kornaufbaus auf dem Niveau der Filterrohrstränge erforderlich (DVGW W 128, 2008).

Haertl (zit. in Nemeček, 2006) gibt an, dass übliche Vortriebslängen beim Ranney Verfahren bei Filterrohr Nennweiten von 200 mm etwa 25-40m, bei Nennweiten von 120 mm ca. 15-20m betragen. Dazu müssen die einzelnen Filterrohrstück kraftschlüssig verschweißt werden. Um Korrosionsschäden an Edelstahlfilterrohren zu verhindern, ist es notwendig, die Schweißnähte zum Beispiel durch „Bürsten“ nachzubehandeln (Haertl zit. in Nemeček, 2006). Zudem ist jeder Kontakt zwischen einer Edelstahl-Ausbauperforung und Bohrwerkzeugen aus Kohlenstoffstahl zu verhindern (DVGW W 128, 2008) (7.3.3).

Bei groben Bodenschichten wie Kies und sandigem Schotter ergibt sich ein hoher Spitzenwiderstand am Bohrkopf. Dies führte zur Entwicklung des RANNEY-FALLY-Bohrkopfes, bei dem das Entsandungsrohr vor dem eigentlichen Bohrkopf das anstehende Gestein auflockert und entsandet. Das Entsandungsrohr wird nach Fertigstellung wieder ausgebaut, während der Bohrkopf im Boden verbleibt (Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000).

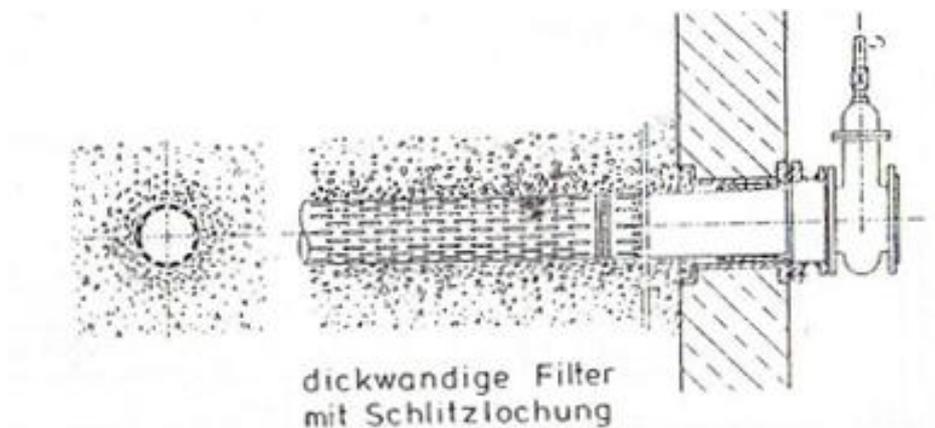


Abbildung 7.12: Ausbildung Stützfilter und Schema des RANNEY Verfahrens (aus Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000)

### 7.2.2.1.2 Fehlmann-Verfahren

Bei diesem System werden starkwandige Bohrrohre mit Gewindeverbindungen vorgepresst. Am Vortriebskopf erfolgt während des Vortriebs eine gewisse Feinteilentnahme. Nach Erreichen der Endteufe werden die Filterrohre eingebaut. Dabei sollten die Bohrrohre so dimensioniert sein, dass Filterrohre samt Zentrierung sicher eingebaut werden können. Der Ringraum zwischen den beiden Rohren wird nicht mit Filterkies verfüllt und die Bohrrohre anschließend wieder gezogen. Der Bohrkopf wird abgestoßen und verbleibt im Untergrund. Da im Zuge des Vortriebs der Bohrrohre eine Erkundung des Untergrunds erfolgt, können die Filterrohre an den Untergrund angepasst werden. Der entstehende Stützkörper ist allerdings nicht so groß wie beim Ranney-Verfahren. Dennoch sind ähnliche Anforderungen an die Voruntersuchung zu stellen.

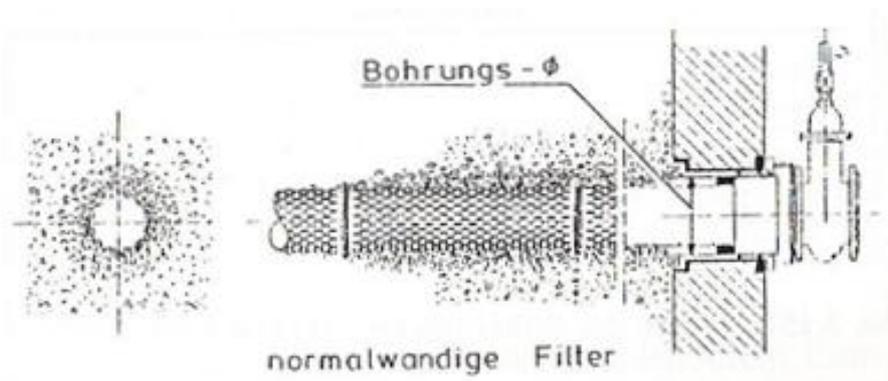


Abbildung 7.13: Ausbildung Stützfilter und Schema des FEHLMANN-Verfahrens (aus Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000)

Laut DVGW W 128 (2008) müssen die Bohrrohre aus hochfestem Stahl bestehen und mit speziellen Gewindeverbindungen versehen sein, welche hohe Druck- und Zugkräfte aber auch Biegung übertragen können. Die Verbindungen müssen so druckwasserdicht sein, dass ein Eintrieb von Feinkorn vermieden wird und so präzise verarbeitet sein, dass sie nach den hohen Belastungen auch wieder gelöst werden können.

### 7.2.2.1.3 Preussag-Verfahren

Das Preussag Verfahren ist dem Fehlmann Verfahren sehr ähnlich, mit dem Unterschied, dass neben dem Filterrohr auch ein Spülgestänge eingebaut wird. Während des Ziehens der Bohrrohre wird so gleichzeitig ein Filterkieskörper eingespült. Dieser ist nach DVGW W 113 (2001) auf den Grundwasserleiter abgestimmt und ermöglicht so den Einsatz des Verfahrens auch in feinkörnigen Grundwasserleitern. Danach folgt eine Kammerentsandung, um einen stufenlosen Übergang zum gewachsenen Boden zu erreichen, ein Stützkörper wird aber nicht aufgebaut.

Ein Vorteil des Preussag-Verfahrens ist, dass größere Durchmesser gebohrt werden können, welche auch weniger zum „Ansteigen“ während der Bohrung neigen (Nemeček, 2006).

Laut Conrad (2010) gibt es zur Herstellung des Kiesmantelbrunnen außerdem ein unter Patentschutz stehendes Drehbohrverfahren mit Antrieb durch Wasserhydraulik, genannt WHD. Dieses Verfahren erlaubt auch den Vortrieb in hartgelagerten und/oder grobkörnigen Schichten, darüber hinaus kann es auch im Festgestein eingesetzt werden.

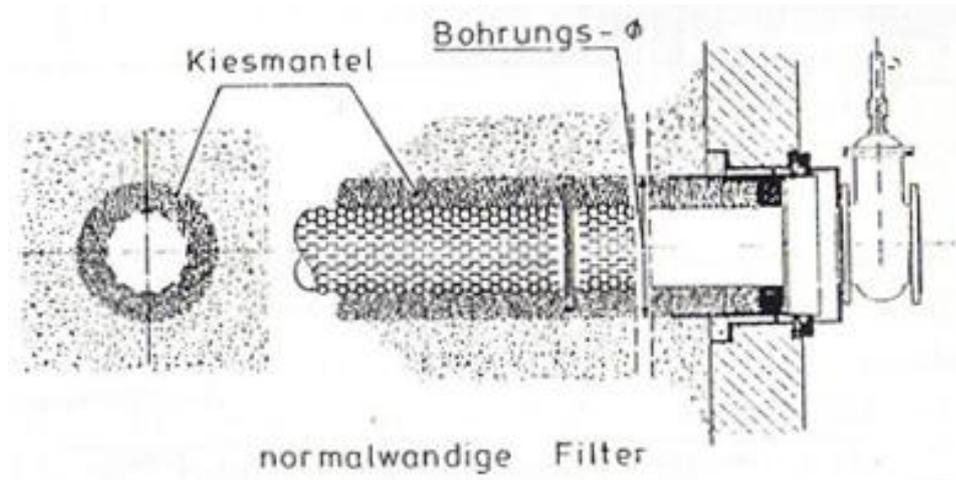


Abbildung 7.14: Ausbildung Stützfilter und Schema PREUSSAG - Kiesmantel – Verfahren (aus Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000)

### 7.2.2.2 Spülbohrverfahren im Horizontalbrunnenbau (VHB)

Bohrungen in diesem Verfahren werden von der Geländeoberfläche ausgeführt. Unter einem bestimmten Winkel wird die Pilotbohrung von einer Startgrube aus vorgetrieben. Die Startgrube dient dabei vor allem zur Aufnahme der rückfließenden mit Bohrklein beladenen Spülflüssigkeit (Sass & Treskatis, 2000a). Die Bohrung wird dann unter genauer Ortung bis zur definierten Verlegetiefe gesteuert und meist horizontal im Grundwasserleiter entlang geführt. Schließlich wird die Bohrung zurück an die Geländeoberfläche oder eine Zielgrube geführt. Von der Zielgrube aus wird die Bohrung dann schrittweise auf den vorgegebenen Durchmesser durch Zurückziehen des sogenannten Aufweitkopfes vergrößert. Um die Bohrlochstabilität zu erhöhen, kann in einem der Aufweitschritte ein Überwaschrohr eingezogen werden, welches nach dem Ausbau der Filterrohre wieder gezogen wird. Die Bohrköpfe können auf die jeweilige Gesteinssituation angepasst werden. Sie bohren sich durch Rotation und mit Hilfe des Spülstroms ins Gestein. Das Bohrgut wird durch den Spülstrom im Ringraum zwischen Bohrgestänge und Bohrlochwand abtransportiert (Sass & Treskatis, 2000b).

Laut DVGW W 128 (2008) sind in Deutschland zur Wassergewinnung Bohrdurchmesser bis 400 mm und Bohrlängen bis 400 m zum Einsatz gekommen.

Der wesentliche Vorteil der VHB-Spülbohrtechnik ist, dass die Lage und Richtung der Bohrung während des Vortriebs gemessen und geändert werden können und die Bohrung somit optimal an die Untergrundverhältnisse angepasst werden kann. Um Richtungsänderungen durchzuführen, muss der Bohrkopf entweder einseitig abgeschrägt oder mit einem Winkelstück versehen werden. Außerdem muss seine Lage genau erfasst werden. Dafür werden Neigung, Azimuth und Rollwinkel mit magnetischen bzw. elektromagnetischen Verfahren gemessen und die Messdaten üblicherweise über einen unmittelbar hinter der Bohrstrangspitze angeordneten Sender oder über Kabel zur Bohranlage übertragen. Eine Überprüfung der Ist-Daten mit den Soll-Daten zeigt dann, ob eine Richtungsänderung für die Pilotbohrung erforderlich wird (DVGW W 128, 2008).

Die VHB können nur mittels Spülbohrtechnik hergestellt werden, die Spülungstechnik und Spülungskontrolle sind besonders wichtig. Die Rezeptur der Bohrspülungen kann einerseits individuell an den Untergrund angepasst werden, die Entfernung der Spülungen nach dem Brunnenausbau muss jedoch gemäß DVGW W 119 (M) sichergestellt werden.

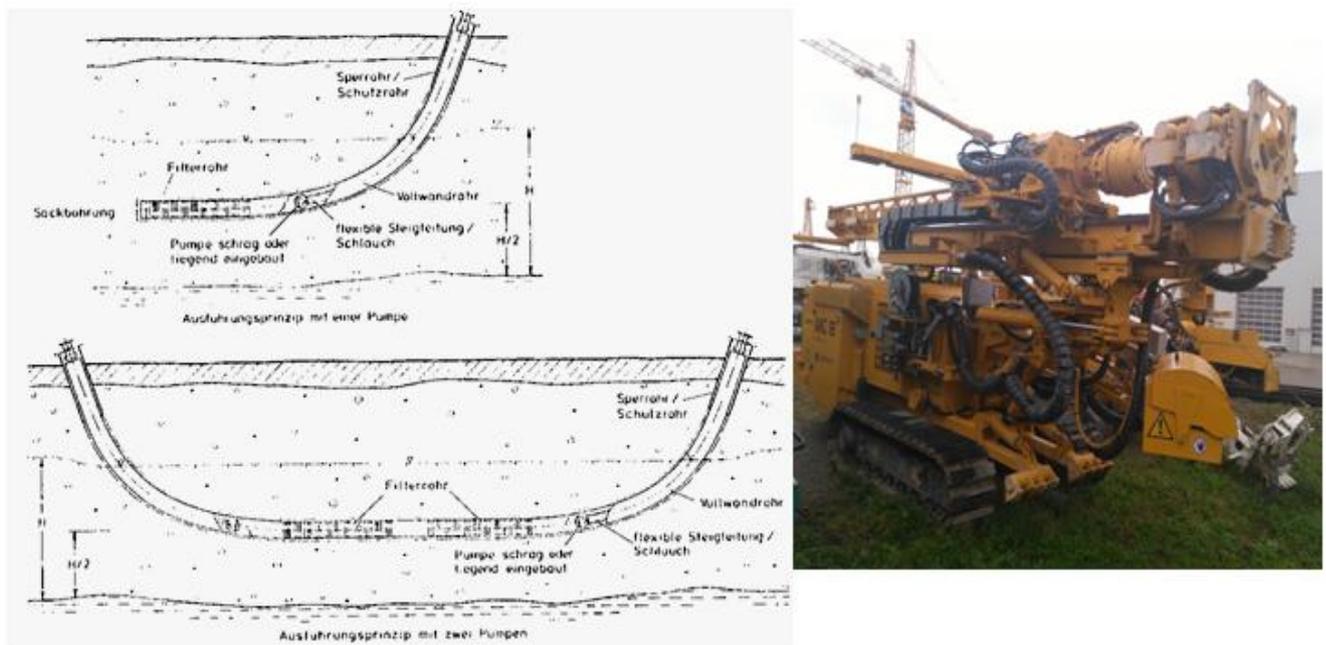


Abbildung 7.15 Ausführungsbeispiele für VHB (Single- und Twinbrunnen) (Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000) und Bohrgerät am Bauhof

### 7.2.2.3 Umgang mit Bohrspülungen

Bohrspülungen erfüllen grundsätzlich vier Ziele. Erstens das Austragen des Bohrgutes und die Förderung an die Oberfläche und die damit verbundene Möglichkeit der Kontrolle und Untersuchung der Geologie. Zweitens das Offenhalten und Sichern der Bohrung durch einen leicht über dem Gebirgsdruck stehenden hydrostatischen Druck der Wassersäule, sowie durch die Bildung eines Filterkuchens aus Zusatzstoffen und Sediment an der Bohrlochinnenwand. Der geforderte hydrostatische Druck wird durch das Wasser und die enthaltenen Zuschläge erreicht. Drittens kühlen die Bohrspülungen das Bohrwerkzeug und reduzieren die Reibungsverluste. Viertens wird das Risiko des Ausbrechens bei gespannten Grundwasserleitern minimiert und Umläufigkeiten in andere Grundwasserhorizonte unterbunden (Tewes, 2017).

Der Filterkuchen, der das Bohrloch sichert, ist aber auch Grund für nachfolgende Probleme. Zum einen werden Pumpversuche verfälscht, da durch die Abdichtung (Skin-Schicht) zu niedrige Durchlässigkeiten des Grundwasserleiters angenommen werden. Zum anderen werden hohe Druckverluste bzw. Absenkungen verursacht, die die Energiekosten steigern. Außerdem kann es zu einer Verstärkung von Alterungserscheinungen kommen (7.3.3). Houben (2017) hat in Untersuchungen herausgefunden, dass es verschiedene Typen von Filterkuchen gibt. Diese sind unter anderem abhängig vom Durchlässigkeitskontrast zwischen Aquifer und Filterkies, von der Suspensionsbeladung und vom Wasserdruck im Bohrloch. Die untersuchten Filterkuchen wiesen Mächtigkeiten von 0 bis 3 mm auf und bestanden meist aus ungleichförmigem Silt. Houben (2017) betont die Wichtigkeit von Mikrorissen für die entstehende Durchlässigkeit.

Spülungszusätze können zum Beispiel sein: Wasser, Polymere, Bentonit ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Soda, Kreide oder Schwerspat (zum Beschweren). Dabei können auf 1 m<sup>3</sup> Wasser 5-10 kg Polymere,

20-30 kg Bentonite und max. 5-0 kg Soda kommen. Die Zusammensetzung richtet sich nach dem jeweiligen Standort (Tewes, 2017). Feststofffreie Spülungen sind laut Tholen (2017) vorzuziehen, da sie die Bohrlochwand weniger abdichten und die Entsorgung, trotz Desander etc. erleichtern.

Das Vorhandensein der Zusatzstoffe erleichtert zum Einen das Erreichen des Bohrziels, bedingt aber zum Anderen auch eine ständige Kontrolle (DVGW W 116) und Reinigung, sowie nachfolgend eine Entsorgung. Die Reinigung der Spülflüssigkeit erfolgt heute durch Schüttelsiebe, Desander, Desilter und Zentrifugen aktiv direkt an der Baustelle, früher wurden oft Spülteiche eingesetzt, die aber aufgrund des erhöhten Platzbedarfs und der Schadstoffbelastung nicht mehr vertretbar sind. So wird die vom Gesetz geforderte erste Reinigungsstufe, Trennung von Fest- und Flüssigphase, umgesetzt. Eine feststofffreie Spülung ist dann die Voraussetzung für die Entsorgung, in der Feststoffe und Spülung getrennt betrachtet werden. An dieser Stelle gilt anzumerken, dass Bohrspülungen per Gesetz Abfall und keine Wertstoffe sind (umweltbundesamt.at). Darum sind alle Stoffe, die zur Herstellung einer Bohrspülung dienen, zu dokumentieren. Daraufhin sind sie als Abfallstoff zu deklarieren, zu transportieren und zu entsorgen. Weiters hat der Erzeuger (AG) eine Erzeugernummer zu beantragen. Der Transporteur muss eine Zulassung als Transporteur von Abfällen haben und der Bohrunternehmer hat die Abfallschlüsselnummer für die Spülungsart und den jeweiligen Ort des Einsatzes zu nennen. Außerdem hat der Bohrunternehmer eine Entsorgung zu benennen, die der AG übernimmt (Tewes, 2017). Nach Abfallrecht haftet jeder an der Entsorgung Beteiligte uneingeschränkt.

In der zweiten Reinigungsstufe wird die flüssige Bohrspülung nach einer Laboranalyse aufbereitet und der Bohrschlamm und das Bohrklein für die Deponierung konditioniert. Nach einer abermaligen Analyse im Labor wird der Feststoff schließlich auf der Deponie entsorgt und die Flüssigkeit als Brauchwasser wiederverwendet oder als Abwasser abgeleitet (Harms, 2017).

Eine unmittelbare Entsorgung ist laut Tewes (2017) nicht möglich, da eine genaue Analyse der Inhaltsstoffe erfolgen muss und die Entsorgungskapazitäten für Flüssigkeiten sehr gering sind. Eine Zwischenlagerung in Containern ist darum unumgänglich.

Abschließend lässt sich feststellen, dass der Umgang mit Bohrspülungen noch nicht vollständig ausgereift ist und es an Auftraggebern, Transportunternehmen und Bohrunternehmen liegt, ein klares Konzept zu entwickeln (Tewes, 2016).

### 7.2.3 Filterrohre

(nach Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000)

Je nach Vortriebsmethode und Untergrundverhältnissen ergeben sich bei HFB unterschiedliche Möglichkeiten für die Ausführung der Filterrohre und Schlitzweiten. Generell sollten die Filterrohre so ausgelegt sein, dass Wasser möglichst widerstandsfähig, sand- und turbulenzfrei in den Brunnenraum eintreten kann, um so eine lange Lebensdauer des Brunnens zu gewährleisten. Zu diesem Zweck sollten die Filter möglichst große Öffnungen aufweisen, um eine gute Wirksamkeit der Brunnenentwicklung, sprich einen spätere sandfreien Gewinnung, zu ermöglichen. Außerdem sollten die Öffnungen regelmäßig über die Filterfläche verteilt sein und möglichst so ausgelegt sein, dass sie nicht verstopfen oder leicht zu regenerieren sind. Weiters sollten scharfe Kanten im und am Filterrohr verhindert werden, da diese wiederum zu Wirbelbildung und Turbulenzen führen. Aus demselben Grund sollten sie eine Eintrittsgeschwindigkeit des Wassers ermöglichen, die unter der kritischen Geschwindigkeit liegt (4.4). Um einen möglichst kleinen Filtereintrittswiderstand zu erreichen, müssen die Öffnungen im Verhältnis mit dem undurchlässigen Rohranteil deutlich größer sein als der Porenanteil des umgebenden Filterkieses. Eine genaue Berechnung der Filterschlitzweiten findet sich in Kapitel 4.4. Die Filterrohre sollten außerdem entsprechende Festigkeit gegen Zug-,

Druck- und Axialkräfte besitzen, korrosionsfest gegen Säuren und elektrochemische Vorgänge sein, aus gesundheitlich unbedenklichen Materialien bestehen und langlebig sowie preiswert sein.

Diese Anforderungen führen zu folgenden handelsüblichen Ausführungen:

- Langloch- oder Schlitzfilter
- Schlitzbrückenfilter
- Wickeldrahtfilter

Diese werden aus Stahl, verzinktem Stahl und Edelstahl, für spezielle Zwecke, insbesondere bei aggressiven Grundwässern auch aus Kupfer, Bronze, Aluminium, oder besonderen Legierungen sowie aus hartgummi- oder kunststoffbeschichtetem Metall hergestellt. Außerdem:

- Kunststoff-Filter: mit parallel oder senkrecht zur Rohrachse angeordneten Schlitz

Zusätzlich ist anzumerken, dass die Länge der einzelnen Filterrohre bei den horizontalen Vortriebsverfahren abhängig vom Durchmesser des Brunnenschachtes so gewählt werden soll, dass die Filterstränge ohne Probleme eingebaut werden können. Folgend werden Besonderheiten der einzelnen Verfahren beschrieben.

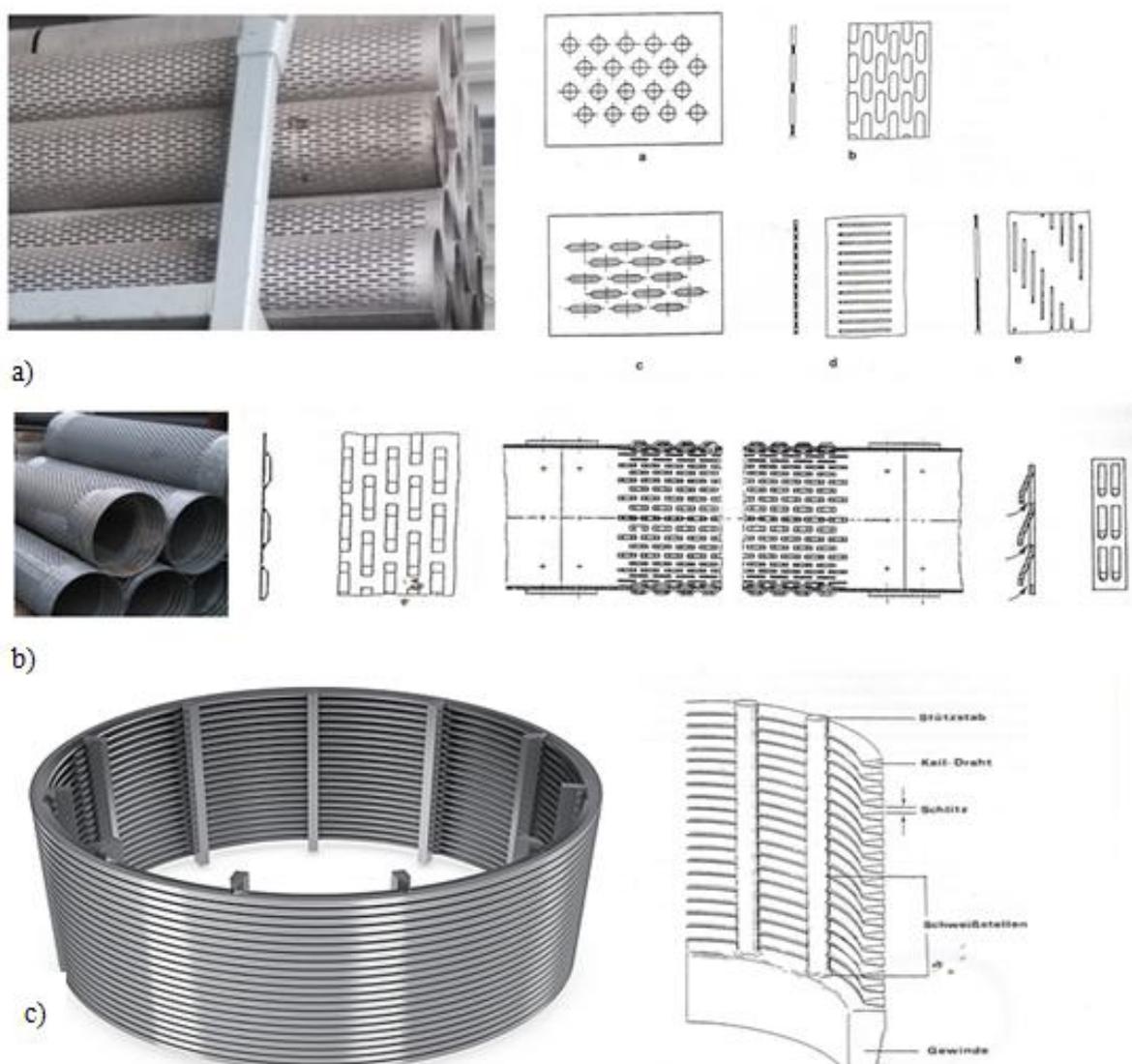


Abbildung 7.16: a) Langloch- und Schlitzfilter b) Schlitzbrückenfilter c) Wickeldrahtfilter (aus Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000, Privataufnahmen und TECmetall, 2003 - 2017)

### **7.2.3.1 Ranney-Verfahren**

Da bei diesem Verfahren die Bohrröhre gleichzeitig als Filterrohre dienen, besitzen sie große Wandstärken. Auf Grund dessen werden ausschließlich gestanzte Langloch- und Schlitzfilterrohre mit Schlitzweiten von min. 4 bis 6 mm eingebaut. Dies begrenzt das Verfahren auf den Einsatz in entsprechend grobkörnigen Gesteinsschichten.

### **7.2.3.2 Fehlmann-Verfahren**

(nach DVGW W 128 2008)

Beim Fehlmann-Verfahren werden meist handelsübliche Ausbauperforierungen in die Bohrröhre eingeschoben. Dabei ist es wichtig die Filterrohrführungen so zu gestalten, dass, außer der Zentrierfunktion für die eingeschobenen Filterrohre, kein Kontakt zwischen Bohrröhrenwandung und Filterrohr/Ausbauperforierung während des Einbaues und anschließend beim Ziehen der Bohrröhre besteht. Das gilt insbesondere für den Einsatz von Edelstahlfilterrohren.

### **7.2.3.3 Preussag-Verfahren**

(nach DVGW W 128 2008)

Das Preussag-Verfahren verlangt den Einbau von Filterrohren mit speziellen Filterenden. Die Filterrohre sollten wiederum druckfest miteinander verbunden sein und zentriert im Bohrloch liegen. Zudem sollten sie die Aufnahme und Lagerung des Spülgestänges für den Filterkies gewährleisten und den Ringraum für die Filterkiesschüttung in axialer Richtung abschotten.

Bei der Wahl der Filterrohrkonstruktion ist zu beachten, dass bei dem horizontalen Kiesmantelbrunnen hohe axiale Druckbelastungen auf die Filterrohre/Ausbauperforierung beim Ziehen der Bohrröhre wirken. Darum eignen sich vor allem Schlitzbrückenfilterrohre aus Edelstahl. Wickeldrahtfilterrohre müssen wegen ihrer geringeren axialen Druckfestigkeit in verstärkter Ausführung eingesetzt werden. Kunststoff-Filterrohre können nur in starkwandiger Ausführung zum Einsatz kommen.

Wie zuvor bereits erwähnt, wird beim Fehlmann und Preussag-Verfahren der Bohrkopf nach dem Eindichten des Filterrohrstranges in die Schachtwanddurchführung durch das Ziehen der Rohrtour abgestoßen. Die Filterrohre halten den Bohrkopf dabei in seiner Lage. Zu diesem Zweck müssen sie eine ausreichend Druckfestigkeit besitzen.

Um Kontakterosion zu vermeiden, ist zudem bei Edelstahlfilterrohren zwischen Filterrohrbodenplatte und dem „verlorenen Bohrkopf“ eine ausreichend dicke Isolierschicht vorzusehen.

### **7.2.3.4 VHB**

(nach DVGW W 128 2008)

Die DVGW W 128 (2008) gibt an, dass für das verlaufsgesteuerte Spülbohrverfahren grundsätzlich alle Filter- und Vollrohre gemäß DIN 4922-2 und DIN 4935 eingesetzt werden können. Da aber, abhängig von der Bohrlochlänge, wesentlich höhere Zugbeanspruchungen und Biegebeanspruchungen während des Durchfahrens von Bohrlochkrümmungen auftreten, sind PVC-Rohre als Ausbauperforierungen für VHB-Bauformen in der Regel nicht geeignet. Auf Grund der Situation beim Einbauen der Rohre, scheiden Flanschverbindungen ebenfalls aus, stattdessen werden Schweißverbindungen verwendet. Sehr gut eignen sich Wickeldrahtfilterrohre als Ausbauperforierung. Sie erlauben eine relativ exakte Anpassung der Schlitzweiten auf den Grundwasserleiter und eignen sich daher sehr für Bohrungen, bei denen keine Kiesschüttung eingebracht wird.

Beim VHB muss der Ausbaurohrstrang hinter der Zielgrube komplett vorgefertigt und für das Einziehen vorbereitet werden. Nach Erreichen der Endteufe wird die Ausbauperrohrung von der Zielgrube aus mit einem speziellen Ziehkopf eingezogen. Dieser ist meist so ausgelegt, dass er ein Verdrehen des Ausbaustranges durch den Einbau eines Drehwirbels zwischen Bohr- bzw. Ziehkopf und Bohrgestänge verhindert.

### 7.2.4 Filtersand und Filterkies

Durch den Einbau von Filterkies, wie es beim Preussag-Verfahren der Fall ist, ist auch die Wassergewinnung in feinkörnigen Grundwasserleitern ohne große Versandung möglich. Dabei ist der Einbau von Filterkies ab jenem Punkt notwendig, an welchem die an das Ranney Verfahren gestellten Forderungen von  $d_{50} \geq 0,8\text{mm}$  und  $d_{100} \geq 12\text{ mm}$  nicht eingehalten werden können (Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000).

Falls Filtersande und Filterkiese verfahrens- oder untergrundbedingt in den Ringraum der horizontalen Stränge eingebracht werden müssen, so sind diese nach DVGW W 113 (2001) zu bestimmen und müssen den Anforderungen nach DIN 4924 entsprechen. (5.3.1).

### 7.2.5 Arbeitskammern und Fördertechnik

Nach Ausbau der Filterstränge und Anschluss an den Schacht, gibt es nun verschiedene Varianten das Grundwasser zu fördern. Einerseits die relativ einfache Form mittels Tauchpumpen, in der das Wasser direkt in den Schacht strömt und von dort gefördert wird. Der Schacht steht dann im sogenannten Nassbetrieb oder in Nassaufstellung. Dieses Verfahren hat den Vorteil niedrigerer Investitionskosten, bietet jedoch keine Möglichkeit einer individuellen, strangspezifischen Steuerung. Bei Störfällen oder Wartungen fällt zudem das ganze Wasserversorgungssystem aus. Zur besseren Wartung und Regenerierbarkeit setzt man also vielfach auf ein System, das das Wasser direkt aus den Strängen abpumpt und einer Aufbereitung zuführt. Die Schächte stehen dann im sogenannten Trockenbetrieb oder in Trockenaufstellung. Dazu sind jedoch noch zusätzliche Einbauten im Schacht notwendig. Die DVGW W 128 (2008) nennt beispielsweise Pumpenbehälter, abgeteilte Wasserkammern oder Saugleitungen. Daffner (2012) nennt ein Beispiele mit segmentierter Ringleitung Typ „Hoyerswerda“ und eines mit Druckkammer und Kreiselpumpe Typ „Senfenberg“. Diese Konstruktionen bringen den großen Vorteil, dass meist eine Arbeitskammer in Höhe der Strangebene entsteht, die während des Betriebs betreten werden kann und Inspektionen und auch Regenerierungen einzelner Stränge möglich macht. Zudem kann der Betrieb während der Wartung einzelner Stränge meist durch die anderen erhalten werden. Im speziellen Fall „Hoyerswerda“ garantiert die Trockenaufstellung, dass das stark reduzierende Milieu des Grundwassers von der Wasserfassung im Horizontalfilterstrang, über die Schieberkammer, alle Druckleitungen, Tauchpumpen bis zum Ableitungssystem erhalten bleibt. Dabei werden alle Filterstränge an die Ringleitung angeschlossen, diese gestattet die getrennte Abschaltung einzelner Stränge über motorgesteuerte Schieber, ohne die Fahrweise des gesamten HFB zu stören (Daffner, Huper, Scheppat-Rosenkranz, *et al.*, 2010). Die sieben Jahre nach der Inbetriebnahme durchgeführte Regenerierung bestätigt die Wirksamkeit dieser Bauausführung gegen eine drohende Verockerung (Huber & Daffner, 2012).

Solche Ausführungen stellen allerdings, vor allem bei kleinen Schachtdurchmessern, erhöhte Anforderungen an die Dichtigkeit des Schachtes und damit an die Schachtwanddurchführungen sowie die senkrechte Lage des Bauwerkes (DVGW W 128, 2008).

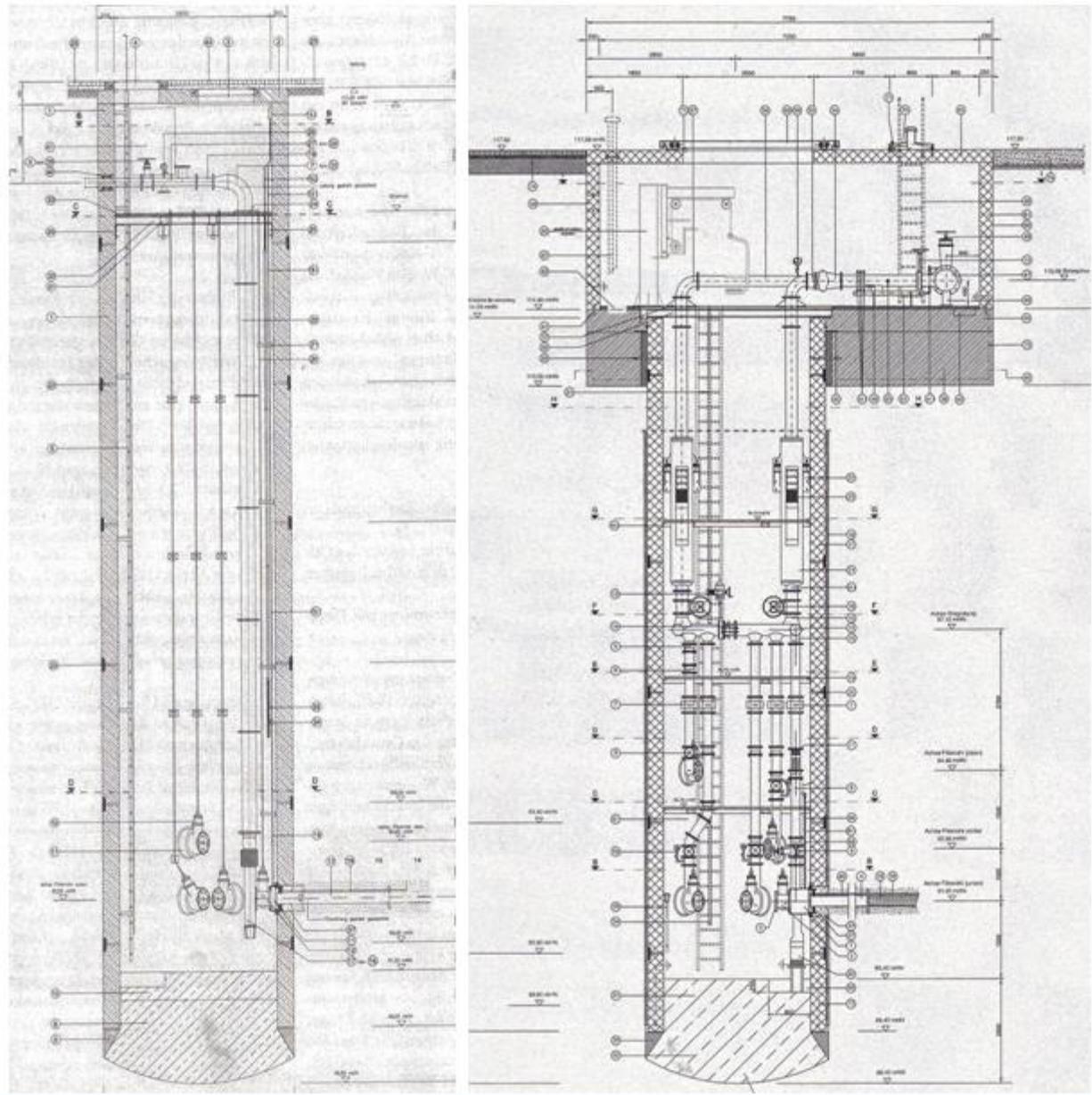


Abbildung 7.17: HFB in Nass- und Trockenaufstellung (Daffner, Huper & Scheppat-Rosenkranz, 2010)

### 7.2.6 Abschlussbauwerk

Normgerechte Abschlussbauwerke nach DVGW W 122 (A) beenden schließlich den konstruktiven Teil des Brunnenbaus. Bei der Planung über oder unter Gelände stehen laut DVGW W 128 (2008) folgende Punkte im Vordergrund:

- Arbeitssicherheit: notwendig ist eine voneinander getrennte, wasserdichte Einstiegs- und Montageöffnung, sowohl zur Wasserkammer der HFB-Bauform, als auch in den trockenen Teil des Abschlussbauwerkes, zudem ausreichend Bewetterung
- Unfallverhütung: z. B.: Leitern mit Absturzsicherung und Einstiegshilfen, sowie Zwischenpodeste

- Umfang der unterzubringenden maschinellen und elektrotechnischen Ausrüstungen z. B.:  
Trafo, Niederspannungsverteilung, Anlagenteile der Wasseraufbereitung,  
Brunnenköpfe/Pumpensitze, Krananlage
- Schutz der Wasserkammer vor Verunreinigungen und unbefugtem Betreten
- Höchster anzutreffender Grundwasserstand und das maximale Bemessungshochwasser in  
Überflutungsgebieten
- landschaftspflegerischen Aspekte

Zum Schutz der Anlagen vor Verunreinigungen bei Reparatur, Instandhaltung und Begehung sind DIN 2000 und DVGW W 291 (A) zu beachten.

### 7.2.7 Entwickeln der Brunnenstränge

Nach Fertigstellung des Brunnens werden Entwicklungsmaßnahmen durchgeführt, die zu einer Stabilisierung des Brunnens, zur Leistungssteigerung und zur Erhöhung der Nutzungsdauer führen sollen. Mit der Brunnenentwicklung ist bei Lockergestein-Grundwasserleitern grundsätzlich das Entsandn gemeint. Entsandn wird nach dem Einbau der Filterrohre und des Filterkieses und nach dem Ziehen der Verrohrung, aber vor dem Leistungs-Pumpversuch (Balke, Beims, Heers, *et al.*, 2000). Dabei erfordert das Entwickeln des gesamten Horizontalfilterbrunnens und der Einzelstränge unterschiedliche Verfahrenstechniken. Grundsätzlich erfolgt die Entwicklung im HF Brunnenbau strangweise. Besonders bei den Verfahren ohne Kiesmantel (Fehlmann, Ranney) dient die Intensiventsandn nicht nur der Brunnenentwicklung, sondern dem Aufbau des Stützfilters und ist damit ein wesentlicher Bestandteil des Vortriebverfahrens.

Die folgenden Maßnahmen nach DVGW W 119 (2002) sind für die Verhältnisse bei Horizontalbrunnen entsprechend anzupassen. Grundsätzlich basieren die verschiedenen Verfahren auf zwei Prinzipien. Zum Einen das des Austrags, bei dem durch Erzeugung einer ausreichenden Schleppkraft und der Bewegung des Korngerüstes schließlich eine Zerstörung der Kornbrücken erreicht wird und zum Anderen das der Kontrolle des Entsandnfortschrittes, der teufengerechten Erfassung und des Erreichens des vorgegebenen Sandgehalts. Die hydraulische Belastung auf den Brunnen wird je nach Anforderung festgelegt, meist entspricht sie einem Vielfachen der zukünftigen Entnahmemenge. Es haben sich folgende Verfahren etabliert, die eingeteilt sind in abschnittslose (a, b) und abschnittsweise Verfahren (c, d, e):

- a. Beim einfachen Entsandn mittels Kolben wird das Wasser in den Ringraum verdrängt, löst auf seinem Weg Sand und trägt diesen unterhalb des Kolbens wieder in den Filter, wo er absinkt. Diese Auflandung wird später z.B. durch eine Mammutpumpe entfernt. Die Abwärtsbewegung im Schacht wird durch ein Gewicht unterstützt. Bei der Abwärtsbewegung strömt ein Teil des Wassers durch ein Ventil durch den Kolben, ein Teil fließt über den Ringraum und zerstört dort eventuell vorhandene Kornbrücken. Der Kolben sollte von unten nach oben gefahren werden und die Abschnitte sollten nicht größer als 4 m sein. Dieses Verfahren arbeitet ohne Wasserentnahme.
- b. Beim Schocken wird die Fördereinrichtung abwechselnd aus und eingeschaltet. Das rückfließende Wasser aus der Steigleitung zerstört aufgebaute Kornbrücken. Diese Wirkung kann noch verstärkt werden, wenn man in einen Druckkessel abpumpt, das zurückfließende Wasser also mit höherem Druck im Brunnen ankommt. Die Intervalle beim Aus- und Einschalten sollten sich nach dem maximal möglichen abgesenkten Wasserspiegel bzw. dem Ruhewasserspiegel richten.

- c. Abschnittsweises Entsanden durch Pumpen erfolgt mittels abgepackterter Unterwasserpumpen und ist fast ohne Einschränkung einsetzbar. Einzig der Verschleiß der Pumpe durch die Sandführung stellt ein Problem dar. Die Entsandungsentnahmemenge hängt vom Abstand der Manschetten ab. Dieser sollte maximal 3m betragen und kann mit Hilfe einer Formel berechnet werden. Die Manschetten selbst bestehen meist aus einem Stahlgrundkörper mit zwischenliegenden Gummischeiben und sollten dicht am Strang anliegen, um Umläufigkeiten zu vermeiden. Bei Wickeldrahtfiltern sollten daher möglichst dicke Gummischeiben zur Anwendung kommen. Die Entsandungsabschnitte sollten einander ca. 50 cm überlappen.
- d. Abschnittsweises Entsanden mit Entsandungsseihern: Der Entnahmeseiher kann mittels Druckluft betrieben werden. Sein geringerer Wirkungsgrad wird oft nebensächlich, wenn man den Vorteil betrachtet, dass bei der Anwendung kein sandhaltiges Wasser mit maschinentechnischen Einrichtungen in Kontakt kommt und so Verschleiß vermieden wird. Es ist außerdem möglich den Seiher in engen Brunnen einzusetzen, obwohl bei Förderung eines Luft-Wasser-Gemisches die Mengen- und Sandführungsmessung schwierig wird.
- e. Beim Kolben bei gleichzeitigem Pumpen werden die unter den Kolben eingezogenen Feinanteile mittels Mammutpumpe oder Unterwasserpumpe abgepumpt. Dadurch ist eine laufende Kontrolle der Arbeitsschritte möglich.

Laut DVGW W 128 (2008) ist festzustellen, dass einfache Entsandungsmaßnahmen, wie z. B. Klarpumpen, zur Entfernung der beim Bohrvorgang eingetragenen Stoffe, beim HFB eher nebensächlich sind. Zudem ist beim Einsatz von Mammutpumpen (e.) unbedingt zu beachten, dass durch Auslauf in den Brunnenschacht das Verhältnis von Eintauchtiefe unter dem Wasserspiegel zu Förderhöhe extrem hoch und damit die Intensität der Förderung sehr groß ist.

Weil es bei den horizontalen Filtersträngen nicht möglich ist, dass der Sand in ein Sumpfrohr absinkt, setzt er sich auf der Sohle des Filterrohrs ab. Laut DVGW W 128 (2008) soll der Sand durch den Einbau eines kleinen Gestänges in einem letzten Arbeitsschritt zusätzlich zum gewählten Entsandungsverfahren abgesaugt werden.

Gleichsam ist bei verlaufsgesteuerten Bohrungen je nach Lage des Stranges abzuwägen, ob der Einbau eines Gestänges sinnvoll ist oder zu einer Beschädigung der Filterrohrstrecke führen kann. Da bei V-HFB Verfahren jedoch die Möglichkeit besteht den Filterstrang von Start- und Zielgrube aus zu erreichen, können Wasserhochdruckverfahren gemäß DVGW W 119 (M) für die Entsandung und Entwicklung des Brunnens eingesetzt werden, die, zusammen mit einer Abpumpvorrichtung, an einem Schlauch durch die Filterrohrstrecke gezogen werden können.

Abschließend ist die Entsandung zu beurteilen bzw. der Nachweis auf Sandfreiheit zu führen. Dabei muss gesagt sein, dass selbst bei sehr sorgfältiger Durchführung der Entsandung völlige Sandfreiheit praktisch nicht zu erreichen ist. Außerdem muss beim HFB berücksichtigt werden, dass bei der Messung des Sandgehaltes im Fördervolumenstrom aus einem gefluteten Schacht Fehlergebnisse durch z. B. Ablagerungen im Schacht und unterschiedliche Verwirbelungen möglich sind. Der Restsandgehalt sollte deshalb direkt in den Einzelsträngen, z.B.: über separate Ableitungen, bestimmt werden.

Die fachgerechte Bemessung und der Ausbau des Brunnens sind für die Entsandungsfähigkeit und den Entsandungserfolg maßgebend. Dabei hängt die Entsandungsfähigkeit des Brunnens von der Größe des Ringraumes und vom Grad der Ungleichkörnigkeit ab. Ein- bzw. gleichkörnige Lagerung mit einem  $c_U < 8$  sind nicht entsandungsfähig, bei gemischtkörniger Lagerung erfolgt

Entsandung/Suffosion nur bei fraktaler Partikellagerung mit einem  $c_U > 8$ . Die Lagerungsdichte des Schüttgutes kann durch Setzungen irreversibel verändert werden (Paul, 2017).

Paul (2017) nennt folgende Randbedingungen und Risiken, die Einfluss auf die Qualität der Brunnenentwicklung nehmen und über gute Brunnenentwicklung mit ergiebiger, nachhaltiger Nutzung oder teilweiser Selbstabdichtung durch äußere und innere Kolmation entscheiden:

- Bohrverfahren: Skinbildung und Skinreduzierung bei Trockenbohrungen mit/ohne sedimentabhängiger Teleskopierung und Spülbohrungen mit/ohne Zusätze und Spülungsaustausch
- Schüttgutbestimmung: mit/ohne Aufschlussbohrung, Überprüfung der „hydraulischen Kette“, Teufendifferenzierung entsprechend der GWL-Inhomogenität, usw.
- Schüttgutqualität: Ist und Soll-Werte des eingebauten Schüttguts und anhängige Filterschlitzweiten
- Bohrlochabweichungen
- Auswahl des Entsandungsverfahrens: Nebenwirkungen wie Schüttgutumlagerungen, Schüttgutvermischung und Schüttgutzertrümmerung vermeiden
- Reichweite der Entsandungsverfahren: in einfacher Kiesschüttung bis max. 100 mm
- Ungleichförmigkeitsfaktor des Sediments:  $c_U$
- Dreidimensionalität der Schüttgutlagerung (5.3.1.1)
- Filterfaktoren höherer Ordnung
- Brunnenalterung

Des Weiteren betont Paul (2017) die Notwendigkeit der Skinentfernung vor dem eigentlichen Entsanden, falls Spülbohrverfahren zur Herstellung des Brunnens eingesetzt wurden. Dafür wird zuerst der Eintrittswiderstand in die Bohraureole gemessen (Beobachtungsrohr/Peilrohr). Ist dieser sehr hoch, so ist der genehmigungspflichtige Einsatz von Spülungsbrechern vorzusehen.

### 7.2.7.1 Kontrolle und Messung

Je nach Zweck können unterschiedliche Methoden zur Messung des Feststoffanteils im Wasser verwendet werden. Die DVGW W 119 (2002) bevorzugt zur zuverlässigen und genauen Messung des Sandgehalts ein Sandmengenmessgerät, im Zusammenhang mit einer Bauwerksabnahme ist es aber auf jeden Fall einzusetzen. Der Sandgehalt wird dann entweder im Hauptstrom meist aber im Teilstrom gemessen. Man unterscheidet das Verfahren der Nass- und/oder Trockenmessung. Ersteres wird zur überschlägigen Ermittlung des Sandgehalts während der Entsandungsmaßnahme eingesetzt. Dabei wird das Sand-Wasser-Gemisch vom Auffangbehälter in ein Spitzglas (Imhofftrichter) gefüllt und nach dem Absetzvorgang das Feststoffvolumen abgelesen. Zweiteres wird bei der Abnahme des Brunnenbauwerks durchgeführt. Dabei wird der abgesetzte Sand aus dem Spitzglas im Trockenschrank bei 105°C getrocknet und anschließend gewogen. Folgende Messmethoden sind grundsätzlich laut DVGW W 119 (2002) möglich:

- Eimer
- Sandmengenmessbehälter
- Sandmengenmessgerät (mobil oder stationär)

Die Entsandung in einem Abschnitt soll beendet werden, wenn eine von drei Bedingungen erfüllt ist:

- Der Sandgehalt im Entsandungsabschnitt unterschreitet den 10 fachen Wert des geforderten Restsandgehaltes bei 5 facher Anströmgeschwindigkeit.

- Der geforderte Restsandgehalt wird nicht unterschritten, jedoch lässt eine Fortführung der Entsandung in diesem Abschnitt keinen Entsandungsfortschritt mehr erwarten.
- Schäden am Bauwerk sind zu erwarten oder treten bereits auf.

Die folgende Tabelle 7.4 zeigt Richtwerte, die laut DVGW W 119 (2002) im Hinblick auf die Bauabnahme an den Brunnen gestellt werden:

Tabelle 7.4: Richtwerte Restsandgehalt

Anforderungen an den Brunnen		Feststoffgehalt bei Pumpen nach längerer Förderdauer	Feststoffgehalt kurz nach dem Einschalten der Pumpe beim Schocken
Klasse	Restsandgehalt [g/m <sup>3</sup> ]	[ml/m <sup>3</sup> ]	[ml/m <sup>3</sup> ]
Hoch	<0,01	0,1	1,0
Mittel	<0,1	1,0	10,0
Gering	<0,3	2,0	20,2

Eine sorgfältige Dokumentation der Entsandungsmaßnahmen laut DVGW W 119 (2002) ist Teil der Brunnendokumentation. Sie ist nicht nur im Hinblick auf die Bauwerksabnahme zu beachten, zumal die Dokumentation bei Entsandungsmaßnahmen auch der Beleg für die Abrechnung der Leistung ist.

Ziel der Brunnenentwicklung ist es, durch geeignete Verfahren einen Idealzustand für die Inbetriebnahme eines neu errichteten Brunnens herzustellen.

### 7.2.8 Fehler und Mängel in der Ausführung

In der Regel arbeiten qualifizierte Brunnenbauunternehmen so gut, wie es die Planung vorgibt. Wenn es doch Missachtungen der Regeln des Brunnenbaus gibt, dann werden diese oft erst durch die nachlässige Führung durch die Bauleitung ermöglicht. Dabei ist unrichtiges Verhalten bei unerwarteten Ereignissen eher ein Grund, die Regeln zu missachten, als Nachlässigkeit und Bequemlichkeit. Trotzdem werden die meisten Verstöße gegen die Sorgfaltspflicht im Brunnenbau von den ausführenden Unternehmen begangen (Conrad, 2010).

#### 7.2.8.1 Ursachen

Grundsätzlich taucht eine schlechte Bohrung in fast allen Fehlerdiagnostiken auf, weil sie die häufigste Ursache für entscheidende Ausbaumängel ist. Die Voraussetzung für eine problemlose Nutzung einer Bohrung ist eine gute Bohrlochgeometrie. Daher sollte sie vor Beginn der Ausbaurbeiten, am besten mittels geophysikalischen Methoden, kontrolliert werden (Tholen & Baumann, 2002).

Die Ursachen für eine schlechte Bohrung wiederum sind unter anderem bei der unrichtigen Wahl von Ausrüstung und Materialien, beim unrichtigen Verhalten bei Vortriebsproblemen und bei einer fehlenden oder unrichtigen Risikobeurteilung zu sehen (Conrad, 2010).

Eine weitere Ursache für viele Mängel und Fehler ist die Kolmation. Zudem wird die als Ursache mangelnder Ergiebigkeit oft selten erkannt, da es theoretisch viele Fehler in der Bauausführung gibt, die Ursache dafür sein könnten. Laut Tholen & Baumann (2002) ist es aber meist eine »Angstschüttung« hinter den Filterrohren, die einen zu geringen Porenraum bedingt, auf welchem wiederum eine schnellere Alterung basiert. Auch Paul (2017) spricht dieses Thema

in seiner Arbeit an. Problematisch in diesem Hinblick ist, dass der Brunnenbauer im Bezug auf eine mögliche Sandführung, nur die technische Sandfreiheit im Betrieb nach DIN 18302 gewährleisten muss.

Zusammenfassend lässt sich als Wurzel allen Übels oft eine der folgenden Faktoren ermitteln: eine ungenügende Brunnenentwicklung und Nichtberücksichtigung hydraulischer Anforderungen, wie Absenkung, Eintrittsverluste, Granulometrie und/oder Durchlässigkeit des Grundwasserleiters.

### 7.2.8.2 Fehler

Wie aus dem vorigen Kapitel schon absehbar ist, ist es äußerst schwierig zwischen Fehlern und Ursachen zu unterscheiden. Tholen & Baumann (2002) bringen das Beispiel des Fehlers, eine Spülbohrung mit stumpfem Werkzeug und unzulässig hohem Andruck abzuteufen, der gleichzeitig aber die Ursache für eine »krumme Bohrung« ist. Der Fehler, eine schiefe Bohrung abgeteuft zu haben, ist gleichzeitig Ursache für einen unregelmäßigen Ringraum. Dieser Fehler kann wiederum Ursache für eine undichte Sperrschicht oder unzulässig hohe Sandführung sein.

Man muss laut Tholen & Baumann (2002) also vielmehr von Fehler- bzw. Ursachenketten sprechen, die bei einem Schadensbild bei der Bauwerksabnahme bzw. im Brunnenbetrieb beginnen. Solche Schadensbilder und ihre weiterführenden Fehler sind nach Tholen & Baumann (2002) zum Beispiel:

- Krumme und schiefe Bohrlöcher: Bei Kiesschüttungen ergeben sich dabei unregelmäßige Ringräume, welche dann zu einer unregelmäßigen Kiesschüttung führen. Eine gleichmäßige Kiesschüttung ist aber Voraussetzung für eine optimale Brunnenentwicklung.
- Kolmationen: Sie sind, wie bereits erwähnt, oft die Ursache für eine bei weitem nicht den Berechnungen entsprechende Ergiebigkeit des Brunnens. Dabei bedingt der minimierte Porenraum im Filterkies und Stützkörper nicht nur den geringeren Zufluss zum Brunnen, sondern beschleunigt auch die Brunnenalterung, da Speicherraum für etwaige Ablagerungen fehlt. Es kommt in weiterer Folge zu höheren Zuflussgeschwindigkeiten, die den Eintrittswiderstand erhöhen. (Abbildung 7.18)
- Erhöhte Sandführung: Sand kann im Brunnenbetrieb Fördereinrichtungen zerstören, Armaturen unbrauchbar machen und Aufbereitungsanlagen verstopfen. Allerdings sollte die Höhe des geforderten Restsandgehalts mit den Betriebsbedingungen abgestimmt werden, da eine Minimierung des Restsandgehalts mit einer Erhöhung der Filterwirkung einhergeht, was wiederum eine schnellere Brunnenalterung bevorzugen kann.
- Wasserchemismus: Probleme mit der Qualität des geförderten Wassers treten oft erst nach Fertigstellung des Brunnens auf. Dabei sollte vor allem bei Problemen oder Gefährdung durch geogene Versalzung, eine Berechnung der Gesamtmineralisation des Porenwassers im offenen Bohrloch noch vor dem Brunnenausbau durchgeführt werden.

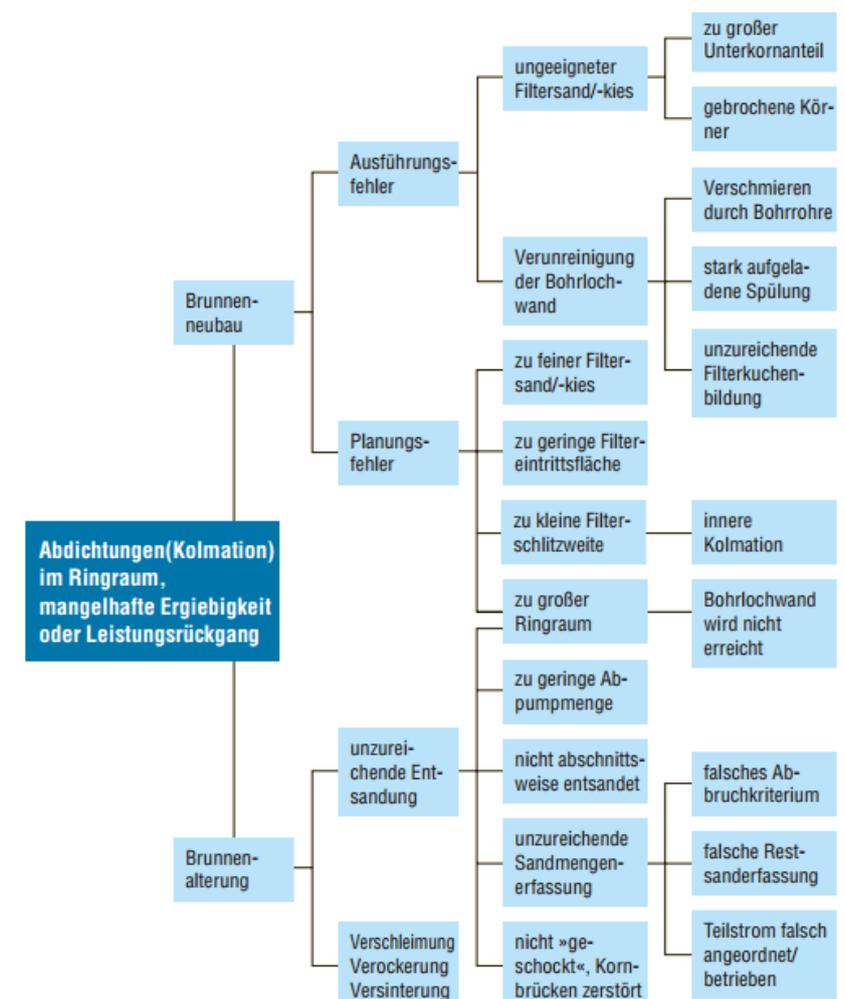


Abbildung 7.18: Fehler-Ursachen-Diagramm Kolmation (aus Tholen & Baumann, 2002)

Es lässt sich feststellen, dass sich diese Fehler-Ursachenketten zwangsläufig verzweigen, da verschiedene Fehler die Ursache für einen Mangel in der Bauausführung darstellen können. Man kann beispielhaft für einzelne Schadensfälle Diagramme erstellen (Beispiel Kolmation Abbildung 7.18), die dann beliebig erweitert werden können. Vollständig sind diese Diagramme aber vermutlich nie.

Bei der Herstellung der Diagramme wird jedoch die Wichtigkeit der Baudokumentation klar. Viele Fehler kann man im Nachhinein nur durch eine lückenlose Dokumentation der Planungs- und Bauarbeiten aufdecken. Zudem trägt eine ordentliche Dokumentation zur Vermeidung von Fehlern bei. Darüber hinaus sollte sich der Bauunternehmer dazu verpflichtet sehen, seine Ausrüstung so zu wählen, dass alle denkbaren Schwierigkeiten des Untergrundes überwunden werden können und er zudem erfahrenes Brunnenbaupersonal einsetzt, das alle fassungsrelevanten Probleme rechtzeitig erkennt und meldet. Laut Conrad (2010) sind diese Voraussetzungen trotz Zertifizierung der Planer, Ingenieure und Unternehmer nach ISO 9000 und anderen Qualitätsmanagementsystemen in der Praxis leider noch immer nicht selbstverständlich.

Laut ÖNORM B 2601 (2004) sollte die Dokumentation der Planungs- und Bauarbeiten folgende Punkte beinhalten:

- Dokumentation der Planung samt Grundlagen (7.1.2)
- Bescheide und Verträge
- Erfassung der Bauphasen durch Bautagesberichte (inkl. aller Vorkommnisse und täglichen Wasserspiegelmessungen)
- Erfassung und Beschreibung der angetroffenen Bodenschichten(Fächerkisten) und des Wasserspiegels (Bohrprotokoll)
- Angaben über den Verbleib der Bodenproben
- Angaben über das Herstellungsverfahren (Bohr- und Vortriebsverfahren)
- Angaben über die Ermittlung und die Beschaffung des Filtermaterials
- Angaben über den Ausbau in graphischer Form (Ausbauplan mit Bohrprofil, Lageplan, Lage- und Höhenangaben, Koordinaten, Einbindung in das amtliche Vermessungsnetz)
- Angabe über Ausbaumaterialien und deren Spezifikation
- Angaben über alle weiteren Untersuchungen (geophysikalische Messungen, Wasseranalysen, Videobefahrung)
- Angaben über die Beweissicherung
- Angaben über die Brunnenentwicklung (Art, Vorgang, Umfang und Grad der Entsandung, besonders bei HFB: Angaben über Menge und Beschaffenheit des Spülgutes)
- Angaben über die Durchführung des Brunnentests und Auswertung n schriftlicher und grafischer Form (Qs-Diagramm)
- Angaben über maximal mögliche Entnahme und die zulässige Absenkung des Wasserspiegels
- Technischer Bericht

### **7.2.9 Rechtliche Aspekte – Bauabnahme**

Der Planer bzw. Brunnenbauer ist laut ÖNORM B 2601 (2004) nach der Fertigstellung des Brunnens verpflichtet, einen zusammenfassenden Kurzbericht nach Abbild der Dokumentation als Grundlage für die Brunnenausrüstung und den Betrieb vorzulegen.

Wie zuvor schon angedeutet ist das maßgebende Werkzeug im Zuge der Abnahme (Kollaudation) der Leistungspumpversuch (Conrad, 2010), welcher bis zum Beharrungszustand bei einer bestimmten, in der Regel vorgegebenen Wassermenge durchgeführt wird. Der Beharrungszustand ist der quasistationäre Zustand einer Grundwasserströmung innerhalb des Absenkungsbereichs. Das heißt, dass die Entnahmemenge vollständig durch von weiter außen herbeiströmendem Grundwasser ersetzt wird und der Absenkungsbereich sich somit nicht weiter ausdehnt (Spektrum, 2000). Dabei sollte die Maximalmenge stufenweise angefahren werden und deutlich über der zugelassenen Entnahmemenge liegen. Ein Beispiel für die Ausführung eines Betriebstests zeigt Tabelle 7.5.

Tabelle 7.5: Beispiel Versuchsanordnung Leistungspumpversuch

Stufe	Entnahmemenge [l/s]	Geschätzte Zeit bis Beharrungszustand	Anmerkung
1	100	3 Tage	Beharrungszustand wird über 24 h beobachtet, dann folgt Stufe 2
2	200	5 Tage	Beharrungszustand wird über 24 h beobachtet, dann folgt Stufe 3
3	300	8 Tage	Beobachtung des Beharrungszustandes bei max. Entnahme für 5 Tage, danach Abschalten der Pumpen und Messen der Wiederaufspiegelung im Brunnen und den Sonden
<p><b>Abbruchkriterium:</b> Sollte der Wasserspiegel im Brunnen den tiefsten festgelegten Grundwasserspiegel erreichen und ein weiteres Absinken wahrscheinlich sein, wird die Entnahmemenge auf die vorhergehende Stufe zurückgestellt und das Erreichen des Beharrungszustandes abgewartet. Anschließend wird die Entnahmemenge auf 80% der vorangegangenen zusätzlichen Entnahmemenge gesteigert und wiederum der Beharrungszustand abgewartet. Dieser Vorgang wird wiederholt bis der Beharrungszustand sich über dem festgelegten tiefsten GW-Spiegel einstellt.</p>			

Ziel des Betriebstests sollte jedenfalls das Erstellen einer Leistungskurve (Q-s-Kurve) sein, welche die Brunnencharakteristik zum Zeitpunkt der Herstellung widerspiegelt. Diese gibt Hinweise auf den optimalen und maximalen Betriebspunkt und hilft, eine standortgerechte Dimensionierung zu überprüfen. Ohne eine solche Kurve sind später keine Aussagen zum aktuellen Alterungsgrad und Erfolg von Regenerierungsmaßnahmen zu treffen. Damit ist der Leistungspumpversuch eine wichtige Grundlage für alle späteren Überlegungen zu Betriebsweise, Brunnenalterung, Werterhaltung, Regenerierungs- und Sanierungsbedarf. Deswegen sollte er laut Conrad (2010) unbedingt als Belastungsprobe ausgelegt werden. Der Leistungspumpversuch gilt laut WRG (1959) als vorübergehender Eingriff in den Wasserhaushalt und kann einer zusätzlichen Bewilligung bedürfen, wenn öffentliche Interessen und fremde Rechte nachteilig beeinflusst werden.

Die Überprüfung eines Brunnens nach seiner Herstellung auf Mängelfreiheit durch betriebstechnische, geophysikalische und fernsehtchnische Untersuchungen sollte eigentlich selbstverständlich sein und wird in allen Arbeits- und Merkblättern gefordert, garantiert sie doch dem Bauherrn auf der einen Seite, dass der Brunnen weitestgehend fehlerfrei erstellt wurde, und schützt den Brunnenbauer auf der anderen Seite vor ungerechtfertigten Ansprüchen (Tholen & Baumann, 2002). Zusätzlich gibt es in Österreich den Begriff des echten oder unechten Baugrundrisikos. Dieses besteht, wenn die Boden- und Grundwasserverhältnisse nicht ausreichend geklärt wurden oder die Ausschreibung mangelhaft war, aber seitens des Auftragnehmers keine Bedenken geäußert wurden. In diesem Fall kann der Auftragnehmer für die Folgekosten bei der Verwirklichung von Baugrundrisiken haften.

Grundsätzlich untersucht die abschließende wasserrechtliche Überprüfung in Österreich schlichtweg, ob die errichtete Anlage mit der Bewilligung übereinstimmt. Ist das nicht der Fall, kann ein Auftrag zur Beseitigung der Mängel erteilt werden. Geringfügige Abweichungen können allerdings nach § 121 WRG nachträglich genehmigt werden. Die Ausführung einer bewilligten Wasseranlage unterliegt damit der behördlicher Aufsicht, genauso wie ihr Bestand

und Betrieb (§§ 130 ff). Den wasserberechtigten Bauherrn selbst treffen insbesondere die Sorgfaltspflicht (§ 31), die Bewilligungspflichten (insb §§ 9, 10, 32), die Instandhaltungspflicht (§ 50), die Überwachungspflicht (§ 134), die Pflicht zur Beachtung aller Vorschriften (§§ 137 und 138), die Haftung (§ 26) und gegebenenfalls die Verpflichtung zur Datenlieferung (§§ 59 ff). Dabei besagt die Instandhaltungspflicht beispielsweise, dass der Wasserberechtigte seine Wasserbenutzungsanlagen stets in dem der Bewilligung entsprechenden Zustand zu erhalten hat.

Kleinere Brunnenbauvorhaben können laut § 121 sogenannte bewilligungspflichtigen Anlagen, die keine besondere Bedeutung haben, sein, d.h. sie beeinflussen keine fremde Rechte nachteilig und betreffen öffentliche Interessen nur geringfügig. Die Behörde kann in diesem Fall nach Abschluss der Arbeiten eine Ausführungsanzeige stellen. Diese ist nach Abs.4 eine Bestätigung über die bewilligungsgemäße und fachtechnische Ausführung der Wasseranlage, die von einem gewerberechtlich oder nach dem Ziviltechnikergesetz (1993) Befugten des einschlägigen Fachbereichs, der an der Ausführung der Anlage nicht beteiligt war, ausgestellt wird. Der Ziviltechniker hat zudem geringfügige Abweichungen und deren Ausführung nach wasserrechtlichen Vorschriften zu bestätigen.

Das Ergebnis der Überprüfung durch die Behörde wird jedenfalls durch einen Bescheid erlassen.

## 7.3 Betrieb

Dieses Kapitel widmet sich den betriebsbeeinflussenden Faktoren, dem Management und den auftretenden Brunnenalterungserscheinungen.

### 7.3.1 Brunnenbewirtschaftung

Laut Houben & Treskatis (2003) orientiert sich der Brunnenbetrieb meist an Leistungsvorgaben, während hydrogeologische und hydrochemische Standorteigenschaften sowie jeweilige technische Anforderungen des Bauwerks eher eine untergeordnete Rolle spielen. Je nach Einsatzgebiet eines HFB richtet sich sein Betrieb nach unterschiedlichen Einflussgrößen. Meist ist der Betrieb der Pumpen auf eine minimal oder maximal erreichte Absenkung eingestellt und automatisch geregelt. Beispiele aus Daffner, Hüper, Scheppat-Rosenkranz, *et al.*, (2010) sind die „Altmarkt Galerie“ mit einfacher Ein- und Ausschaltung der Pumpen, oder frequenzgesteuerte Pumpen im Brunnen „Hoyerswerda“. Der Wasserbedarf eines Tages variiert je nach Tages- oder Nachtzeit. Dies führt, besonders bei knapper Behälterkapazität, zu einer unregelmäßigen, intermittierenden Entnahme. Die meist unterschiedlichen Stromkosten für Tag- und Nachtbetrieb bewirken demnach eine Konzentration des Pumpbetriebs zu preisgünstigen Zeiten. Des Weiteren sind die Pumpaggregate meist nur auf einen engen Betriebsbereich mit gutem Wirkungsgrad ausgelegt (Conrad, 2010). Es ist ersichtlich, dass das Hauptaugenmerk im Brunnenbetrieb auf einer preisgünstigen Wasserentnahme liegt. Conrad (2010) kommt zur Schlussfolgerung, dass sich die meisten Grundwasserbrunnen an Vorgaben und Bedürfnissen orientieren, die einem sanften Entnahmeregime entgegen stehen. Er fordert aber genau ein solches, um ein jahrzehntelanges Funktionieren ohne Alterungserscheinungen und Leistungsabfall zu garantieren. Auch Pfeil (2014) kommt in seiner Arbeit zum Schluss, dass eine Erhöhung der Entnahmemenge großen Einfluss auf eine schnellere Brunnenalterung hat. Die Forderung nach einem sanften Entnahmeregime, wie es beispielsweise bei Quellen betrieben wird, wird im Brunnenbau dennoch nicht durchführbar sein. Deshalb betonen Conrad (2010) und Houben & Treskatis (2003) den fachmännischen Unterhalt, nicht nur der Pumpen, Leitungen, Armaturen, Steuerungen, Reservoirs und Behälter aller Art, sondern vor allem der Brunnen selbst. Hier wird die Problematik der Phrase „aus den Augen aus dem Sinn“ deutlich. Denn ein Brunnen, der jahrelang störungsfrei arbeitet, wird selten einer Wartung unterzogen.

Laut Streußloff und Steinbrecher (zit. in Wicklein & Steußloff, 2006) ist der Beginn des Brunnenbetriebes gleichzeitig der Beginn der Brunnenalterung. Die wichtigsten Beurteilungskriterien für den Brunnenzustand, die während des Brunnenbetriebs erfassbar sind, umfassen: die spezifische Ergiebigkeit  $Q_E$ , den Restsandgehalt und die Rohwasserbeschaffenheit (Treskatis, Volgnandt, Wessollek, *et al.*, 1998). Die Brunnenalterung ist definiert durch die Abnahme der Ergiebigkeit mit der Zeit, entweder am Grundwasserleiter oder am Brunnen, und zeigt sich durch unterschiedliche Alterungserscheinungen. In vielen Fällen ist die Alterung aufgrund der standortbedingten naturgegebenen Randbedingungen unvermeidbar, aber durch methodisches Vorgehen während Wartung und Betrieb minimierbar.

Houben & Treskatis (2003) schlagen die Errichtung eines individuellen Brunnenmanagements vor, welches sowohl die Standorteigenschaften, als auch die jeweiligen technischen Anforderungen der Anlage miteinbezieht. Das Management ist gegliedert in Brunnenbetrieb und Brunneninstandhaltung, wobei:

- Brunnenbetrieb: beinhaltet alle Handlungen, die mit der Grundwasserentnahme aus dem Brunnen unmittelbar verknüpft sind
- Brunneninstandhaltung: umfasst alle Handlungen zur Erhaltung und Pflege des Brunnens

### 7.3.1.1 Exkurs: Zertifizierung Brunnenmeister

Für die Brunnenbewirtschaftung unerlässlich sind kompetente Brunneninhaber oder deren Mitarbeiter. Aus diesem Grund und bezogen auf die oben genannten Probleme mit der Zertifizierung von Beteiligten im Brunnenbau wird in diesem Abschnitt die Ausbildung des Wassermeisters nach ÖVGW Zertifizierung kurz näher betrachtet.

Grundsätzlich trägt der Betreiber von Wasserversorgungsanlagen die Verantwortung für diese und muss sicherstellen, dass Personen, denen bestimmte Aufgaben übertragen werden, ausreichend qualifiziert sind. Die ÖVGW ist vom Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft bevollmächtigt die Zertifizierung zum Wassermeister durchzuführen.

Das Wassermeisterzertifikat garantiert dann, dass der Zertifikatsinhaber das für den Betrieb, die Instandhaltung und Wartung von Trinkwasserversorgungsanlagen erforderliche aktuelle Wissen erworben hat und im Falle einer fachspezifischen Anstellung bei einem Wasserversorgungsunternehmen die damit verbundenen Arbeiten fachgerecht durchführen kann (ÖVGW W 10/1, 2017). Die behandelten Themen reichen unter anderem von der Gewinnung des Wassers, über Wasser und seine Eigenschaften, die Sicherung der Trinkwasserqualität, Armaturen und Einbauten, Gesetze und Verordnungen sowie die Abwicklung von Bauvorhaben bis hin zur Öffentlichkeitsarbeit.

Zur Zertifizierung zugelassen, sind alle Personen, die ein aufrechtes fachspezifisches Beschäftigungsverhältnis in einer Wasserversorgungsanlage haben und eine der folgenden Kriterien erfüllen:

- abgeschlossene Ausbildung als Installateur, Abschluss einer einschlägigen (technischen) berufsbildenden höheren Schule, Abschluss einer einschlägigen (technischen) Fachhochschule oder Universitätsabschluss sowie mind. 3 Monate Praxiserfahrung in einem Wasserversorgungsunternehmen (WVU)
- abgeschlossene Ausbildung als Elektriker oder im Bereich metallverarbeitende Berufe, Abschluss einer berufsbildenden höheren Schule oder einer nicht facheinschlägigen Fachhochschule sowie mind. 6 Monate Praxiserfahrung in einem WVU
- Zertifikatswerber mit anderer (nicht facheinschlägiger) abgeschlossener Berufsausbildung oder ohne abgeschlossene Berufsausbildung, wenn sie 9 Monaten Praxiserfahrung in einem WVU nachweisen und an einem Vorbereitungskurs teilnehmen. (ÖVGW W 10/1, 2017)

Zusätzlich ist es interessierten Fachleuten möglich, die Prüfung zum Wassermeister abzulegen, wenn sie regelmäßig Aufträge von Wasserversorgungsunternehmen annehmen und bearbeiten oder von der ÖVGW zertifizierte Produkte für die Wasserversorgung produzieren.

Für eine erstmalige Zertifizierung müssen die Bewerber eine schriftliche Erstprüfung absolvieren. Ein Zertifikat wird nur ausgestellt, wenn der Prüfungskandidat mindestens 9 von 16 Punkten erreicht hat. Überprüft werden die Bereiche Wasserqualität sowie Wassergewinnung, Rohrleitungen, Recht und Wasserspeicherung, Wasserverteilung, Verwaltungsaufgaben und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Zertifikate sind grundsätzlich 5 Jahre gültig. Der zertifizierte Wassermeister ist jedoch verpflichtet, den Stand der Technik in der Wasserversorgung, im Rahmen seiner beruflichen Tätigkeiten auf alle Fälle umzusetzen und zu fördern. Außerdem ist die Teilnahme an einschlägigen Fachveranstaltungen nötig, um das Wissen zu vervollständigen und auf dem neuesten Stand zu halten. Genauer müssen Veranstaltungen/Schulungen zu mindestens 45 Punkten absolviert werden, wobei eine Veranstaltung 15-20 Punkte wert ist. Zwischen den besuchten Schulungen müssen weniger als 2 Jahre liegen.

Um die Geltungsdauer des Zertifikats nach 5 Jahren zu verlängern, müssen nachweislich Fortbildungen, wie oben beschrieben, absolviert worden sein und der Bewerber muss eine Verlängerungsprüfung ablegen. Diese besteht aus einem Multiple-Choice-Test mit 15 Fragen, wobei mehr als die Hälfte der Fragen richtig beantwortet werden muss. Prüfungsrelevant sind Fragen von fachspezifischen Neuerungen der letzten fünf Jahre, welche auch Inhalt eines Skriptums sind.

Zusätzlich zu den genannten Überprüfungsverfahren erhalten Zertifikatsinhaber gelegentlich einen Fragebogen, den sie ausgefüllt an die ÖVGW Zertifizierungsstelle zurücksenden müssen. Dieser dient der Evaluierung des Wissensstandes und als Nachweis der Kompetenz.

Wird den oben genannten Überprüfungsverfahren in Eigeninitiative nicht rechtzeitig nachgegangen, bzw. werden Beschwerden gegen den Zertifikatsinhaber, auf Grund von missbräuchlicher Verwendung des Zertifikats oder Umständen, die der Zulassung widersprechen, laut, so fordert die ÖVGW den Betroffenen auf, die Mängel abzustellen. Tut er das nicht, wird das Zertifikat entzogen und der Betroffene aus dem Verzeichnis gelöscht.

### **7.3.1.2 Brunnenbetrieb**

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Für den Betrieb des Brunnens ist die Erfassung individueller betrieblicher Daten und Funktionen, durch Sichtprüfungen, Funktionsprüfungen und regelmäßige und konsequente Erfassung der Betriebsdaten, grundlegend, denn eine zuverlässige Diagnose von Anomalien oder Defekten im Betrieb ist nur durch eine regelmäßige und nachvollziehbare Erhebung der Betriebsdaten möglich. Dafür sollten die Betriebsdaten in einer Brunnenakte oder einem Brunnencheckheft abgelegt sein. Die Brunnenakte sollte schließlich laut Tholen (2012) aus folgenden 5 Teilen bestehen: Genehmigungsunterlagen, Brunnenbauakte, technische Ausrüstung des Brunnens, einschließlich Betriebsanweisung, Brunnenüberwachungsplan und Maßnahmen aller Regenerierungs- und Sanierungsmaßnahmen. Abbildung 7.19 zeigt den Aufbau einer Brunnenakte.

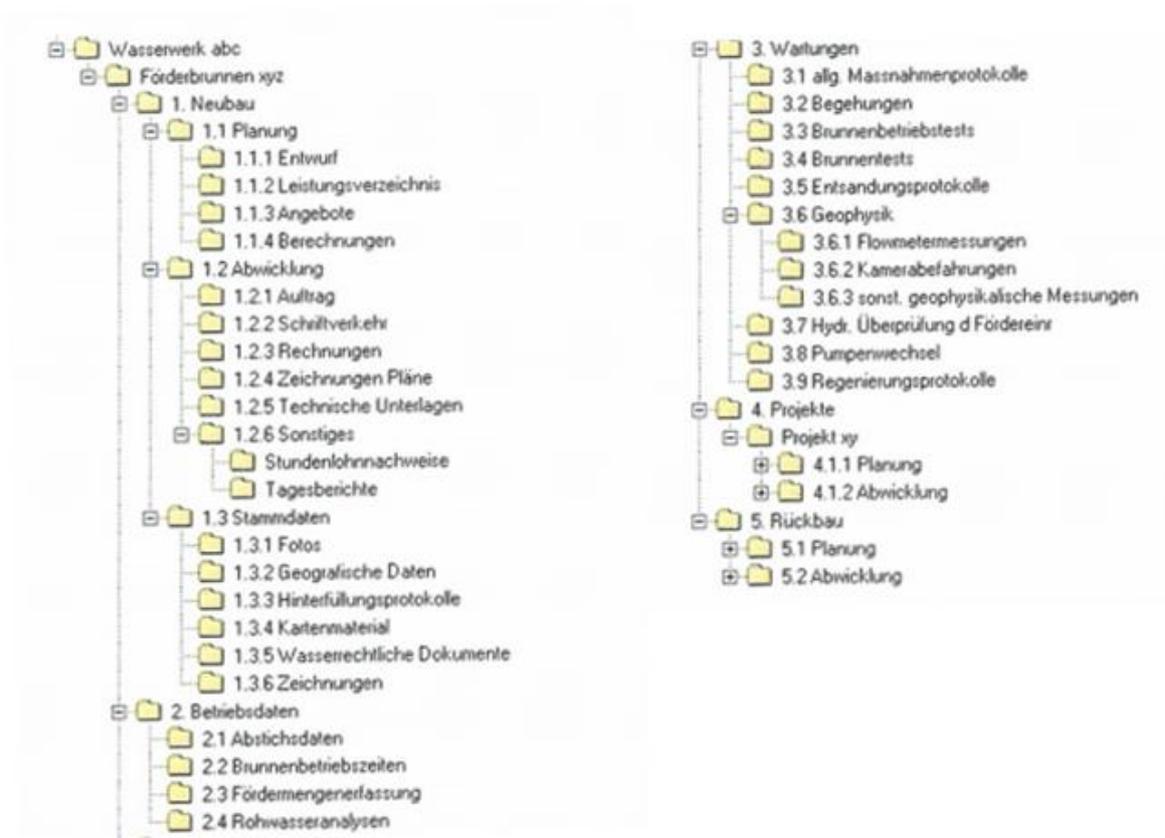


Abbildung 7.19: Aufbau einer Brunnenakte (nach Sander, 2006)

Die wichtigsten Daten, die im Zusammenhang mit der Brunnenalterung erfasst werden sollen, sind Wasserspiegelmessungen im Brunnenrohr und im Peilrohr, sowie Fördermengen in Abhängigkeit von Zeit und Betriebszustands des Brunnens. Aus diesen Parametern berechnet sich schließlich die spezifische Ergiebigkeit des Brunnens.

$$Q_E = \frac{Q}{(RWSP - AWSP)} \quad 7.3$$

wobei

- $Q_E$  ... spezifische Ergiebigkeit [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $Q$  ... geförderte Menge [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $RWSP$ ... Ruhewasserspiegel [m]
- $AWSP$ ... Arbeitswasserspiegel [m]

Zusätzlich sollten der Restsandgehalt und die Rohwasserbeschaffenheit regelmäßig gemessen werden.

Tabelle 7.6. zeigt die verschiedenen Arten der Datenerfassung, ihren Gegenstand, ihr Ziel und ihre Intervalle. Die Prüfintervalle sollten je nach Brunnen individuell festgelegt werden und orientieren sich oft an den Erfahrungen aus dem Betrieb von vergleichbaren Brunnen (Houben & Treskatis, 2003).

Tabelle 7.6: Art, Gegenstand und Ziel der Datenerfassung nach Houben & Treskatis (2003)

Art der betrieblichen Erfassung	Prüfgegenstand	Ziel	Intervall empfohlen
Sichtprüfung	Fassungsumfeld (Schutzzone 1)	Grundwasserschutz	wöchentlich
	Abschlussbauwerk	Funktionstüchtigkeit und GW-Schutz	wöchentlich
	Brunnenausbauten (Filter- und Vollwandrohre)	Bauzustand, Identifizierung von Alterungserscheinungen	halbjährlich bis jährlich
	Fördereinrichtungen		
Funktionsprüfung	Filterrohre	Ermittlung des Alterungszustands, der Eintrittswiderstände, der spez. Brunnenleistung	halbjährlich bis jährlich
	Fördereinrichtung	Pumpenleistung, Stromaufnahme, Dichtigkeit der Steigleitung	jährlich
Betriebsdaten-Erfassung	Wasserstand im Brunnenrohr und Widerstandsfilter	Entwicklung der Absenkung und Funktion der Förderung und der hydrogeologischen Randbedingungen	täglich
	Fördermengen	Wasserrechtliche Auflage und Grundlage zur Ermittlung der spezifischen Leistungsentwicklung	täglich
	Rohwasserbeschaffenheit	Wasserrechtliche Auflage und Grundlage zur Bestimmung der chemischen Einflüsse auf die Brunnenalterung	jährlich
	Betriebsstunden des Brunnens, ggf. Stromaufnahme und Betriebsdruck	Auslastungsgrad des Brunnens, Funktionstüchtigkeit der Fördereinrichtung	täglich

Zusammenfassend können laut Houben & Treskatis (2003) folgende einfache Maßnahmen im Betrieb die Brunnenalterung minimieren:

- Die Pumpenleistung und die Laufzeit der Fördereinrichtung orientieren sich an der Leistungsfähigkeit des Grundwasserleiters und der Brunnenausbauten. Zudem wird häufiges Ein- und Ausschalten der Pumpe vermieden
- Der Betriebswasserspiegel wird nicht bis in die Filterstrecke abgesenkt.
- Der optimale Betriebspunkt des Brunnens wird nicht überschritten.
- Die Betriebsdaten werden durch einen regelmäßige Vergleich mit den Soll-Werten einer qualitativen Trendanalyse unterzogen

### 7.3.1.3 Brunneninstandhaltung

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Brunneninstandhaltung beinhaltet alle Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Ist-Zustands, sowie zur Bewahrung und Wiederherstellung des Soll-Zustands eines Brunnens. Begrifflich unterscheidet man zwischen Inspektion, Wartung und Instandsetzung.

Kontinuierliche Inspektion meint alle regelmäßigen Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Ist-Zustands, z.B.: Messungen. Unter diskontinuierliche Inspektion versteht man alle Planungstätigkeiten rund um die kontinuierliche Inspektion, z.B.: Erstellen eines Ergebnisprotokolls.

Unter Wartung werden sowohl planerische als auch ausführende und kontrollierende Maßnahmen zur Erhaltung und Bewahrung des Sollzustandes verstanden, z.B.: Kamerabefahrung.

Die Instandsetzung schließlich umfasst die Planung, Ausführung und Überprüfung von Maßnahmen zur Wiederherstellung des Sollzustandes, z.B.: Sanierungs- und Regenerierungsmaßnahmen.

Houben & Treskatis (2003) stellen drei verschiedene Instandhaltungsstrategien vor, die je nach Zeitpunkt und Arbeitsaufwand unterschieden werden in:

- Vorbeugende, zustandsorientierte und intervallabhängige Instandhaltungsmaßnahmen
- Schadensorientierte Instandhaltung
- Ausfallsorientierte Instandhaltung

Dabei sollte eine effiziente Brunneninstandhaltung die beiden ersten Strategien beinhalten, wohingegen von einer ausfallsorientierten Instandhaltung beim Brunnen abzuraten ist. Bei der Wahl der Strategie ist zudem darauf zu achten, dass viele Brunnen trotz sorgfältiger baulicher Vorkehrungen durch die standortbedingten Eigenschaften des Grundwasserleiters zu Alterungserscheinungen neigen. Wurden diese nur ungenügend untersucht, so gestaltet sich das Betriebsmanagement schwierig, da Instandhaltungsmaßnahmen nur schwer abgeschätzt werden können. Dies ist abermals Beweis für die Wichtigkeit einer lückenfreien Dokumentation im gesamten Lebenszyklus des Brunnens. Die DVGW W 125 (2004) liefert ein Regelwerk für die Instandhaltung von Brunnen, dennoch beruhen die praktizierten Instandhaltungsmaßnahmen laut Houben & Treskatis (2003) meist auf Erfahrungen und gebräuchlichen Praktiken der Betreiber, die sich an den verfügbaren personellen, technischen und wirtschaftlichen Ressourcen sowie der Art und Ausstattung der Instandhaltungstechnik orientieren. Conrad (2010) verweist darauf, dass in der Qualitätssicherung von Wasserversorgern auf die Fassung selbst oft vergessen wird, weil der Brunnen „eh seit 30 Jahren Wasser gibt“, obwohl die Werterhaltung des Brunnens aufgrund der hohen Investitionskosten und der aufwändigen Bewilligungsverfahren durchaus anzustreben wäre.

Die geplanten Instandhaltungsmaßnahmen sollten in Form eines Wartungsplans, der an die Besonderheiten des jeweiligen Brunnens angepasst ist, in die Brunnenakte oder das Brunnencheckheft mit aufgenommen werden.

Ziel der Brunneninstandhaltung ist die Aufrechterhaltung von Funktion und Leistung des Brunnens, sowie das Verzögern des Alterungsprozesses. Das wichtigste Werkzeug hierfür ist das frühzeitige Erkennen und Beheben von Leistungsrückgängen. Mögliche Auslöser dafür, sogenannte Alterungserscheinungen, sind Korrosion an den baulichen oder fördertechnischen Anlagen, Kolmationen, Bildung von Inkrustationen durch hydrochemische oder mikrobiologische Prozesse, Versagen der Fördereinrichtung und nachlassende Ergiebigkeit des Grundwasserleiters durch Überbewirtschaftung oder Veränderung des einzugsgebietsbezogenen Wasserhaushalts.

Es gilt darauf hinzuweisen, dass Alterungserscheinungen auf jeden Fall zu einer mehr oder weniger schnellen Leistungsabnahme des Brunnens führen. Bei ausbleibenden Instandhaltungsmaßnahmen kann dies zu einem Versagen des Brunnens führen.

### 7.3.2 Monitoring

Brunnenbetrieb und Instandhaltung sollten durch ein umfassendes Datenmonitoring begleitet werden. Wie zuvor mehrmals erwähnt, hängt die Leistungsfähigkeit des Brunnens von der Bemessung, Bauart, pumpentechnischen Ausrüstung der Fassung als auch von den hydraulischen und hydrochemischen Eigenschaften des Untergrundes ab, sodass der Begriff Brunnenmonitoring alle diese Bereiche abdecken sollte. Dies geschieht laut Houben & Treskatis (2003) im quantitativen, qualitativen und konstruktiven Brunnenmonitoring, welches systematisch aufzeichnen sollte, um zeitliche Entwicklungen der Daten und Parameter, sowie interne und externe Systemzusammenhänge sichtbar zu machen.

Das **quantitative Brunnenmonitoring** beschäftigt sich mit der Ergiebigkeit des Grundwasserleiters und der Leistungsfähigkeit des Brunnens. Informationen dafür werden zum einen durch die Beobachtung der zeitlichen Entwicklung der Absenkung im Brunnen und der dazugehörigen Entnahmemenge gesammelt. Grundwassermessstellen im Absenkungsbereich des Brunnens liefern zusätzliche Informationen über die Wasserstands-Entwicklung und die hydrogeologischen Zustände im Brunnenumfeld. Das wichtigste Instrument ist aber der Leistungspumpversuch, oder, in diesem Lebensabschnitt, der Betriebstest. Für die Abschätzung der Brunnenalterung ist vor allem der Vergleich mit den Neubaudaten aus dem Abnahmepumpversuch interessant. Um den Betriebstest mit Nachfolgenden zu vergleichen, ist außerdem auf einen gleichen Versuchsaufbau zu achten.

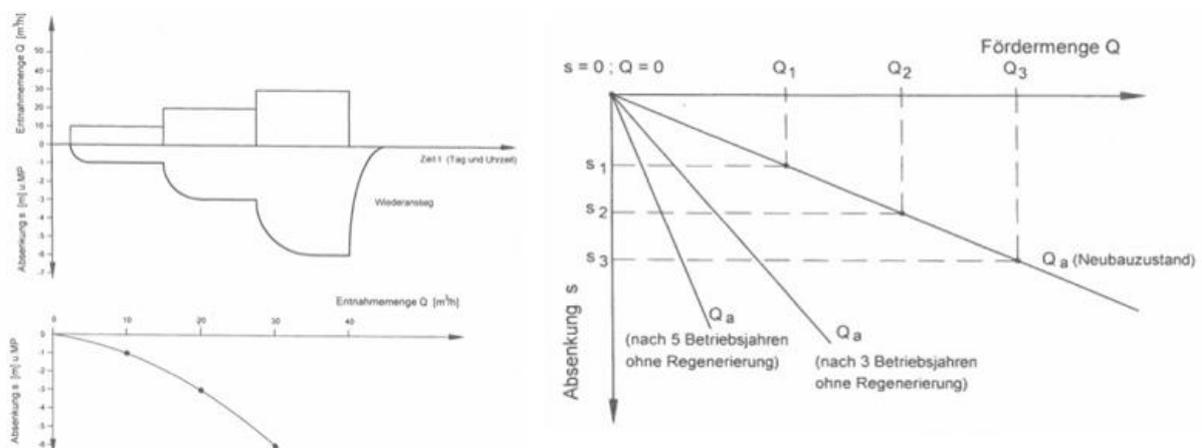


Abbildung 7.20: Ganglinie eines mehrstufigen Pumpversuchs und dazugehöriges Leistungsdiagramm (nach DVGW W 111) und Entwicklung der Leistung über die Betriebsjahre (aus Houben & Treskatis, 2003)

Brunnenalterungserscheinungen, insbesondere Inkrustationen haben Einfluss auf die hydraulische Durchlässigkeit des Brunnens und können die Auswertung von Pumpversuchen verfälschen (Houben & Treskatis, 2003; Houben, 2017). Die Inkrustationen erhöhen den Eintrittswiderstand, was wiederum eine größere Absenkung bedingt. Da Pumpversuche hauptsächlich die Absenkung analysieren, ergeben sich schwerwiegende Fehler in der Betrachtung, wenn die durch Alterungserscheinungen bedingte Absenkung nicht berücksichtigt wird.

Houben & Treskatis (2003) schlagen folgenden Ablauf für den Pumpversuch während des laufenden Betriebs des Brunnens vor:

- Ausschaltung des Brunnens und ev. direkter Nachbarfassungen
- Ablesen des Wassermengenzählers
- Beobachtung und Messung des Wiederanstiegs (10 Minutentakt)
- Nach Erreichen einer Quasibeharrung im Wiederanstieg, Einschalten des Brunnens mit ca. 1/3 der Nennförderleistung der Unterwasserpumpe
- Messung der instationären Absenkung des Wasserspiegels im Brunnenrohr und im Peilrohr im Messtakt nach DVGW W 111 (1997)
- Steigerung der Entnahme auf 2/3 der Nennförderleistung, Ablesung des Wassermengenzählers, Messung des Wasserspiegels im Messtakt nach DVGW W 111 (1997)
- Steigerung der Entnahme auf die Nennförderleistung, Ablesung des Wassermengenzählers, Messung des Wasserspiegels im Messtakt nach DVGW W 111 (1997)
- Wiederanstiegsmessung nach Pumpenstopp

Für den Fall, dass die Pumpen im regelmäßigen Betrieb gefahren werden, ist es oft nicht möglich diese abzuschalten, um einen Betriebstest nach obigem Ablauf durchzuführen. In dieser Situation kommt der Betrachtung des Monitoring erhöhte Aufmerksamkeit zu. Misstear, Banks & Clark (2007) empfehlen den Vergleich gemessener Wasserstände und Entnahmeraten mit den Prognostizierten aus dem Abnahmepumpversuch. Außerdem meinen sie, dass die Änderung der Leistung in Abhängigkeit von der Entwicklung der Absenkung unter Umständen als Ersatz für die spezifische Brunnenergiebigkeit verwendet werden kann.

Ein Rückgang der Brunnenergiebigkeit basiert oft auch auf defekten Pumpen. Werden bei der Sichtprüfung Indikatoren für Korrosion, Inkrustationen oder Biofouling am Leitwerk festgestellt, so hat die Pumpe oft dieselben Probleme. Ein Monitoring Programm zur Evaluierung der Pumpleistung sollte laut Misstear, Banks & Clark (2007) das Verhältnis zwischen Entnahmemenge und dynamischer Förderhöhe, das „wire to water“- Verhältnis und die Haltedruckhöhe enthalten.

Das sogenannte „wire to water-Verhältnis“, nach Driscoll (1989, zit in Houben & Treskatis, 2003) bestimmt den Energieverbrauch der Pumpe als Funktion der Fördermenge und Förderhöhe wie folgt:

$$WW = \frac{WHP \text{ (Energiebedarf zur Förderung)}}{IHP \text{ (Energieverbrauch h durc h Pumpe)}} = \frac{Q \cdot h \cdot 0,65}{3,956 \cdot P_I} \quad 7.4$$

wobei

- Q ... Fördermenge [l/min]
- H ... Förderhöhe [m], inkl. aller Druckverluste durch Steigleitung etc.
- P<sub>I</sub> ... Energiebedarf in [kW]

Eine Zunahme des Leistungsbedarfs der Brunnenpumpe kann dabei ein Hinweis auf Alterungserscheinungen im Brunnen, im Untergrund oder an der Pumpe selbst sein. Defekte am Pumpengehäuse, an den Laufrädern oder anderen beweglichen Teilen der Pumpe können zum Beispiel durch Verockerung, Sandführung und Kavitation auftreten. Um Kavitationen in der Pumpe zu vermeiden, muss der Wassereintrittsdruck laut Misstear, Banks & Clark (2007) in der Pumpe größer sein, als der vom Hersteller spezifizierte. Die vorhandene Haltedruckhöhe muss also höher sein als die erforderliche.

Die vorhandene Haltedruckhöhe errechnet sich wie folgt:

$$NPSH = H_a + H_S - H_{vp} - H_f \quad 7.5$$

wobei

- NPS ... Haltedruckhöhe
- $H_a$  ... Atmosphärendruck
- $H_S$  ... Zulaufdruck
- $H_{vp}$  ... Wasserdruck
- $H_f$  ... Reibungsverlust

Sollte Kavitation ein Problem sein, reicht es also die Pumpe abzusenken, um  $H$  zu erhöhen, oder die Entnahmerate zu senken. Detaillierte Informationen zum Monitoring der Pumpenleistung gibt die DVGW W 614 (2001).

Das **qualitative Brunnenmonitoring** umfasst hauptsächlich die regelmäßige Entnahme von Wasserproben. Die Anforderungen an die Probenahme hängen von der Art und Nutzung des Wassers und den Anforderungen der zuständigen Behörde ab. Die Trinkwasserverordnung beispielsweise sieht die Analyse der in Kapitel 7.1.1.4 genannten Parameter vor. Die Häufigkeit der Kontrollen richtet sich nach der Menge des abgegebenen Trinkwassers und ergibt routinemäßige Kontrollen zwischen 1-4 Mal im Jahr sowie umfassende Kontrollen mindestens 1 Mal im Jahr ( Anhang TWV, 2017). Misstear, Banks & Clark (2007) schlagen vor, dass die Wasserqualität in der Anfangsphase zumindest monatlich gemessen wird. Danach, wenn sich die Wasserbeschaffenheit über ein Jahr nicht gravierend ändert, schlagen sie vor, das Messintervall auf vier Mal jährlich herabzusetzen. Prinzipiell gilt, je mehr Daten desto besser und genauer kann eine Analyse funktionieren. In diesem Sinne sind Messungen, die über das behördlich geforderte Mindestmaß hinausgehen, natürlich erstrebenswert.

Die Kontrolle der Rohwasserbeschaffenheit liefert aber nicht nur Informationen über den Zustand des Wassers, sondern ist auch Indikator für den Zustand des Brunnens und das Brunnenumfeld. Jede Anomalie der Wasserbeschaffenheit kann auf Fehlfunktionen und/oder hydro-chemische Veränderungen im Grundwasserkörper hinweisen. Wichtige Leitparameter für die Beurteilung von Regenerierungs- oder Sanierungserfordernissen laut Houben & Treskatis (2003) sind in Tabelle 7.7 zusammengefasst.

Tabelle 7.7: Leitparameter zur Beurteilung von Regenerierungs- oder Sanierungserfordernissen

Leitparameter	Mögliche Gründe
$Fe^{2+}$ , $Fe^{3+}$ , $Fe_{gesamt}$	Veränderung des Milieus im Brunnen oder im brunnennahen Grundwasserleiter (z.B.: durch Zusicke- rung stockwerksfremder, sauerstoffreicherer Wasser oder durch Absenkung des Betriebswasserspiegels in die Filterstrecke)
Mangan	Veränderung des Milieus im Brunnen oder im brunnennahen Grundwasserleiter (z.B.: durch Zusicke- rung stockwerksfremder, sauerstoffreicherer Wasser oder durch Absenkung des Betriebswasserspiegels in die Filterstrecke)
pH-Wert	Veränderung des Milieus im Brunnen oder im brunnennahen Grundwasserleiter

Hydrogenkarbonat	Veränderung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts im Brunnen oder im Grundwasserleiter (z.B.: durch Druckverluste und dadurch ausgelöste Entgasungsprozesse, Zuckering CO <sub>2</sub> -reicher Wässer, etc.)
Spezifische elektrische Leitfähigkeit	Veränderung im Salzgehalt des Rohwassers z.B.: durch den Eintrag von Düngemitteln, Streusalz, etc.
Temperatur	Veränderung der Herkunft des Wassers, z.B.: durch Uferfiltration oder aus anderen Stockwerken

Zur mikrobiologischen Analyse, insbesondere zur Vorsorge gegen Biofouling, können Proben von Biofilm an leicht zugänglichen Stellen genommen werden. Ist das nicht möglich, so können Glas- bzw. Metallstücke für eine gewisse Zeit in den Brunnen abgesenkt werden und anschließend untersucht werden. Außerdem können Membranfilter oder durchflossene Geräte im Bohrkopf platziert werden, um bakterielle Untersuchungen durchzuführen. Misstear, Banks & Clark (2007) nennen zum Beispiel den Robbins Device oder die Flow Cell. Die Proben können dann mittels Lichtmikroskopie und Aufkeimungsversuchen auf ihre bakteriologische Zusammensetzung untersucht werden. Zusätzlich existieren noch verschiedenste andere Methoden wie beispielsweise die Analyse des TOC oder die Untersuchung durch Röntgenstrahlen oder ICP Analysen (Misstear, Banks & Clark, 2007). Die genannten Methoden können auch bei der Untersuchung der Inkrustationsneigung eines Brunnens angewandt werden (Houben & Treskatis, 2003).

Das **konstruktive Monitoring** bezieht sich auf die unterschiedlichen Materialien, die im Brunnenbau eingesetzt werden. Es überwacht in diesem Sinne die unterschiedlichen Alterungsanfälligkeiten und Verschleißerscheinungen. Das Monitoring sollte in Abhängigkeit der mechanischen, hydraulischen und chemisch-physikalischen Randbedingungen des jeweiligen Brunnens laut Houben & Treskatis (2003) alle 2 Jahre durchgeführt werden. Dabei sollte der Zustand aller Brunnenrohre, Rohrverbindungen, des Filterkieses sowie der Zustand und Öffnungsgrad der Filterstrecke überprüft werden.

Dies erfolgt durch geophysikalische oder optische Methoden, welche Informationen über die physikalischen Eigenschaften des Brunnenausbaus und des dahinter liegenden Untergrundes liefern. Daraus lassen sich Erkenntnisse über die Verteilung der Zuflussmenge, Dichteverteilungen im Ringraum, Wandstärke etc. gewinnen.

### 7.3.3 Brunnenalterung

Der Verlauf der Brunnenalterung zeigt sich durch die fortschreitende Abnahme der Ergiebigkeit eines Brunnens. Dieser Rückgang der Brunnenleistung äußert sich in einer größeren Absenkung des Brunnenwasserspiegels bei gleichbleibender Entnahmemenge, bei Steuerung der Förderleistung über die Vorgabe der Entnahmemenge, oder in einem Rückgang der Entnahmemenge bei gleichbleibender Absenkung, wenn der Betrieb des Brunnens über eine bestimmte Absenkung geregelt wird.

Weitere Anzeichen für die Brunnenalterung sind die Zunahme des Stromverbrauchs der Unterwasserpumpe, die Veränderung der Rohwasserbeschaffenheit oder eine erhöhte Trübstoff- und Feststoff-Fracht (Wiacek, 2005).

Die Firma „cleanwells“ stellt auf ihrer Website ein Berechnungstool zur Mehrkostenberechnung durch Brunnenalterung zur Verfügung. Sie kommen zum Schluss, dass bereits bei einer

Förderleistung von 30 m<sup>3</sup>/h die alterungsbedingte zusätzliche Absenkung mehr als 1,8 m beträgt. Bei 40 m<sup>3</sup>/h nimmt der Druckverlust auf über 3m zu, bei 70 m<sup>3</sup>/h sind von 14,16 m Gesamtabenkung sogar 9,5 m den Eintrittsverlusten zuzurechnen (Tabelle 7.8). Der Eintrittswiderstand, eigentlich der Skin Effekt, steigt infolge der Porenraumreduzierung durch Ablagerungen mit zunehmendem Betriebsalter an. Dadurch ist mehr Energie zur Überwindung des Fließwiderstands im Filterkies und am Weg in die Filterrohre erforderlich. Laut der Firma „cleanwells“ steigt das Wachstum der Beläge, die zur Brunnenalterung beitragen, exponentiell, was unweigerlich auch zu einem exponentiellen Wachstum der Förderkosten führt (aus cleanwells GbR, 2009 – 2017)

Tabelle 7.8: Förderkosten in Abhängigkeit der alterungsbedingten zusätzlichen Absenkung (aus cleanwells GbR, 2009 - 2017, am 20.4.17)

Förderrate Q		Gesamt- absenkung S <sub>gesamt</sub>	Absenkungs- zuwachs Δ s (zur idealen Absenkung)	Alterungs- bedingter Verlustanteil der Gesamt- absenkung	Zusätzliche Hubleistung (berechnet)	Mehrkosten pro Jahr (Förderrate x 0,11 ct pro kWh Strom)
[m <sup>3</sup> /h]	[m <sup>3</sup> /s]	[m]	[m]	[m <sup>3</sup> /h]	[W]	[€]
30	0,0083	3,88	3,88	1,88	220	211,99
45	0,0125	6,35	2,47	3,35	587	565,32
60	0,0167	10,26	3,91	6,26	1462	1408,78
70	0,0194	14,16	3,90	9,51	2591	2496,68

Die DVGW W 130 (2007) nennt schließlich folgende Ursachen, die Brunnenalterung einzeln oder kumulativ auslösen können:

- Versandung
- Korrosion
- Setzungen
- Verockerung
- Versinterung
- Verschleimung
- Aluminiumausfällung

Einige der genannten Prozesse können sich bereits aus Fehlern bei Planung und Bau eines Brunnens ergeben. Dies betrifft vor allem das Versanden, sowie die Korrosion an metallischen Brunnenbauteilen und die Setzungen. Die übrigen Alterungserscheinungen hängen stark vom Brunnenbetrieb und/oder der Rohwasserbeschaffenheit ab.

In einer von der DVGW durchgeführten Umfrage (Niehues, 1999), in der rund die Hälfte der Wasserversorgungsunternehmen Deutschlands teilnahm, wurden folgende Angaben über die prozentuelle Häufigkeit von auftretenden Alterungserscheinungen in Brunnen gemacht: Versandung und Korrosion machen rund 9 % bzw. 4% aus, während 87% auf Inkrustationen zurückzuführen sind. Betrachtet man die Inkrustationen genauer, so ist die häufigste Ursache dafür Verockerung (Houben & Treskatis, 2003). Henkel, Weidner, Roger, *et al.* (2012) messen bei ihren Modellversuchen einen Druckverlust im Kiesfilter durch Verockerung von bis zu 30%.

Nachfolgend wird auf die verschiedenen Ursachen der Brunnenalterung genauer eingegangen.

### 7.3.3.1 Versandung

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Die Versandung ist ein physikalischer Prozess, bei dem sich die hydraulische Durchlässigkeit des Filterkieses oder des Stützkörpers und der Grenzschrift zwischen Grundwasserleiter und Ringraum verändert. Durch die Schleppkraft des Wassers werden Feststoffe aus dem Korngerüst gelöst und in die Nähe des Brunnens transportiert. Die mitgeführten Feststoffe kommen meist aus den Kornfraktionen der Tone, Schluffe und/oder Sande, die abhängig von ihrer Größe und der Eintrittsgeschwindigkeit entweder im Ringraum oder im Innenraum abgelagert werden und über die Pumpen bis in die Aufbereitung gelangen können.

In der Literatur ist man sich einig, dass die Hauptursachen für Versandung zum einen fehlerhaft abgestimmte und bemessene Filterkiesschüttung und Filterschlitzweiten und zum anderen ungenügende Brunnenentwicklung bzw. Entsandung sind.

In der Praxis wird die Ergiebigkeit eines Brunnens nicht sofort durch erhöhte Sandführung beeinflusst. Zu Beginn werden Feststoffe vor allem in den Porenräumen abgelagert, größere durchgängige Porenkanäle sind immer noch frei für den Wassertransport. Erst wenn die Versandung auf sie übergreift, wird die Wassereintrittsfläche in den Brunnen verringert und die Förderleistung sinkt. Das falsch bemessene Verhältnis zwischen Filterkiesschüttung und Filterschlitzweite lässt sich am besten durch Abbildung 7.21 erklären. Sind die Filteröffnungen zu klein, so kommt es zur Kolmation, sind sie zu groß, so kommt es zu einer erhöhten Sandführung im Brunnen.

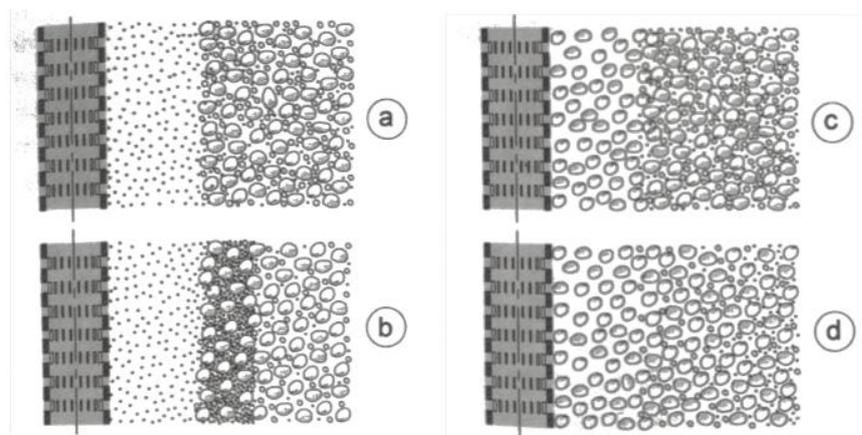


Abbildung 7.21: a und b Entsandungswirkung bei falsch bemessener Kiesschüttung (a= vorher, b=nachher); c und d Entsandungswirkung bei korrekt bemessener Kiesschüttung (c=vorher, d=nachher) (aus Balke, Beims, Heers, *et al.* (2000))

In Lockergestein-Grundwasserleitern kann es zu einer permanenten Feststoff-Belastung durch suffusionsgefährdete, geologische Schichten kommen, die im Laufe der Jahre einen erheblichen Anteil des Korngerüsts des Grundwasserkörpers entfernen können. Die Folge davon sind oft Setzungen und dadurch erhöhte Außendruckbelastungen der Filterrohre, die zum Kollaps führen können.

Versandung kann also entweder durch Bemessungsfehler, bauliche Schäden oder ungünstige geologische Verhältnisse entstehen. Es gilt im Einzelfall zu entscheiden ob regelmäßiges Nachentsanden, Sanieren der Filterkiesschüttung, Sanieren der Filterrohre, Einbau einer Saugstromsteuerung oder Drosselung der Fördermenge Abhilfe schaffen können.

### 7.3.3.2 Korrosion und Abrasion

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Die Korrosion ist nach DIN 50 900 die „Reaktion eines metallischen Werkstoffs mit seiner Umgebung, die eine messbare Veränderung des Werkstoffs bewirkt und zu einer Beeinträchtigung des metallischen Bauteils oder des gesamten Systems führen kann.“ Korrosion kann entweder flächenhaft oder punktuell, als Lochfraß oder Muldenkorrosion, auftreten. Unter Abrasion wird die nachteilige, rein mechanische Veränderung von Werkstoffen verstanden, z.B.: durch Erosion oder Kavitation.

Korrosion an metallischen Werkstoffen erfolgt entweder durch elektrochemische Prozesse oder ist mikrobiell bedingt. Bei der elektrochemischen Korrosion werden unedlere Metalle zum Vorteil von edleren Metallen nach dem Prinzip der Galvanischen Zellen abgetragen. Die Anode (unedleres Metall) und die Kathode (edleres Metall) sind durch ein leitendes Fluid (Wasser) miteinander verbunden und weisen ein unterschiedliches elektrisches Potential auf. Elektrolyte, die im Wasser enthalten sind, erhöhen die Leitfähigkeit und ermöglichen den Transport zusätzlicher Elektronen und somit das Fortschreiten der Korrosion. Aus diesem Grund wirken chloridreiche, hochmineralisierte Wässer besonders korrosiv. Ebenso erklärt sich die erhöhte Korrosion im Spritzwasserbereich (Übergangsbereich Luft/Wasser) durch den höheren Anteil von Sauerstoff in der Luft.

Konkret treten solche Schäden beispielsweise auf, wenn aus Kostengründen Edelstahl-Wickeldrahtfilter mit Vollrohren aus unedlerem einfachen Stahl verbunden werden. Potentialunterschiede auf einem Bauteil können durch unterschiedliche Bearbeitung an Schweißnähten oder gefrästen Filterschlitzten entstehen. Metalle besitzen oft eine natürliche Schutzschicht aus Korrosionsprodukten, oder es wurde eine künstliche Schutzschicht aus Kunststoff oder Ähnlichem aufgebracht. Wird diese durch einen chemischen oder mechanischen Angriff (Transport, Einbau etc.) verletzt, so kann es zu punktueller Korrosion kommen.

Die Zerstörung von metallischen Materialien durch mikrobiologische Prozesse spielt eine wesentliche Rolle in der korrosionsbedingten Brunnenalterung. Bei der anaeroben Korrosion des Eisens durch sulfatreduzierende Bakterien entstehen durch die Verstoffwechslung von Wasserstoff, Säuren und schwärzlich-rote Gemenge aus Eisenoxiden und Eisensulfiden. Die anaerobe Korrosion kann mehrere Millimeter pro Jahr betragen.

Auch nicht metallische Werkstoffe sind von Korrosion betroffen. PVC wird zum Einsatz im Brunnenbau durch verschiedene Zuschläge gegen die natürliche Spröde und thermische Instabilität präpariert und dann als PVC-U eingesetzt. Diese Zuschläge können sich aber über die Jahre wieder verflüchtigen und schließlich das spröde gewordene Material bei mechanischer Beanspruchung (z.B.: Setzungen) brechen lassen. Insbesondere ist hier auf die Abdichtungen hinzuweisen, da diese oftmals übersehen werden.

### 7.3.3.3 Setzungen

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Unter einer Setzung versteht man allgemein die vertikale Senkbewegung von Bauwerken bzw. Teilen von Bauwerken durch ihre Eigenlast und eventuelle Nutzlasten. Zu Nutzlasten im Brunnenbau zählen die Stoß- und Schwingbewegungen von Maschinen sowie die Einwirkung von strömenden Medien. Durch die Absenkung im Brunnen verändern sich die Gewichts- und Druckverhältnisse im Grundwasserkörper einerseits und der Feststofftransport durch die Schleppkraft des Wassers andererseits, dies kann ebenfalls Setzungen begünstigen. Bauwerksschädigend wirken aber nur Setzungsdifferenzen, die ein Bauteil unterschiedlich belasten. Für die Brunnenenergiebigkeit sind vor allem Setzungen im Ringraum und dem angrenzenden Grundwasserleiter von Bedeutung.

Am häufigsten entstehen Setzungsunterschiede im Brunnenbau durch unregelmäßige Schüttung, die Ausbildung von Schüttkegel, sowie exzentrisch eingebaute Brunnenrohre und eine ungenügende Brunnenentwicklung. Diese Missstände können durch die Bohrlochgeophysik eigentlich bereits bei der abschließenden Baukontrolle aufgedeckt werden. Im Betrieb entstehen Setzungen durch Entsandern, Regenerierung und nicht filterstabile Kiesschüttungen.

Houben & Treskatis (2003, S.68) fassen Empfehlungen zur Vermeidung von Setzungen und deren Folgen für die Brunnenleistung aus der Fachliteratur zusammen.

### 7.3.3.4 Verockerung

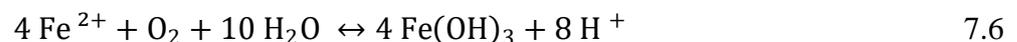
(nach Houben & Treskatis, 2003)

Ganz allgemein entstehen Inkrustationen durch die Mischung von Wässern aus unterschiedlichen hydraulisch wirksamen Horizonten und deren Gasaustausch mit der Atmosphäre, also durch das Lösen von Sauerstoff in Wasser. Durch das Streben nach einem chemischen Gleichgewicht laufen chemische Reaktionen ab, die das Ausfallen der schwerlöslichen Verbindungen bedingen. Eine starke Turbulenz im Brunneninneren sowie der Zutritt von Bodenluft durch das Absinken des Grundwasserspiegels in den Bereich der Filterstränge verstärken dies noch. Dass Bereiche mit vollständiger Wassersättigung weniger zu Verockerung neigen, bemerken auch Henkel, Weidner, Roger, *et al.* (2012) in ihren Modellversuchen. Zusätzlich zeigen sie, dass bei Füllstandsänderungen immer größere Bereiche des Filterkieses und des Filterrohres verockern.

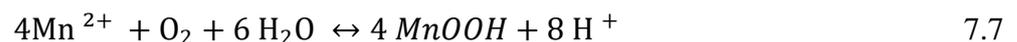
Die Oxidation von gelöstem, zweiwertigem Eisen und Mangan und die daraus resultierende Ausfällung unlöslicher Eisen(III)- bzw. Mangan(IV)-Verbindungen stellt die häufigste Ursache der Brunnenalterung dar (Wiacek, 2005). Man unterscheidet chemische und mikrobiologische Verockerung, die oft gemeinsam vorkommen, obwohl die mikrobiologische Verockerung häufiger zu finden ist. Einen Hinweis für das gemeinsame Vorkommen ist ein hoher Glühverlust in der chemischen Analyse, der den hohen Anteil organischer Substanz anzeigt (Houben & Treskatis, 2003). Nach Hancke (zit. in Henkel, Weidner, Roger, *et al.*, 2012) dominieren bei ausreichend Sauerstoffkonzentration die chemischen Vorgänge, während die biologische Oxidation bei geringerem Sauerstoffgehalt an Bedeutung gewinnt.

#### 7.3.3.4.1 Chemische Verockerung

Das in Brunnenwasser häufig vorkommende, als Carbonat vorliegende Eisen(II) wird zu Eisen(III)-Hydroxid umgewandelt, das aufgrund seiner geringen Löslichkeit in Wasser ausfällt.



Mangan kommt im reduzierenden Wasser meist nur als  $\text{Mn}^{2+}$  vor, welches beim Kontakt mit Sauerstoff zu dreiwertigem und vierwertigem Mangan umgebaut wird, und als Manganoxid ausfällt.



Die Oxidation von Eisen und Mangan wird hauptsächlich durch den pH-Wert und das Redox-Potential gesteuert. Dimkić, Pusić, Vidovic, *et al.* (2011) zeigen in ihren Untersuchungen den Zusammenhang zwischen Eisengehalt, Redoxpotential und Entnahmemenge. Bei steigendem Redoxpotential sinkt der Eisengehalt. Spurenmetalle wie  $\text{Co}^{2+}$  (Kobalt Ion) oder  $\text{Cu}^{2+}$  verstärken die Reaktion, genau wie Silizium und Anionen, die mit dreiwertigem Eisen Komplexe wie zum Beispiel: Phosphat, Sulfat oder Chlorid bilden. Höhere Ionenkonzentrationen hingegen verlangsamen die Reaktion (Houben & Treskatis, 2003).

Ihre chemischen Eigenschaften machen Eisen und Mangan für die Verfügbarkeit von Nähr- und Spurenstoffen in der Natur wichtig. Eine dieser Eigenschaften ist die hohe Sorptionsfähigkeit an der Oberfläche. Durch die Abgabe der Hydroxylgruppe kann ein Anion aufgenommen werden. Darum können Eisenoxide sowohl Kationen als auch Anionen aufnehmen. Im neutralen Bereich ist die Oberfläche jedoch meist positiv geladen, weswegen die Anionensorption überwiegt. Besonders gut aufgenommen werden hochgeladene Ionen, wie Phosphat, Arsenat und Schwermetalle. In der Rohwasseranalyse sind Anionen stärker vertreten als kationische Schwermetalle. Eine lineare Korrelation zwischen Eisengehalt und Konzentration der Spurenelemente zeigt, dass letztere an Eisen gebunden sind. Die Berechnungen von Houben & Treskatis (2003) lassen den Schluss zu, dass niedrige Konzentrationen gelöster Stoffe und starke Verockerung zu einer signifikanten Verfälschung der Wasserbeschaffenheit im Hinblick auf Spurenelemente führen. (Houben & Treskatis, 2003)

Die gebildeten Oxide setzen sich auf der Oberfläche der Filterkieskörner und an den Filterschlitz ab. Die Anlagerung erfolgt dabei bevorzugt auf der Oberfläche älterer Eisenoxide, was sich durch eine deutliche Schichtung im Mikroskop erkennen lässt. Houben & Treskatis (2003) untersuchen die katalysierende Wirkung von älteren Eisenoxiden. Eine Menge von 0,1 mmol/l (9 mg Eisenoxid) reicht demnach aus, um die Halbwertszeit der Verockerung von 25 h auf 1 h herabzusetzen, d. h. eine leichte Ockerschicht um die Filterkieskörner beschleunigt die Verockerung erheblich. Henkel, Weidner, Roger, *et al.* (2012) berichten ähnlich schnelle Reaktionszeiten bei der Zugabe von 30g Fe(II)-Lösung/l. Im gepufferten Bereich, bei einem annähernd neutralen pH Wert, finden sich sogar Halbwertszeiten im Minutenbereich. Zudem können anfängliche Ockerschlämme feinkörnige und kolloidale Partikel aus dem Wasser lösen, welche den Prozess zusätzlich beschleunigen. Diese Erkenntnisse spielen vor allem im Hinblick auf die Regenerierung eine wichtige Rolle.

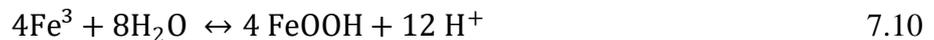
Die anfänglich weiche, flockige Verockerung verändert sich mit der Zeit durch Mineralumbildungen. Zuerst kristallisieren Phasen, die eine geringe Kristallisationsenergie benötigen (Ferrihydrit). Nach und nach werden Phasen mit hoher Oberflächenenergie zu stabilen Phasen mit geringer Oberflächenenergie umgebaut (Goethit). Dieser Prozess wird Ostwaldreifung genannt. Die Oberfläche wird dabei von ca. 200-400 m<sup>2</sup>/g auf 20-90 m<sup>2</sup>/g reduziert. Daraus ergibt sich eine Abnahme der Reaktivität. Dies ist der Grund für das aus der Praxis bekannte Problem bei Regenerierungen, denn alte Inkrustationen sind wesentlich schwerer zu beseitigen als jüngere. Die Umkristallisation ist wiederum stark pH abhängig. Bei sauren pH-Werten verlaufen die Reaktionen langsam, während theoretisch im neutralen Bereich eine Umkristallisation in einem Jahr abgeschlossen sein kann. In der Praxis sind längere Zeiträume wahrscheinlich, trotzdem sollten Regenerierungen in den frühen kristallinen Stadien angedacht werden.

Um die inkrustationsbildenden Prozesse zu untersuchen, setzen Houben & Treskatis (2003) auf die Analyse von Mineralbestand und Geochemie der Inkrustationen. In jungen Eisenoxid-Inkrustationen findet sich am meisten Ferrihydrit (Fe<sub>5</sub>HO<sub>8</sub>\*4H<sub>2</sub>O) auch Fe(OH)<sub>3</sub>. Dieses bildet winzige Kristalle, die zu den Nanopartikel zählen. Ältere Eisen-Verockerungen enthalten Goethit (α-FeOOH), welcher unter dem Mikroskop kugelig wirkt. Vom Mittelpunkt der Kugel gehen radialstrahlig nadelige Kristalle ab. Die höchste kristalline Form des Eisenoxids, Hämatit wurde bisher nicht in Verockerungen an Brunnen gefunden, Henkel, Weidner, Roger, *et al.* (2012) konnten es aber im Modellversuch erzeugen. Eisen färbt die Inkrustationen in rotbraune bis rötliche Farbe. Bei manganreichen Inkrustationen gibt es ebenfalls kristalline Formen. Mangan hat zwei oxidierte Formen, dreiwertiges und vierwertiges Mangan, entsprechend treten auch Minerale mit denselben auf, zum Beispiel Mangan(IV)-Oxihydrat (Braunstein). Manganoxide färben Inkrustationen schwarz-braun (Houben & Treskatis, 2003).

#### 7.3.3.4.2 Mikrobiologische Verockerung

Die biologische Verockerung ist die am weitesten verbreitete Art der Brunnenalterung (Wiacek, 2005). Dabei wandeln Mikroorganismen zweiwertiges Eisen und Mangan aus dem Grundwasser in schwer lösliche dreiwertige Eisen- und vierwertigen Manganverbindungen um. Grundsätzlich ist Eisen ein essentieller Spurenstoff für Mikroorganismen. Es gibt jedoch auch Mikroorganismen, die auf die Umwandlung von Eisen und Mangan spezialisiert sind. Die häufigsten Gattungen sind Gallionella und Leptothrix.

Die optimalen Lebensbedingungen von Gallionella sind neben einem gewissen Eisengehalt und neutralem pH-Wert schwache oxische Verhältnisse. Unter dem Mikroskop erkennt man Gallionella durch zopfförmig verdrehte Stiele, an deren Ende bohnenförmige Zellen sitzen. Es ist möglich, dass sich die Zelle vom Stiel trennt und mit dem Wasser weitertransportiert wird. Gallionella sind autotrophe Organismen, die ihre Energie aus der Oxidation von zweiwertigem Eisen zu dreiwertigem Eisen beziehen. Das dreiwertige Eisen wird als Eisenoxid ausgeschieden und lässt das Bakterium verkrusten. Die Reaktionsgleichung, in der der Organismus vereinfacht als „CH<sub>2</sub>O“ angenommen wird, lautet:



Die Gleichung zeigt, dass für einen Teil Biomasse vier Teile Eisen umgesetzt werden müssen. Gleichzeitig werden aber auch 4 Teile FeOOH ausgeschieden. Laut Houben & Treskatis (2003) liegt das berechnete Verhältnis von entstandenem Eisenoxid zu Biomasse in biologisch entstandenen Inkrustationen bei 10:1. In der Realität ist es jedoch meist höher (20:1), dies liegt vermutlich daran, dass neben der biologischen auch eine chemische Eisenoxidation abläuft und bestehende Eisenoxide als Grundlage für weitere dienen. Zusätzlich gilt, dass je älter die Verockerung sind, desto weniger Mikroorganismen sind darauf zu finden.

Leptothrix sind wahrscheinlich heterotrophe Organismen, die Huminstoffe verwerten. Das enthaltene Eisen löst sich und wird chemisch oxidiert, um sich dann am Bakterium abzuschneiden. Eine Gattung der Leptothrix oxidiert zweiwertiges Mangan.

Die Bakterien können in der Atmosphäre ausgesetztem Wasser nicht überleben, zudem sind sie trinkwasserhygienisch unbedenklich. Um sich im Brunnen vor chemischen oder mechanischen Angriffen zu schützen und die Anlagerung an Flächen zu erleichtern, bilden die Bakterien Biofilme. Diese schützen den Zellkern der Bakterien und haben unterschiedliche Ausprägungen (Schleime, Kapseln oder Scheiden). Sie bestehen meist aus Polysacchariden, sogenannten extrazellulären polymeren Substanzen (EPS), eingelagerten Partikeln und gelösten Stoffen. Ihre Oberfläche ist häufig sauer und negativ geladen, weswegen positiv geladene Eisenoxide zusätzlich angezogen werden.

Zusammenfassend müssen laut DVGW W 130 (2007) folgende Bedingungen gleichzeitig erfüllt sein, damit biologische Verockerung stattfindet:

- Anwesenheit Eisen bzw. Mangan speichernder Mikroorganismen
- Gegenwart von zweiwertigen Eisen- bzw. dreiwertigen Manganionen
- Überschreiten eines Grenzwertes für die Redoxspannung
- erhöhte Fließgeschwindigkeit des Wassers gegenüber den natürlichen Verhältnissen

Stellen mit großen Strömungsgeschwindigkeiten, wie sie am Übergang des Wassers von der Kiesschüttung in das Filterinnenrohr, an der Filterrohrinnenseite, in den Filterschlitz und am Pumpeneinlauf zu finden sind, sind besonders anfällig für biologische Verockerung. Hier strömen große Wassermengen mit hohem Nährstoffangebot auf engem Raum und liefern den

unbeweglichen Mikroorganismen perfekte Lebensbedingungen. Von dort setzt sich das Wachstum weiter fort.

Für Bohrbrunnen, die mit Spülbohrverfahren niedergebracht wurden, konnte außerdem nachgewiesen werden, dass ein nicht vollständiges Entfernen der Spülungsreste aufgrund von speziellen Zusätzen zur Bohrspülung die biologische Verockerung beschleunigt (Wiacek, 2005).

### 7.3.3.4.3 Struktur und Habitat

Bieske (1965) und Houben & Treskatis (2003) geben an, dass Inkrustationen sich hauptsächlich direkt an den Außenflächen der Filterrohre finden und meist nur einige Zentimeter dick sind. Bei der Mikroskopie von An- und Dünnschliffen der Inkrustationen (Abbildung 7.22) lässt sich der zonare Aufbau erkennen. Direkt am Filterrohr liegt eine enggeschichtete Zone aus dunklen und hellen Bändern, die häufig Filterkies und Sedimentmaterial enthalten. Danach folgt eine ungeordnete Zone mit kugelförmigen Goethiten.

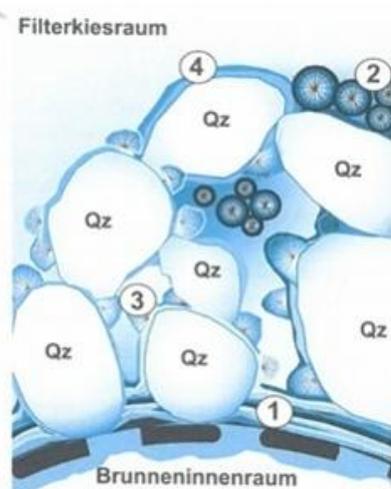


Abbildung 7.22: Struktureller Aufbau von Verockerungen im mikroskopischen Maßstab (1-eng laminierte Eisenoxide am Filterrohr, 2 u. 3-Goethit, 4-laminierte Eisenoxide auf Filterkies, Qz-Quarzkörner des Filterkies) u. Filterkuchen im Dünnschliff mit Partikelakkumulation (aus Houben & Treskatis, 2003 und Houben et al., 2017)

Beschäftigt man sich mit der räumlichen Verteilung der Belagsbildung im Filterraum eines Brunnens, so sollte zuerst auf die generelle vertikale hydrochemische Schichtung eingegangen werden, die in fast allen Grundwasserleitern herrscht. Das Redoxmilieu im Grundwasserleiter wird generell mit der Tiefe reduzierender. Ebenso können sich der pH Wert und die Karbonathärte mit der Tiefe ändern. Dies erklärt auch die Beobachtung der Trennung von Zonen mit Eisenoxidbildung von solchen mit überwiegend manganhaltigen Belägen, entsprechend den Abhängigkeiten vom Redoxpotential.

Der Zonierung nach finden sich Ausfällungen häufig im oberen Brunnenbereich, besonders wenn sich die Pumpe im darüber liegenden Vollrohrbereich befindet. Prinzipiell könnte man für Horizontalbrunnen also regelmäßige chemische Zustände annehmen. Allerdings existieren auch horizontale Unregelmäßigkeiten im Grundwasserleiter, die sich auch mit der Grundwasserströmungsrichtung ändern. So ist die der Hauptstromrichtung zugewandte Seite meist stärker belastet. Verockerung reichen in der Hauptstromrichtung oft weiter als 15 cm in den Ringraum hinter dem Filterrohr hinein. Bei Uferfiltrat trifft eisenhaltiges Grundwasser auf sauerstoffreiches Flusswasser und führt zu Inkrustationen. Besonders oft treten Verockerungen auch im Bereich großer Fließgeschwindigkeiten, z.B. lokal am Einlauf von Pumpen, auf. Hohe

Quarz-Anteile in den Inkrustationen weisen auf eine Sandführung des Wassers oder die Tendenz zur Inneren Kolmation hin (Houben & Treskatis, 2003).

### **7.3.3.5 Versinterung**

Seltener als Verockerung findet man Versinterung. Sie tritt nur bei stark karbonatischen oder sulfathaltigen Wässern auf (Bieske, 1965). Durch Druckentlastung bei der Wasserförderung wird CO<sub>2</sub> ausgegast. Dadurch verschiebt sich das Kalk-Kohlensäuregleichgewicht und Calcium- und Magnesiumcarbonate fallen aus. Für die Löslichkeit von Kohlensäure förderlich sind niedrige Temperaturen, hoher Druck und geringe mechanische Agitation. Im Brunnen wird das Wasser durch die Pumpe leicht erwärmt, zusätzlich erfährt es eine leichte Druckentlastung und es entstehen Turbulenzen. Diese Vorgänge begünstigen das Ausgasen der Kohlensäure und führen in diesen Bereichen zur Bildung von Karbonaten. Die wichtigsten Mineralphasen sind Kalzit, Aragonit und Dolomit. Im reduzierenden Redoxmilieu kann sich zudem Eisenkarbonat bilden. Oft geht die Versinterung auch mit einem erhöhten Zinkgehalt in den Inkrustationen einher. Karbonate können nicht eindeutig durch ihre Farbe erkannt werden, schäumen aber beim Beträufeln mit Säure. (Houben & Treskatis, 2003)

### **7.3.3.6 Verschleimung**

Im Zusammenhang mit mikrobiologischer Aktivität kann das Verschleimen eines Brunnens auftreten. Dabei kommt es zur Massenentwicklung schleimbildender Bakterien oder niederer Pilze. Die Problematik tritt besonders an Infiltrationsbrunnen auf, da sie durch die Anwesenheit von Stickstoffverbindungen und die Zufuhr organischer Stoffe stark begünstigt ist (DVGW W 130, 2007). Außerdem treten Verschleimungen bei organisch belasteten Grundwässern und Uferfiltrat auf. Versuche zeigen, dass biologische Kolmation schon ab einem Gehalt von 0,01 mg/l AOC (Assimilierbarer organischer Kohlenstoff) einsetzt. Treten Verschleimungen gemeinsam mit Verockerung auf, haben sie meist eine rötliche Farbe (Houben & Treskatis, 2003).

### **7.3.3.7 Aluminiumausfällung**

Aluminiumausfällung tritt auf, wenn sich Aluminium bei einem pH unter 4,2 aus Tonmineralien und im Boden vorhandenen Aluminiumhydroxiden löst, mit dem Sickerwasser nach unten transportiert wird und sich dort mit tiefem Grundwasser mit höherem pH Wert mischt. In Deutschland ist diese Art der Inkrustationen eher selten, während sie in Australien durch aluminiumreiche Böden zu den Hauptalterungserscheinungen gehört. Aluminiuminkrustationen sind oft weiß, reagieren jedoch nicht auf Säure (Houben & Treskatis, 2003).

## **7.3.4 Vorbeugung der Brunnenalterung**

Wie bereits erwähnt, hängen die Alterungserscheinungen hauptsächlich vom Ausbau und Betrieb des Brunnens ab. Großes, rundes und glattes Filterkorn mit kleiner spezifischer Oberfläche ist hinderlich für die Ausfällung von Eisen- und Manganoxiden und den Rückhalt von Unterkorn. Zusätzlich sollte die Filterkiesschüttung entsprechend der „hydraulischen Kette“ abgestuft sein. Der für Neubauten geforderte Nachweis der technischen Sandfreiheit führt aber immer wieder zur Wahl von möglichst kleinen Filterkornstufen. Dann ist eine Versandung im Grunde vorprogrammiert. Darum sollte, entgegen der Forderung nach Sandfreiheit, eine gröbere Korngröße gewählt werden, die für das Feinstkorn passierbar ist. Im Betrieb sollte vor allem darauf geachtet werden, dass die Förderraten nicht zu hoch sondern dem Brunnen angepasst sind. Eine möglichst geringe Absenkung, möglichst kontinuierlicher Förderbetrieb und die Vermeidung von Turbulenzen im Filter sind erstrebenswert. Um die biologische Alterung zu vermindern, wird von einigen Autoren eine regelmäßige Desinfektion empfohlen. Die Wirksamkeit dieser Maßnahme ist jedoch umstritten. Zur Minimierung von chemischer und biologischer Alterung kann aber auch auf eine unterirdische Enteisenung und Entmanganung

gesetzt werden. Außerdem kann die Platzierung der Stränge einen Einfluss haben. (Grossmann, 2000)

### 7.3.5 Entscheidungskriterien Regenerierung-Sanierung-Rückbau

Prinzipiell werden Entscheidungen über die Anwendung von Sanierungs- oder Rückbaumaßnahmen auf Grundlage von Untersuchungen des Bauzustandes und der aktuellen Leistungsfähigkeit getroffen. Laut DVGW W 130 zählen Regenerierungen im Sinne der Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit zu den Sanierungsmaßnahmen. Werden die oben angeführten Maßnahmen im Betrieb eines Brunnen getroffen, so zeichnet sich die Notwendigkeit einer Regenerierung oder Sanierung in den Ganglinien der Daten bereits ab. Durch die Überdimensionierung von Brunnen werden Leistungsreserven geschaffen, die die Sanierung von Brunnen hinauszögern. Gemeinsam mit regelmäßigen Regenerierungen können so Totalausfälle vermieden werden.

Wasserwerksbetreiber, die eine Vielzahl von Brunnen betreiben, können im Vorfeld von Sanierungsmaßnahmen eine Klassifizierung der Brunnen nach aktuellem Leistungsgrad vornehmen. Danach wird die spezifische Brunnenbelastung  $Q_{SP}$  wie folgt berechnet:

$$Q_{SP} = \frac{\text{Jahresfördermenge}}{\text{Brunnenanzahl}} \quad 7.11$$

Daraufhin wird der Leistungskoeffizient berechnet, der auf die aktuelle durchschnittliche, hydraulische Leistungsfähigkeit  $Q_{akt}$  des Brunnen im Vergleich zur Jahresfördermenge schließen lässt.

$$K_{Br} = \frac{Q_{akt}}{Q_{SP}} \quad 7.12$$

Leistungskoeffizienten kleiner 1 zeigen, dass der Brunnen aus Gründen alterungsbedingter oder technischer Leistungsrückgänge oder veränderter hydrogeologischer Randbedingungen bei der angesetzten Jahresentnahmemenge hydraulisch überlastet ist (Houben & Treskatis, 2003). Ist dies der Fall müssen Regenerierungs oder Sanierungsmaßnahmen getroffen werden, damit Spitzenleistungen abgedeckt werden können.

Vor der Entscheidung über Sanierung, Regenerierung oder Rückbau, sollte auf jeden Fall Ursachenforschung betrieben werden. Laut Houben & Treskatis (2003) gliedert sich diese in zwei Bereiche. Zum einen in die Ermittlung der Ursachen für den Leistungsrückgang, zum anderen in die Beurteilung des Bauzustandes hinsichtlich Standsicherheit und (Rest-) Lebensdauer. Zusätzlich sollte die Beurteilung der potentiellen Grundwassergefährdung des Bauzustands berücksichtigt werden.

Ob eine Regenerierung oder eine Sanierungsmethode zum Einsatz kommt, hängt laut Houben & Treskatis (2003) von folgenden Faktoren ab:

- Restleistungsfähigkeit im Vergleich zur Neubauleistung
- Optimale Fördermenge in Abhängigkeit der Untergrounddurchlässigkeit, des Wasserandrangs und des Fassungsvermögens
- Regenerierfähigkeit aufgrund von baulichen Eigenschaften
- Aussichten auf einen Regenerierungserfolg auf Grund der hydrochemischen Verhältnisse und des Grades der Inkrustierung
- Veränderung der wasserrechtlich genehmigten Entnahmekonfiguration (Absenktrichter, EZG)
- Veränderung der Grundwasserströmung durch Mengenverlagerung oder Außerbetriebnahme

- Veränderung der Wasserqualität durch Veränderung der Grundwasserströmungsverhältnisse

Da Brunnen generell mit hohen Investitionen verbunden sind, empfehlen sich Wirtschaftlichkeits- und Kosten-Nutzen-Berechnungen für alle anstehenden Ausgaben. Durch die Diskontierungsmethode sind die variablen Einflussgrößen, die sich im Laufe des wirtschaftlichen Lebenszyklus eines Brunnens ergeben, wie Energiekosten, Regenerierungsintervalle oder bauliche Sanierungen, prognostisch erfassbar. In der Annuitätenmethode werden durchschnittliche Jahreskosten berechnet, in denen die anfallenden variablen Kosten über den Untersuchungszeitraum gemittelt enthalten sind. Eine regelmäßige Erfassung dieser Kosten im Betrieb, ermöglicht einen Vergleich mit der Prognose und erleichtert Entscheidungen über das weitere Vorgehen. Ein Neubau ist erst dann wirtschaftlich, wenn die Abschreibungsperiode zu Ende ist und der Nutzen des Brunnens die Betriebskosten nicht mehr decken kann (Houben & Treskatis, 2003).

Für HFB kommen in der Praxis laut Houben & Treskatis (2003) Kostenspannweiten von 50.000 bis >85.000 Euro vor, die je nach Anbieter und Aufwand für die Strangreinigung, das Regenerierungsverfahren und einen nötigen Tauchereinsatz unterschiedlich hoch ausfallen können. Meistens werden die Arbeiten zu Stundenverrechnungssätzen angeboten, die je nach Erfahrung des Anbieters variieren können. Seriöse Anbieter geben die Stundenanzahl und Aufwendungen an, die aufgrund der bereitgestellten Information des Auftraggebers im „Regelfall“ anfallen werden

Grundsätzlich ist die Entscheidung über Regenerierung, bauliche Sanierung oder den Rückbau und Ersatz eines Brunnens für jeden Standort individuell zu betrachten und in Abhängigkeit von wirtschaftlichen, individuellen, standortspezifischen, hydrogeologischen, hydrochemischen und wasserrechtlichen Aspekten zu bewerten.

## 7.4 Regenerierung

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Der Verlauf der Brunnenalterung zeigt sich durch die fortschreitende Abnahme der Ergiebigkeit eines Brunnens. Dieser Verlauf ist brunnenpezifisch und lässt sich meist schwer vorhersagen. Im Zusammenhang mit den Ergebnissen aus dem Monitoring ist aber ein genauer Zeitpunkt für eine Regenerierung feststellbar. Die DVGW W 130 (2007) schlägt vor, den Zeitpunkt der Regenerierung nach einem Leistungsrückgang um 10-20% vom Ausbauzustand festzulegen. Diese Empfehlung wird in der Literatur bestätigt (Houben & Treskatis, 2003).

Generell gilt, dass Regenerierungsmaßnahmen bei fortgeschrittener Alterung sowohl technisch als auch wirtschaftlich aufwändiger werden. Deshalb sollten Regenerierungsmaßnahmen so bald wie möglich durchgeführt werden. Der zeitliche Abstand zwischen zwei Regenerierungen hängt dabei von der Rohwasserbeschaffenheit, der Fördermenge über die Zeit, der Betriebsweise des Brunnens, dem Schaltrhythmus, der Gründlichkeit und Wirksamkeit der vorangegangenen Regenerierung und dem allgemeinen Bauzustand des Brunnens ab. Nach einer Studie von Niehues (1999, zit. in Houben & Treskatis, 2003) ergibt sich, dass 52% der Wasserversorgungsunternehmen in Deutschland nach Bedarf, also aufgrund von Leistungsrückgang oder Schäden, regenerieren, während ein Viertel der Unternehmen regelmäßig in einem Turnus von 5-10 Jahren regeneriert. Die große Streuung der Werte hängt dabei von den vorher genannten Faktoren ab (Houben & Treskatis, 2003).

Das Ziel der Brunnenregenerierung ist die Entfernung der Ablagerungen im Brunneninnenraum, durch die ein Leistungsrückgang hervorgerufen wird. Zum Brunneninnenraum zählen die Brunnenrohre, die Filterkiesschüttung bzw. der Stützkörper. Brunnenalterungserscheinungen treten grundsätzlich in jedem dieser Bestandteile auf. Besonders häufig finden sich Ablagerungen an Brunnenrohrinnenwänden, Filterschlitzten und Spalten, Außenflächen der Filterrohre, in der Filterkiesschüttung und am Übergang zwischen Filterkies und anstehendem Gestein.

Laut DVGW W 130 (2007) arbeiten alle Regenerierverfahren nach denselben drei Prinzipien:

- Trennung bzw. Aufhebung des Verbundes zwischen Ablagerung und betroffenem Material des Brunneninnenraums
- Austrag bzw. Entfernung dieser Ablagerung aus dem Brunneninnenraum
- Kontrolle des Regenerierverfahrens und des Erfolgs der Maßnahme

Die angebotenen Verfahren der Brunnenregenerierung werden dann eingeteilt in mechanische, chemische und kombinierte Verfahren. Etschel (2008) gibt an, dass früher hauptsächlich mechanisch-chemisch gereinigt wurde, während heutzutage immer häufiger umweltschonende mechanische Verfahren eingesetzt werden. Er bezeichnet eine Kombination aus Druckwellenimpulsverfahren mit Wasserhochdruck und das sogenannte „Kieswäscherverfahren“ als marktführend. Abramova, Schneider & Maximov (2014) testeten die Kombination von Ultraschall- und Druckwellenverfahren im Modell- und im Feldversuch und kommen zum Schluss, dass die Kombination der beiden Verfahren sehr gute Wirkungsgrade erzielt. Der Einsatz von bestimmten Verfahren ist auch mit Rücksicht auf das vorhandene Filterrohrmaterial zu wählen.

### 7.4.1 Mechanische Brunnenregenerierung

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Bei den mechanischen Regenerierverfahren erfolgt die Trennung der Ablagerungen von den Bestandteilen des Brunneninnenraums durch physikalische Prozesse. Die DVGW W 130 (2007) unterscheidet folgende Verfahren:

- Bürsten
- Auspumpen
- Intensiventnahme
- Kolben
- Wasserhochdruck- und Wasserniederdruckspülung
- Injektion mit flüssigem oder gasförmigem Kohlendioxid
- Druckwellen- und Impulsverfahren (dynamische Verfahren)

Eine weitere Unterteilung erfolgt in rein mechanische (Bürsten), hydraulische (Auspumpen, Intensiventnahme, Kolben, Wasserhochdruck- und Wasserniederdruckspülung) und dynamische (Druckwellen- und Impulsverfahren) Verfahren (Grossmann, 2000).

In der Praxis nutzen die Anbieter von Regenerierverfahren oft selbst konstruierte und patentierte Geräte, deren genaue Wirkungsweise oft nicht preisgegeben wird. Grundsätzlich sollten aber alle Geräte den technischen Vorgaben der DVGW entsprechen. Der Vorteil von mechanischen Regenerierungen liegt in der raschen und preisgünstigen Reinigung des Brunneninnenraums. Nachteile zeigen die Verfahren im Hinblick auf die Eindringtiefe. Die Filteraußenwand und die Filterkiesschüttung werden meist nicht ausreichend behandelt, da die kinetische Energie der Verfahren durch Reibungsverluste an den Filterschlitzten und Kieskörnern verloren geht. Werden deswegen zu hohe Drücke und Pumpleistungen, sowie Druckluft, eingesetzt, kann es zu Beschädigungen am Brunnenausbau kommen. Von Druckluft ist bei Eisen- und Mangan-haltigen Wässern generell abzuraten, da durch das Einbringen von Luftsauerstoff eine zusätzliche Oxidation stattfindet und Ablagerungen bis in den Grundwasserleiter hinausgetragen werden können. Darüber hinaus kann es vorkommen, dass mechanische Verfahren die Ablagerungen auf der Filterinnenseite nur verschmieren. Durch die Weiterentwicklung der Verfahren konnte die Tiefenwirkung mittlerweile gesteigert werden (Etschel, 2008).

Der Erfolg der Verfahren hängt vor allem vom Alter und Grad der Inkrustierungen und den verbliebenen Porenkanälen im Ringraum ab. Wiederum zeigt sich, dass eine frühe Regenerierung am wirkungsvollsten ist. Obendrein können verschiedene Eigenschaften des Brunnenausbaus Regenerierungen positiv beeinflussen. Dazu zählen beispielsweise große Filterschlitzweiten, Wickeldrahtfilter und Kiesschüttungen nach dem Prinzip der hydraulischen Kette.

#### 7.4.1.1 Bürsten und Auspumpen

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Dieses Verfahren wird vor allem bei der Vorbereitung auf andere Verfahren zur Entfernung von gering verfestigten Ablagerungen verwendet. Dabei werden die Bürsten auf den Brunnenrohrdurchmesser und das Rohrmaterial angepasst. Prinzipiell werden im Brunnenbau nur Kunststoffbürsten eingesetzt, da Metallbürsten die Brunnenrohre zerstören würden. Ebenfalls nach den Rohren richtet sich die Vorgehensweise des Bürstens. Längsgeschlitzte Rohre werden mit Vorwärts-Rückwärts-Bewegungen gereinigt, quergeschlitzte Rohre werden durch um die eigene Achse rotierende Bürsten von Ablagerungen befreit. Die gelösten Stoffe werden gleich nach dem Bürsten abgepumpt. Dies ermöglicht eine umgehende Kontrolle des Reinigungsfortschritts und verhindert, dass Feinbestandteile durch den Kolbeneffekt der Bürsten

in die Kiesschüttung verdrängt werden. Durch das Auspumpen werden auch Auflandungen aus Filterkies und mineralischen Ablagerungen sowie kleine Gegenstände aus dem Brunnen entfernt. Die ausgetragene Feststoffmenge sollte ständig kontrolliert werden, um Schäden an den Brunnenrohren zu erkennen. Das Abbruchkriterium dieses Verfahrens ist eine sinkende Feststofffracht im abgepumpten Wasser.

### **7.4.1.2 Intensiventnahme**

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Bei der Intensiventnahme wird nach dem Prinzip der Intensiventsandung vorgegangen. Eine Pumpe zwischen zwei Packern entnimmt filterabschnittsweise und intermittierend Wasser und löst so Ablagerungen. Die Länge der Filterstrecke und die Nennleistung des Brunnens bestimmen den Packerabstand und die Leistung der Pumpe. Laut DVGW Regelwerk sollte die Eintrittsgeschwindigkeit des Wassers bei der Intensiventnahme fünfmal höher sein als im Normalbetrieb bei Brunnennennleistung. Demnach wird der Packerabstand bei gleicher Betriebs- und Intensiventnahmemenge dann fünfmal so klein gewählt. Bei Houben & Treskatis (2003) findet sich ein Berechnungsbeispiel zur Ermittlung von Packerabstand und Intensiventnahmemenge. Damit Beschädigungen an den Rohren vermieden werden und ein Steckenbleiben ausgeschlossen werden kann, sollten die Packermanschetten nicht zu dicht an den Filterrohren anliegen. Darüber hinaus sollten sich die regenerierten Abschnitte zwischen 0,5 und 1 m überschneiden. Die Intensiventnahme eignet sich um gering bis mittelmäßig verfestigte Ablagerungen zu entfernen. Dabei beschränkt sich der Einflussbereich auf die Filterschlitz- und den direkt angrenzenden Filterkiesbereich. Die Eindringtiefe ist von der Eintrittsgeschwindigkeit des Grundwassers abhängig und lässt sich mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung und der Arbeit von HUISMAN berechnen. Der Fortschritt der Regenerierung sollte durch regelmäßige Messung des Feststoffgehalts im geförderten Wasser mittels Trübungsmesser oder Spitzglas (Imhofftrichter) überwacht werden. Wird ein Feststoffgehalt erreicht, der dem ermittelten Restsandgehalt bei Neubau des Brunnens entspricht oder ändert sich der Feststoffgehalt über längere Zeit nicht mehr, so kann zum nächsten Filterabschnitt übergegangen werden. Plötzliche Änderungen der Feststofffracht können wiederum Anzeichen für mechanische Defekte in der Filterstrecke sein. Bei Brunnen die zur Sandführung neigen sind Intensiventnahmen besonders wirkungsvoll. Allerdings kann es bei Fehlbemessungen der Filterkiesschüttung und Filterschlitzweiten zu einer Kolmation oder einem Durchbruch des Feinkorns aus dem Grundwasserleiter kommen. Kiesklebefilter können nicht mit diesem Verfahren behandelt werden.

### **7.4.1.3 Kolben**

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Kolben wird auch zur Brunnentwicklung eingesetzt und entfernt Ablagerungen und Sand mittels in den Brunnen abgesenktem Verdrängungskörper der an einem Gestänge abschnittsweise vor und zurück bewegt wird. Durch die entstehenden Druck und Sogkräfte werden Ablagerungen und Sand im Filter und in der anstehenden Kiesschüttung gelöst und in den Brunneninnenraum transportiert. Dort werden sie mittels Pumpe oder Ventilbohrer entfernt. Der Wirkungsbereich des Kolbens umfasst die Filterschlitz- und die Kiesschüttung. Die Eindringtiefe hängt wiederum von der Mächtigkeit der Kiesschüttung und den Strömungsbedingungen des Grundwassers ab. Eine fehlerhafte Ausführung des Verfahrens kann Veränderungen der Kiesschüttungen zur Folge haben, die ihrerseits zu Sandführung und einer Abnahme der Ergiebigkeit führen können. Zu solchen Fehlern zählen beispielsweise zu hohe Hubgeschwindigkeiten und der Einsatz von „Verdrängungskolben“, die den Ausbau unnötig strapazieren. Die Kontrolle des Regenerierfortschritts ist während des Kolbens eingeschränkt möglich, weil die Auflandung im Brunnenschacht erst nach Beendigung des Verfahrens entfernt werden kann. Kommt es dennoch

zur Entfernung von überdurchschnittlich viel Sand und Filterkies, so sollte die Ursache geklärt werden. Dieses Verfahren eignet sich nicht bei Vorhandensein von Pressholz-, Steinzeug-, Wickeldrahtfiltern und Kiesklebefiltern.

### **7.4.1.4 Niederdruck-Innenspülung**

(nach Houben & Treskatis, 2003)

In diesem Verfahren werden geringe bis mittelmäßig verfestigte Ablagerungen durch Wasserstrahlen, die mit niedrigem Druck über einem Düsenkranz oder durch ein Pumpenlaufrad in einem Mehrkammergerät auf die Rohrwand gerichtet werden, gelöst und anschließend abgepumpt. Dieses Verfahren wirkt in den Filterschlitz und der angrenzenden Kiesschüttung, indem die Wasserstrahlen von der Rohrwand mit abgeschwächter Energie in die Filterschlitz gelangen und dort je nach Ausbildung der Schlitz gebündelt oder gestreut werden. Grundsätzlich kann dieses Verfahren abschnittsweise oder auf der ganzen Filterstrecke angewendet werden. Bei längeren Filterstrecken ist eine Aufteilung in Abschnitte aber vorzuziehen. Darüber hinaus wird für dieses Verfahren Fremdwasser benötigt, welches durch Geräte mit Umlaufsystemen aus einer Teilstromentnahme aus dem Brunnen bereitgestellt werden kann. In der Praxis setzten die unterschiedlichen Anbieter der Regenerierung eigens entworfene, patentierte Lösungsmöglichkeiten an, die sich in der Funktion aber kaum unterscheiden. Durch gleichzeitiges Abpumpen kann auch bei diesem Verfahren eine Fortschrittskontrolle analog zu den anderen Verfahren durchgeführt werden. Bei einer plötzlichen Veränderung in der Feststofffracht sollte wiederum nach den Ursachen gesucht werden. Das Niederdruckspülverfahren eignet sich grundsätzlich für alle Filtertypen, außer jenen mit Kiesklebefiltern. Bei Pressholz und PVC-Brunnenrohren muss jedoch mit Vorsicht vorgegangen werden, da die Wasserstrahlen den Ausbau beschädigen können.

### **7.4.1.5 Hochdruckspülverfahren**

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Laut DVGW W 130 (2007) unterscheidet man Verfahren mit Innenspülung und solche mit Außenspülung. In beiden Varianten setzt man auf die Entfernung von gering bis mittelmäßig verfestigten Ablagerungen durch Wasserstrahlen mit hohem, meist regulierbarem Druck. Bei der Innenspülung setzt man auf dasselbe Prinzip wie bei der Niederdruckspülung, dabei werden die Wasserstrahlen mittels rotierender Düsen bei gleichzeitigem Auf- und Abbewegen des Düsenkranzes mit hohem Druck auf die Rohrwand gerichtet und an den Filterschlitz gestreut. Bei der Außenspülung werden Lanzen mit Düsenköpfen von der Geländeoberfläche aus oder dem Schachtboden aus in die Kiesschüttung vorgetrieben. Dies ermöglicht eine direkte Spülung des Filterkieses. Auch bei diesem Verfahren ist man auf Fremdwasser angewiesen, das bei manchen Verfahren aus dem Brunnen entnommen werden kann. Durch den hohen Druck sollen Ablagerungen in den Filterschlitz sowie im angrenzenden Ringraum abgelöst, zerkleinert und schließlich durch eine Intensiventnahme entfernt werden. Durch abwechselnden Unter- und Überdruck, der durch das Abbremsen der Wasserstrahlen an der Brunnenrohrinnenseite und im Filterschlitz entsteht, werden die Filterkieskörner in pulsierende Bewegungen versetzt. Dadurch entsteht Reibung, die eine Reinigung des Kieses verursacht. Abgelöste Partikel werden dann mittels Pumpe in den Innenraum gesaugt und entfernt. Die Wirkung der Hochdruckspülung kann laut einer Studie bis 16 cm in der Kiesschüttung gemessen werden (Saeed, 1996, zitiert in Houben & Treskatis, 2003). Dieses Verfahren eignet sich vor allem für Brunnen, die zur Versandung neigen. Jedoch sollte der Rotationvorgang der Düsen stets überwacht werden, da ein Ausfall der Drehbewegung einen punktuell hohen Druck erzeugt, der die Ausbauten gravierend beschädigen kann. Pressholz-, Kunststoff- und Kiesklebefilterrohre sollten durch dieses Verfahren nicht oder nur mit geringerem Druck regeneriert werden. Bei der Außenspülung kann durch den Einsatz der Lanzen die Lagerungsdichte und die Schichtung der

Kiesschüttung beeinflusst werden. Zudem können die Brunnenrohre und stockwerkstrennende, abdichtende Ausbauten zerstört werden.

Die Firma Etschel Brunnenservice GmbH setzt beispielsweise ein neu patentiertes System mit Doppelrotationsaggregat, den JET Master MAXINOZ<sup>®</sup>, ein, mit welchem eine Leistungssteigerung von 201% eines VFB des Verbands für die Wasserversorgung Bayrischer Wald nach der Regenerierung erzielt wurde. Die Leistungssteigerung beruht auch auf dem vom DVGW bescheinigten sehr guten Entsandungseffekt (Pietsch & Etschel, 2017).

### **7.4.1.6 Ein- und Mehrkammergeräte („Kieswäscher“)**

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Prinzipiell nutzen Ein- und Mehrkammergeräte durch Packer abgetrennte Kammern zum Lösen und Abtransportieren von Ablagerungen. In Einkammergeräten erzeugt ein Arbeitszylinder in einem von Packern abgegrenzten Filterabschnitt Druck. Mit Hilfe einer Injektor- und Entnahmepumpe wird Fremdwasser eingepumpt und anschließend wieder abgepumpt. Mehrkammergeräte bestehen aus zwei Arbeitskammern, die durch Packer getrennte Abschnitte bearbeiten. In einer Kammer wird Fremdwasser (oder Druckluft) in den Brunnen eingepresst, in der anderen abgepumpt. Dadurch entstehen Umwälzvorgänge in der Filterkiesschüttung. Das Spülwasser wird dabei direkt aus dem bearbeiteten Brunnenabschnitt entnommen und zirkuliert aufgrund der unterschiedlichen Druckverteilung zwischen den Kammern. Die Umwälzleistung zwischen den Kammern ist von der Verfahrenstechnik, vom Brunnendurchmesser und der Brunnenenergiebigkeit abhängig. Durch das Zirkulieren zwischen den Kammern werden Ablagerungen gelöst und sofort abgepumpt. Darüber hinaus wird der kombinierte Einsatz von chemischen und mechanischen Verfahren ermöglicht. Ein- und Mehrkammergeräte lassen einen großen Gestaltungsspielraum zu, weswegen sie für verschiedenste Verfahrenstechniken und quasi jede Brunnenbauform eingesetzt werden können. In der Praxis werden diese Verfahren in individueller, meist patentierter Ausführung eingesetzt. Dabei haben Mehrkammergeräte vor allem durch die kontrollierte Zirkulation des Spülstroms Vorteile gegenüber rein mechanischen Verfahren. Der Wirkungsbereich erstreckt sich von den Filterschlitzten auch auf Teile des Ringraums. Aufgrund der vielen verschiedenen Ausführungen sind Studien zur Eindringtiefe nicht bekannt.

### **7.4.1.7 Injektion mit flüssigem oder gasförmigem Kohlendioxid**

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Vor der Durchführung dieses in Amerika entwickelten Verfahrens ist eine wasserrechtliche Erlaubnis einzuholen, da eine Chemikalie ins Grundwasser eingeleitet wird. Die Hauptwirkung dieses Verfahrens wird durch Frostsprengung erzielt, die durch das Gefrieren von in Inkrustationen enthaltenem Wasser ausgelöst wird. Dazu wird zuerst ein Packer im Filterrohr installiert und dieses dadurch abgedichtet. Das in diesem Abschnitt enthaltene Wasser wird dann durch Einblasen von gasförmigem Kohlendioxid verdrängt. Anschließend wird tiefkaltes, flüssiges Kohlendioxid eingefüllt. Das gefrierende Wasser in den Inkrustationen erfährt eine Volumenausdehnung, welche die Inkrustationen mechanisch beansprucht. Dieser Vorgang kann mehrfach und abschnittsweise wiederholt werden. Der wichtigste Punkt bei diesem Verfahren ist die Arbeitssicherheit. Kohlendioxid kann zu Erstickungen führen und sammelt sich wegen seiner höheren Dichte in Senken und Schächten. Darum sind eine zusätzliche Belüftung der Brunnenschächte und ein Gaswarngeräte auf jeden Fall einzusetzen. Da sich ein Teil der Kohlensäure im Wasser löst, kann der pH-Wert des Wassers vorübergehend sinken. Ebenso kann sich die Karbonathärte erhöhen. Davon abgesehen hat der Einsatz der Kohlensäure eine positive mikrobizide Wirkung. Houben & Treskatis (2003) haben in einer Laboruntersuchung die Wirkung von Stickstoff auf stark verhärtete Inkrustationen getestet und sind zu einem wenig zufriedenstellenden Ergebnis gekommen.

### **7.4.2 Druckwellen- und Impulsverfahren (dynamische Verfahren)**

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Der Einsatz von Impulsverfahren basiert auf der Tatsache, dass Wasser quasi inkompressibel ist und Impulse sehr gut überträgt. Diese werden entweder als Einzelimpulse durch Sprengungen oder rasche Entspannung von komprimierten Fluiden oder durch periodisch wiederholte Impulse z.B. durch Ultraschall ausgelöst. Erstere erreichen eine Frequenz von ca. 20-40 Hz, Ultraschall kommt auf ca. 20.000 Hz. Durch die unterschiedlichen elastischen Eigenschaften der Bestandteile des Brunnens (Ausbaumaterialien, Filterkies und Inkrustationen), die die Impulse in jeweils individuelle Schwingungsraten umwandeln, kommt es zur Ablösung von Inkrustationen. Bei wiederholten Impulsen können sich zusätzlich Resonanzeffekte entwickeln.

Gewöhnlich wird eine mechanische Vorreinigung vor der Anwendung eines Impulsverfahrens eingesetzt. Nach jedem Impuls sollte abschnittsweise abgepumpt werden, um gelöste Ablagerungen zu entfernen. Bei allen nachfolgenden Verfahren kann es zudem zu Setzungen der Filterkiesschüttung kommen.

#### **7.4.2.1 Sprengstoff**

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Zur Brunnenregenerierung eingesetzt werden geringe Mengen (-100g TNT-Äquivalent) von Sprengstoffen auf anorganischer und nitro-organischer Basis, z.B. Ammoniumnitrat und Trinitrotoluol. So entstehen nur geringe Erschütterungen, die benachbarte Gebäude nicht beschädigen. Durch die Sprengung entstehen Gase, die in Form von Gasblasen im Brunnen aufsteigen und an die Atmosphäre abgegeben werden. Bei der Reaktion von Ammoniumnitrat entstehen Stickstoff und Sauerstoff. Nitrosprengstoffe produzieren Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Stickstoff sowie geringe Mengen Stickoxid, Wasserstoff und Sauerstoff. Die Gase werden an die Atmosphäre abgegeben und eventuell gelöste Reste werden durch das Abpumpen entfernt, sodass sich keine chemische Veränderung des Grundwassers ergibt. Das Aufsteigen der Reaktionsgase hat zudem einen Reinigungseffekt. Denn die aufsteigende Blase wirkt wie ein Kolben, der am Weg nach oben abgelöstes Material mitreißt. Dieses Phänomen kann auch zum Ausbringen von chemischen Regeneriermitteln genutzt werden.

Die Sprengladung wird mittels Sprengschnur und Zentrierkörben in den Brunnen eingebracht. Dabei beträgt die Ladungsstärke zwischen 5-25g Sprengstoff pro Meter Filterrohr. Dieses Verfahren eignet sich sowohl für Vertikal- als auch für Horizontalbrunnen, kann aber bei spröden oder vorgeschädigten Ausbaumaterialien einen größeren Schaden hervorrufen. Dieser Effekt kann aber wiederum bei der Sanierung genutzt werden. Die Regenerierung von Steinzeug, Pressholz- und Kunststofffiltern durch Sprengungen ist generell nicht zu empfehlen. Die Anwendung bei Kiesklebefiltern bedarf besonderer Vorkehrungen.

Der Einsatz von Sprengstoffen unterliegt gesetzlichen Vorschriften, die die Anwendung durch einen Sprengberechtigten vorschreiben. Außerdem sind geplante Sprengarbeiten der Behörde rechtzeitig anzuzeigen. Aus Gründen der Arbeitssicherheit sind Brunnenschächte zudem zu belüften.

#### **7.4.2.2 Explosion von Gasgemischen**

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Neben der Anwendung von Sprengstoff gibt es die Möglichkeit Wasser im Brunnen durch elektrolytische Zersetzung mittels Gleichstrom in Wasserstoff und Sauerstoff zu zerlegen. Die entstehenden Gase sammeln sich unter einer Tauchglocke, wo sie entzündet werden, um dann explosionsartig zu Wasser zurück zu reagieren. Dadurch entstehen Druckimpulse, die Inkrustationen lösen können. Die Menge der produzierten Gase steuert dabei die Stärke der

entstehenden Druckkräfte. Dieses Verfahren hat einen eher lokalen Wirkungsbereich, kann aber in einem Arbeitsschritt mehrfach wiederholt werden.

### 7.4.2.3 Ausdehnung von komprimierten Fluiden

(nach Houben & Treskatis, 2003)

In diesem Verfahren werden durch Pumpen Drücke in einer Druckkammer aufgebaut, die dann durch das plötzliche Öffnen von Ventilen an das Wasser abgegeben werden. Die schlagartige Entspannung von komprimierten Fluiden (Gasen und Flüssigkeiten) bewirkt Druckimpulse, die zwar eine geringere Reinigungswirkung als Sprengstoffe besitzen, jedoch auch bei spröden Ausbaumaterialien eingesetzt werden können. Eingesetzt werden meist Gase wie Luft oder Stickstoff bzw. Flüssigkeiten wie Wasser. Es können wiederum mehrere Impulse abgegeben werden, ohne das Gerät zu bergen. Außerdem wird das Verfahren eingesetzt, um chemische Regeneriermittel in die Filterkiesschüttung zu pressen.

Die Stadt Berlin schwört auf die Regenerierung durch das patentierte Impulsverfahren **Hydropuls®** und bezeichnet es als das effektivste nicht-chemische Regenerierverfahren. Auch bei Vergleichen von verschiedenen Verfahren in einer Studie des Grundwasserforschungszentrums in Dresden konnte das Impulsverfahren als am effektivsten hinsichtlich Eindringtiefe und gemessener Energie im Filterkiesbereich überzeugen (Bailey & Wicklein, 2008).

### 7.4.2.4 Ultraschall

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Die reinigende Wirkung von Ultraschall basiert neben der elastischen Anregung der beschallten Materialien insbesondere auf der Bildung von Kavitationsblasen. Durch die schwingenden Wassermoleküle entstehen vor allem an Grenzflächen Vakuumbüschchen, implodieren diese, so entstehen kurzzeitig Temperaturen von  $10^4$  K und Druckstöße bis  $10^4$  bar. So werden Inkrustationen gelöst, die sich an den Grenzflächen befinden. Die Ultraschallwellen werden mit elektrischen bzw. elektromagnetischen Schwingungserzeugern hergestellt. Die Schallwellen verlieren mit zunehmender radialer Entfernung von der Quelle ihre Wirksamkeit. Dennoch erreichen sie laut Studien Eindringtiefen in die Filterkiesschüttung von bis zu 25 cm. Abramova, Schneider & Maximov (2014) geben eine maximale Wirkung in etwa 23 bis 24 cm Entfernung vom Ultraschallgerät an. Untersuchungen an Versuchsständen bringen die Erkenntnis, dass die Reinigungsleistung des Verfahrens stark vom überlagernden Wasserdruck abhängt, obwohl dieser die Kavitationsereignisse eher verringert. Darum schlagen diese Versuche, statt der Kavitation, Reibungseffekte, induzierte Materialspannungen und eine Verflüssigung thixotroper Beläge als Hauptreinigungskomponenten vor. Demnach eignet sich dieses Verfahren vor allem für den Einsatz in tiefen Brunnen. Versuche zeigen außerdem, dass die Art der Ausbaumaterialien und die Korngrößen der Kiesschüttung keinen Einfluss auf die Reinigungswirkung des Verfahrens haben.

Ultraschall-Regeneriergeräte sind 0,3 bis 1,2 m lang und radial mit mehreren Ultraschallgebern besetzt. Das Verfahren wird abschnittsweise angewandt und kann mit zwischenzeitlichem Abpumpen kombiniert werden. Vor dem Einsatz der Ultraschallgeräte sollte der Brunnen mechanisch gereinigt (gebürstet und klargepumpt) werden. Die 10 bis 15 minütigen Beschallungszeiten pro Abschnitte haben zudem eine mikrobizide Wirkung.

### 7.4.3 Chemische Brunnenregenerierung

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Prinzipiell basieren chemische Regenerierverfahren auf der Umwandlung von unlöslichen Inkrustationen in eine lösliche Form. Zu diesem Zweck müssen die physikochemischen Milieubedingungen, die die Ausfällung der Stoffe ursprünglich verursacht haben, durch die

Zugabe von Chemikalien für kurze Zeit rückgängig gemacht werden. Meist führt eine Änderung des pH Wertes oder der Redox-Bedingungen zur Bildung von Inkrustationen, weswegen sich die chemische Regenerierung hauptsächlich mit diesen beiden Parametern beschäftigt. Anschließend werden die gängigen Verfahren der chemischen Regenerierung ablagerungsspezifisch beschrieben. Durch die Kombination von einzelnen Chemikalien können mehrere Ablagerungsformen auf einmal bearbeitet werden. Im Brunnenbau wird beispielsweise häufig die Kombination von Wasserstoffperoxid mit Salz- oder Schwefelsäure angewandt.

Darüber hinaus kommen verschiedene Hilfsmittel und Zusatzstoffe zum Einsatz, um die Verfahren effektiver zu machen. So gibt es z.B. Zusätze, die die Korrosionswirkung herabsetzen oder aber sogenannte Benetzungsmittel, die die Oberflächenspannung an den Grenzflächen der Inkrustationen vermindern, um den Wirkungsgrad zu intensivieren. Letztere können jedoch ein Verkeimungspotential darstellen. Um dieses Risiko auszuschließen, werden Verkeimungsinhibitoren oder Mikrobizide zugesetzt. Komplizierte Zusätze werden ebenso eingesetzt wie simple Methoden. So wird etwa Salz oder eine erhöhte Temperatur eingesetzt, um Reaktionen zu erleichtern. In den USA wird das Brunnenwasser beispielsweise durch heißen Dampf bis zu 70°C erhitzt.

Um die Methoden zu bewerten, setzten Houben & Treskatis (2003) auf zwei Parameter. Zum einen wird die Effektivität nach dem verursachten Stoffumsatz klassifiziert. Zum anderen sind hohe Reaktionsgeschwindigkeiten von Vorteil, da ein Verdriften der Chemikalien und somit eine höhere Abpumprate vermieden wird. Davon abgesehen betonen sie, dass bei der Auswahl des chemischen Regeneriermittels auch folgende Kriterien berücksichtigt werden sollen:

- Korrosive Wirkung
- Zusätzlich erforderliche Chemikalien
- Aufwand für Neutralisation
- Verkeimungspotential
- Toxizität
- Wirtschaftlichkeit

Die chemischen Regenerierverfahren sollten durch eine mechanische Reinigung vorbereitet werden und danach abschnittsweise eingesetzt werden. Ideal ist der Einsatz von Mehrkammergeräten, da sie ein Zirkulieren der Chemikalien hervorrufen und ein Verdriften verhindern. Da die eingesetzten Chemikalien meist eine höhere Dichte besitzen als Wasser, ist das Abpumpen des Sumpfs am Ende zu beachten.

Ein weiterer heikler Punkt ist die Handhabung der Chemikalien. Wie bereits beim Einsatz von Kohlendioxid erwähnt, benötigt man zum Einbringen von Chemikalien in den Brunnen und das Grundwasser eine behördliche Genehmigung (§ 32a WRG, 1959). Auch der Transport, die Lagerung und die Handhabung sind gesetzlich geregelt (Gefahrgutbeförderungsgesetz; Chemikaliengesetz, 1996). Houben & Treskatis (2003) empfehlen die Lieferung der Chemikalien vom Hersteller direkt an die Baustelle, um die aufwändigen Lagerung vor Ort zu umgehen. Ein sehr gut geschultes Personal ist ausschlaggebend, um die Sicherheit auf der Baustelle zu garantieren.

Abschließend lässt sich feststellen, dass chemische Regenerierverfahren die aufwändigsten Verfahren sind, die auch mit den meisten Gefährdungen zusammenhängen. Houben & Treskatis (2003) stellen darum die Frage der Notwendigkeit dieser Form der Regenerierung. Sie vergleichen Leistungspumpversuche nach der mechanischen und chemischen Regenerierung und kommen zum Schluss, dass durch die chemische Regenerierung 40-60% der Leistungssteigerung erreicht werden. Besonders effektiv ist die Regenerierung zudem, wenn eine zusätzliche mechanische Stufe nachgeschaltet wird.

#### **7.4.3.1 Auflösen von Eisen und Manganoxiden**

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Um kristalline Eisen und Manganverbindungen wieder in Lösung zu bringen, ist entweder eine drastische Senkung des pH-Wertes oder eine Umwandlung in besser lösliche Formen durch Komplexierung oder Reduktion nötig. Eine starke Absenkung des pH-Wertes wird durch die Zugabe von Säuren erreicht. Prinzipiell gilt: Je niedriger der pH-Wert, desto mehr Inkrustationen können gelöst werden. Allerdings können zum Schutz der Brunnenausbaumaterialien die pH-Werte nicht beliebig klein gewählt werden. In der Brunnenregenerierung eingesetzte Säuren sind beispielsweise Salzsäure, Schwefelsäure oder Ascorbinsäure. Letztere besitzt eine Zweifachwirkung als organisches Reduktionsmittel, indem sie dreiwertiges Eisen in zweiwertiges überführt. Der Einsatz von Säuren ist vor allem bei Karbonat-haltigem Grundwasser problematisch, da rund 40-54% der Säure mit Karbonaten reagieren, bevor sie die Oberfläche der Inkrustationen erreichen. Dies führt neben einer ineffizienten Regenerierung zu einem Mangel an Kalk im Grundwasserleiter. Kalk ist aber für natürliche Säurepufferungsprozesse essentiell. Theoretisch lösen sich Eisen und Manganverbindungen in geringeren Mengen auch in Basen, was für den Einsatz bei Karbonat-haltigem Grundwasser interessant wäre.

Eine weitere Möglichkeit die Kristallstruktur zu zerstören, ist das Einbringen von Molekülen oder Ionen, die ein oder mehrere Elektronenpaare besitzen, mit denen sie ein Metall-Ion aus der Struktur lösen können. Zu diesem Zweck setzt man auf organische, bidentate Liganden wie beispielsweise Carboxylsäure. Darüber hinaus können die Inkrustationen, wie zuvor schon erwähnt, durch reduktive Auflösung umgewandelt werden. Neben der Ascorbinsäure werden z.B. Sulfide, reduzierte Metallspezies oder Phenole und Fructose eingesetzt.

Die Reaktionen mit den genannten „Lösungsmitteln“ passieren nur an der Oberfläche der Inkrustationen. Dadurch können sie durch die Anwesenheit von Ionen wie z.B. Phosphat, Borat oder Arsenat bedeutend gestört werden.

#### **7.4.3.2 Auflösen von Karbonaten**

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Wie zuvor schon erwähnt, lösen sich Karbonat-haltige Ablagerungen durch den Einsatz von Salz oder Schwefelsäure. Dabei kommt es zu einer erheblich Gasentwicklung, die im schlimmsten Fall zu einem Aufschäumen und zu Tage treten der Säure führen kann. Darum sollte Säure nur unter dauernder Kontrolle zugegeben werden. Außerdem bildet sich bei der Auflösung Kohlendioxidgas, das sich wiederum in Brunnenschacht sammeln kann und durch Belüftung beseitigt werden muss.

#### **7.4.3.3 Auflösen von Aluminiumhydroxiden**

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Aluminiumhydroxide lassen sich ebenfalls durch den Einsatz von anorganischen Mineralsäuren lösen. Dabei entsteht Wasser mit seinem sehr sauren pH-Wert, das auf jeden Fall abgepumpt und vor Einleitung in Gewässer neutralisiert werden muss. Auch der Einsatz von starken Basen ist zur Lösung solcher Inkrustationen möglich.

#### **7.4.3.4 Auflösen von Sulfiden**

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Bei der Auflösung von Sulfiden, die teilweise in manchen Verockerungen eingebaut sind, entsteht beim Einsatz von anorganischen Mineralsäuren Schwefelwasserstoff. Dieser ist giftig,

aber durch den auffälligen Geruch nach „faulen Eiern“ in hohen Konzentrationen eindeutig zuordenbar. Auf Gasmesser und Belüftung sollte aber nicht verzichtet werden.

### **7.4.3.5 Auflösen von Biomasse**

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Organische Beläge werden durch den Einsatz von starken Oxidationsmitteln, wie z.B. Wasserstoffperoxid oder chlorhaltige Mittel, behandelt. Bei der so verursachten Mineralisierung der Beläge entsteht Kohlendioxid, weswegen diese Art der Regenerierung ebenfalls mit ausreichender Belüftung einhergehen sollte. Der Einsatz von Oxidationsmittel kann im ungünstigen Fall die Ausfällung von Eisen- und Manganoxiden verursachen. Zudem können beim Einsatz von chlorhaltigen Substanzen Chlorkohlenwasserstoffe gebildet werden, die trinkwasserhygienisch bedenklich sind. Bei der Desinfektion von Brunnen entwickeln die Bakterien durch den entstehenden Stress Resistenzen, die sich bei einer nachfolgenden Regenerierung bemerkbar machen. Durch das unvollständige Mineralisieren der Biomasse kann es zu erhöhten Keimzahlen im Brunnenwasser kommen.

### **7.4.3.6 Entfernung von Bohrspülungen**

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Die unvollständige Entfernung von Bohrspülungen nach dem Ausbau des Brunnens führt oft zu einer bedeutenden Abnahme der Ergiebigkeit. Um die Anlagerungen zu entfernen, reicht es jedoch nicht diese mit Säure zu behandeln. Vielmehr muss die Viskosität der Suspensionen soweit verringert werden, damit sie abgepumpt werden können. Dies kann durch die Sättigung mit Phosphationen geschehen, die die Bindung zwischen den Tonmineralien aufheben. Da das Grundwasser danach stark mit Nährstoffen belastet ist, sollte dieses Verfahren durch eine Desinfektion begleitet werden. Außerdem sollte das abgepumpte Wasser nicht ohne vorherige Aufbereitung in Oberflächengewässer eingeleitet werden.

## **7.4.4 Durchführung einer Regenerierung**

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Die Durchführung einer Regenerierung teilt sich in zwei Bereiche. Zum einen die Planung und Vorarbeiten durch den Brunnenbetreiber und zum anderen die Ausführung durch die engagierte Firma. Abgeschlossen wird eine Regenerierung dann mit einer Erfolgskontrolle, die entscheidet, ob der normale Betrieb wieder aufgenommen werden kann. Laut Steußloff (2004) gibt es in Deutschland zwei praktizierte Wege wie ein Brunnenbetreiber an eine Regenerierung herangehen kann. Zum einen kann er sich an ein Ingenieurbüro wenden, zum anderen, und das ist in Deutschland häufiger der Fall, kann er sich direkt an eine Brunnenbau- oder Regenerierfirma wenden. In beiden Fällen sollten die Unternehmen über einschlägige Kenntnisse verfügen.

### **7.4.4.1 Planung**

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Das in der DVGW angegebene Kriterium für den Leistungsrückgang, ab welchem eine Regenerierung empfohlen wird, beträgt ca.10-20%. Wird ein geeignetes Monitoring-Programm betrieben, so können der Leistungsrückgang und der Zeitpunkt für die Regenerierung individuell bewertet werden. Die Feststellung, dass mit fortschreitender Alterung der Inkrustierung erheblich mehr Aufwand für die Regenerierung betrieben werden muss, sollte ebenfalls in die Planung mit einfließen. Um den Zustand des Brunnen für die Ausschreibung der geplanten Leistung genau zu kennen, sind Kamerabefahrungen und geophysikalische, sowie mikrobiologische Messungen hilfreich. Falls eine Zustandsanalyse des Brunnens im Vorfeld

nicht durchgeführt wurde, so sollte sie in der Ausschreibung auf jeden Fall enthalten sein (Steußloff, 2004). Houben & Treskatis (2003) geben konkrete Handlungsempfehlungen für die hydraulischen und geophysikalischen Voruntersuchungen:

- Ermittlung der aktuellen Leistungsquotienten (Q-s-Diagramm)
- Überprüfung der Leistungsentwicklung seit der letzten Regenerierung
- Ermittlung des allgemeinen Bauzustandes (Kamerabefahrung)
- Heranziehen eines fachlich korrekten geologischen Schichtenverzeichnisses und technischen Ausbauplans zur Kontrolle des Ist- und Sollzustandes
- Bei tieferen Brunnen, die einen gespannten, mit einem Grundwasserstauer überdeckten Grundwasserleiter erfassen, ist die Wirksamkeit der Ringraumabdichtung zu erbringen.
- Nachweis über die Dichtigkeit von Muffenverbindungen
- Nachweis der ordnungsgemäßen Ringraumverfüllung im Filterbereich durch entsprechende geophysikalische Messungen
- Erstellung eines Zuflussprofils und Bestimmung der Durchlässigkeit im filternahen Bereich
- Bei älteren Stahlbrunnen sollte die Wanddicke der Vollwandrohre zur Bestimmung des Verrostungsgrades gemessen werden
- Ermittlung des physischen Zustandes der Kiesschüttung, vor allem bei nachlassender Ergiebigkeit oder ungleichmäßigen Zuflüssen durch geeignete geophysikalische Messungen
- Abschließend sollten anhand der zeitlichen Entwicklung der Leistungsquotienten, des baulichen Zustands und der geophysikalischen Zustandserhebung Entscheidungen über die Regenerierung bzw. Sanierung des Brunnens getroffen werden.

Brunnenregenerierungen werden prinzipiell von vielen Firmen angeboten. Um Angebote zu vergleichen, ist ein Leistungsverzeichnis essentiell. Pauschalangebote von Firmen sind unrealistisch und daher abzulehnen. Außerdem sollte drauf geachtet werden, dass die anbietenden Firmen theoretisch mehrere Verfahren durchführen können, um diese individuell auf den aktuellen Zustand des Brunnens anzupassen. Neben dem Leistungsverzeichnis sind vom Brunnenbetreiber folgende Unterlagen, falls vorhanden, an die angefragten Unternehmen weiterzuleiten:

- Lageplan mit Anfahr- und Umfeldsituation des Brunnens
- Ausbau und Schichtenprofil
- Geophysikalische Messprotokolle
- Videomaterial der Kamerabefahrungen
- Leistungscharakteristik des Brunnens
- Hydrochemische Analyse des Rohwassers, Test auf mikrobiologische Aktivität
- Mineralogische oder geochemische Belagsuntersuchungen
- Angaben zur wasserrechtlichen Situation und zu den Anforderungen und Nebenbestimmungen aus dem Bescheid zur chemischen Regenerierung
- Angabe zur angefragten Verfahrenstechnik und ggf. Regeneriermittel (bisherige Erfahrungen)
- Schutzzonenaufgaben
- Angaben zur Entsorgung der Restlösung, der abgepumpten Feststoffe und gelösten Inkrustationen, sowie des klaren Pumpversuchswassers

- Angaben zur Entsorgung von anfallenden wassergefährdenden Stoffen
- Angaben zur gewünschten Art der Kontrolle nach der Regenerierung
- Technische Vertragsbedingungen des Brunnenbetreibers
- Kaufmännische Vertragsbedingungen des Brunnenbetreibers
- Zertifizierungsanforderungen
- Anforderung einer aktuellen Referenzliste

Die Leistungsanfrage ist dann von den Firmen durch Ausfüllen des Leistungsverzeichnisses und Unterzeichnen des Vertrages zu bearbeiten. Außerdem sind zusätzliche Unterlagen zum vorgeschlagenen Verfahren und notwendigen Untersuchungen sowie zum benötigten Personal und Platzbedarf und ein zeitlicher Bauablauf beizufügen.

Nicht zu vergessen ist bei chemischen Regenerierungen ein zeitgerechtes Ansuchen um Genehmigung des Verfahrens (§ 32a WRG, 1959) durch den Brunnenbetreiber (Wasserrechtsbesitzers) bei der zuständigen Behörde. Mechanische Regenerierungen sind laut Etschel (2008), zumindest nach deutschem Recht, nur anzeigepflichtig. In Österreich wird der Begriff der Regenerierung im Wasserrechtsgesetz nicht explizit erwähnt. Jedoch gilt die Instandhaltungspflicht nach § 50. (1) WRG (1959), die besagt, dass Wasserberechtigte ihre Wasserbenutzungsanlagen einschließlich der dazugehörigen Wasseransammlungen etc. in dem der Bewilligung entsprechenden Zustand und, wenn dieser nicht erweislich ist, derart zu erhalten und zu bedienen, dass keine Verletzung öffentlicher Interessen oder fremder Rechte stattfindet.

### **7.4.4.2 Durchführung**

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Besonderes Augenmerk ist auf eine übersichtliche und saubere Baustelleneinrichtung, vor allem bei der Ablage der ausgebauten Pumpen, Steigleitungen und Armaturen, zu legen. Bei Stillstandzeiten ist außerdem darauf zu achten, dass der Brunnen provisorisch verschlossen wird. Die Sicherheitsvorschriften sind, vor allem bei der chemischen Regenerierung, stets von allen Beteiligten einzuhalten. Nach Abschluss der Arbeiten ist von der ausführenden Firma ein Protokoll über die vollständige Entfernung der Chemikalien und ihrer Rückstände im Brunnen herzustellen. Außerdem ist die vorschriftsmäßige Entsorgung und Neutralisation der eingesetzten Chemikalien nachzuweisen. Darüber hinaus sind die Forderungen der Schutzzonenverordnung einzuhalten und abgepumptes Wasser und anfallende Schlämme je nach Bewilligung zu behandeln.

Abschließend wird eine Leistungskontrolle durchgeführt, die die Brunnenleistung vor und nach der Entnahme vergleicht. Ein Vergleich mit dem Neubauzustand sollte zusätzlich stattfinden. Grundsätzlich eignen sich zur Kontrolle der Regenerierung Leistungspumpversuche, die insbesondere zwischen kombinierten Verfahren und strangweise wertvolle Informationen liefern können. Geophysikalische Untersuchungen und Kamerabefahrungen liefern Aussagen über den Erfolg der Regenerierung. Dies erleichtert auch die Ursachenforschung von aufgetretenen Problemen.

Huber & Daffner (2012) zeigen den Ablauf einer Regenerierung eines HFB in Trockenaufstellung, der nach 7 Jahren erstmalig regeneriert wurde, von der Ausschreibung bis zur Erfolgskontrolle. Dabei wurde ein speziell entwickeltes Schleusensystem eingesetzt, welches den fortlaufenden Betrieb des Brunnens garantierte. Die Stränge zeigten aufgrund der unterschiedlichen Grundwasserbeschaffenheit unterschiedlichste Ausprägungen von Alterungserscheinungen und konnten laut Erfolgskontrolle durch den Einsatz von Hochdruckspülung, Entsandung und anschließendem Ausspülen der Filterrohrsohle zufriedenstellend gereinigt werden.

#### **7.4.5 Probleme nach der Regenerierung und ihre Ursachen**

(nach Houben & Treskatis, 2003)

Probleme, die nach der Regenerierung auftreten können, sind etwa die Veränderung der Rohwasserbeschaffenheit oder eine Verkeimung des Brunnens. Auch eine unerwartet geringe Leistungssteigerung nach der Regenerierung oder eine nur kurzzeitige Wirkung sind möglich. Häufige Ursachen von Veränderungen der Wasserqualität sind beispielsweise ein Verbleiben von Regeneriermittel im Brunnen oder das Freilegen von zuvor verlegten Filterabschnitten. Im schlimmsten Fall ist es durch die Regenerierung zu erheblichen Schäden an den Ausbaumaterialien gekommen, die die Grundwasserbeschaffenheit auf unterschiedliche Art verändern. Verkeimungen können durch den Einsatz von organischem Regeneriermittel oder durch nachlässige Sauberkeit auf der Baustelle auftreten. Eine geringe Leistungszunahme kann mehrere Gründe haben. Zum einen kann die eingesetzte Maßnahme und ihre Durchführung ungenügend oder mangelhaft gewesen sein. Zum anderen können Änderungen im Wasserhaushalt der Grund für eine nachlassende Ergiebigkeit sein. Grundsätzlich sollte die Leistungssteigerung aber absolut gesehen werden, denn oft sind in die Jahre gekommene Brunnen beispielsweise durch vollständige Kolmation der Filterkiesschüttung nicht mehr vollständig zu regenerieren. Nicht nachhaltige Regenerierungen gründen sich oft auf unvollständige Entfernung der Ablagerungen, eine geringe Eindringtiefe in die Filterkiesschüttung und entstandene Schäden an den Ausbaumaterialien.

## 7.5 Sanierung und Rückbau

Reicht eine Regenerierung zur Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit nicht aus oder sind durch sie bauliche Schäden entstanden so wird die bauliche Sanierung oder der Rückbau eines Brunnens in Betracht gezogen (Houben & Treskatis, 2003).

Wie zuvor schon erwähnt, sind Indikatoren für Schäden an den Ausbaumaterialien plötzlich auftretende Mengen von Feststoffen oder Mikroorganismen. Eine allmähliche oder schlagartige Zunahme von anthropogen verursachten Wasserinhaltsstoffen, sowie ein abrupter Rückgang der Ergiebigkeit deuten ebenfalls an, dass etwas nicht stimmt (Houben & Treskatis, 2003). Ein umfassendes Monitoring im zeitlichen Verlauf, mechanische Untersuchungen (Tiefenlotung, Kalibermessung, Wachsabdrücke, Vertikalitätsmessungen), Kamerabefahrungen und geophysikalische Messungen helfen dann bei der Ursachenforschung und der Bestandsaufnahme (Houben & Treskatis, 2003; DVGW W 135, 1998). Letztere stellt die Grundlage für die zukünftige Verwendung des Brunnens dar. Das Ausmaß der gefundenen Schäden, von Ausbaubeschädigungen bis Sandführung und Setzungen, ihre Reparaturmöglichkeiten und die Prognose über eine zukünftige Entwicklung entscheiden schließlich über den Erhalt bzw. die Sanierung oder die Aufgabe bzw. den Rückbau des Brunnens (7.3.5).

Bei der Ausführung der Sanierungs- und Rückbauarbeiten ist besonders darauf zu achten, dass der geologischen Schichtenaufbau bewahrt oder wiederhergestellt wird. Vor allem eine ursprünglich vorhandene Grenze zwischen Grundwasserleiter und Grundwassernichtleiter ist wieder dicht herzustellen. Außerdem sollte der Ringraum eines Brunnens beständig abgedichtet sein.

Kommt eine Sanierung in Frage, so ist ein Sanierungskonzept zu erstellen. Dieses ist an die jeweilige Situation der Anlage anzupassen und hinsichtlich Machbarkeit, technischer Risiken und wasserrechtlicher Situation zu bewerten (Houben & Treskatis, 2003).

### 7.5.1 Sanierungsmethoden

Die bauliche Sanierung behandelt Schäden an den Ausbaumaterialien, durch die der Zufluss von Wasser aus unerwünschten Quellen ermöglicht wird und so die Standsicherheit sowie die Leistung des Brunnens vermindert. Laut Houben & Treskatis (2003) sind die Hauptursachen für Schäden an den Ausbaumaterialien die Materialermüdung, ein fehlender oder fehlerhafter Korrosionsschutz, generelle Materialfehler, aber auch Verarbeitung und Herstellungsfehler, sowie Bemessungs- und Bedienungsfehler (beim Betrieb oder beim Pumpenein- und -ausbau). Dementsprechend können Sanierungen einerseits einfach durch Materialtausch gelöst werden, andererseits kann es nötig sein, den gesamten Brunnen zu erneuern. Nicht zu vergessen ist laut Houben & Treskatis (2003) auch die Möglichkeit, dass ungewünschte Zuflüsse von Fremdwasser auch aus dem Brunnenumfeld kommen können. So müssen undichte, aufgegebene Bohrlöcher, Grundwassermessstellen oder Brunnen sowie Umläufigkeiten im Bereich ehemaliger Baugruben, des Abschlussbauwerks und des Spülungsteiches aus der Bauphase des Brunnens oder Gehölzwuchs in Brunnennähe als Ursachen für den Zufluss und den Austausch mit Brunnen fremdem Wasser ausgeschlossen werden.

Grundsätzlich gibt es drei Überbegriffe für Methoden der Sanierung, die versuchen Schadensursachen zu beseitigen. Diese sind Einschübe, Überbohrungen und das Aufbohren. Abbildung 7.23 zeigt die verschiedenen Methoden und ihre Einsatzmöglichkeiten bei verschiedenen Ausbaumaterialien nach Houben & Treskatis (2003). Darüber hinaus nennt die DVGW W 135 (1998) die Regenerierung als vorbereitende Maßnahme für die Sanierung sowie hydraulische Methoden, zu denen im Lockergestein das Intensiventsanden gezählt wird. Ansonsten unterscheidet das Regelblatt zwischen Teil- und Komplettsanierung. Dabei gehören zu den Teilsanierungen:

- a. Veränderungen an Pumpe und Steigleitungen z.B.: durch Veränderung der Einbautiefe oder durch Einbau einer Saugstromsteuerung.
- b. Einbau von Einschubverrohrungen im Vollrohr- und Filterrohrbereich
- c. Nachdichten von Ringraumabdichtungen z.B. in zuvor frei gebohrte Ringräume, Verpressungen durch perforierte Rohrtouren oder über Lanzen
- d. Anbringen von Innenmanschetten zur Abdichtung undicht gewordener Rohrstücke- und Verbindungen

Zu den Komplettsanierungen zählen:

- e. Die vollständige Entfernung von Rohrtouren
- f. Das Ausbohren der Ringraumverfüllung
- g. Der Neuausbau des Bohrlochs mit Filter- und Vollwandrohren und die dafür erforderlichen Ringraumverfüllungen

Ausbaumaterial	Verfüllung entspr. geolog. Bohrprofil	Rückbau der Einbauten		Einbau und Reparatur von Ringraumbarrieren	
		überbohren schneiden ausbauen	zerbohren	über Lanzen Verpressungen	Perforationen Verpressungen
Stahl roh	x	x	—	x	x
Stahl beschichtet	x	x	—	x	x
Edelstahl	x	x	—	x	x
Kunststoff	x	o	x	o	o
Steinzeug	x	—	x	o	o
Pressholz	x	o	x	o	o

Perforation im  
Schutz der  
Verpressmasse

Abbildung 7.23: Übersicht der Sanierungsmethoden und deren Anwendung bei unterschiedlichen Materialien (Houben und Treskatis, 2003)

Ad a) Bei der Saugstromsteuerung werden durch das Einschleiben eines Filterrohrs Bereiche erhöhter Anströmung partiell abgesperrt und der Zufluss über Bereiche mit gewöhnlich geringerer Anströmung geleitet. So wird der Förderstrom gleichmäßig über die Filterstrecke verteilt und Anströmspitzen, die oft der Grund für Sandführung sind, vermieden (Tholen, 1997).

Ad b) Bei Einschubverrohrungen unterscheidet man Voll- oder Filterrohreinschübe. Erstere werden bei korrodierten oder beschädigten Vollwandrohren als zusätzliche Stützung und Abdichtung eingesetzt. Dabei muss der Raum zwischen dem Einschubrohr und dem Vollrohr zementiert werden. So kann das Vollwandrohr auch in beliebiger Tiefe eingeschoben werden und nach Aushärten des Zements nach oben abgeschnitten werden (Tholen, 1997). Filterrohreinschübe dienen der Stützung von unbrauchbar gewordenen Filtern. Der entstandene Ringraum zwischen neuem und altem Filter muss verkiest werden (Tholen, 1997). Laut DVGW W 135 muss bei der Dimensionierung zudem darauf geachtet werden, dass durch die Verkleinerung des Durchmessers, die Funktionsfähigkeit des Brunnens nicht beeinträchtigt wird. Laut Conrad (2010) hat sich der Einsatz von Wickeldraht-Konstruktionen aus Edelstahl als Einschubverrohrung bei Vertikal- und Horizontalfilterbrunnen in den letzten 10 Jahren bewährt. Nach dem Einbau wird der Altfilter durch Sprengschocken aufgerissen und der Brunnen anschließend durch Intensiventnahme wieder leistungsfähig gemacht.

Ad c) Das Nachdichten von Ringräumen ist bei falsch platzierten, defekten oder nicht vorhandenen Ringraumabdichtungen erforderlich. Prinzipiell gibt es zwei Arten des Nachdichtens. Am einfachsten wird in den freigebohrten oder frei gespülten Ringraum ein Überbohrrohr abgeteuft und auszementiert. Das Überbohrrohr kann im Brunnen verbleiben, ansonsten wird es abgetrennt und entfernt. Die zweite Möglichkeit ist das nachträgliche Verpressen des Ringraums mit Lanzen von der Oberfläche aus und durch perforierte Vollwandrohre. Dieses Verfahren ist allerdings schwer zu kontrollieren und eignet sich vor allem für tiefe Brunnen mit Stahlfilterrohren und bei der Sanierung an Engstellen (Tholen, 1997; Houben & Treskatis, 2003)

Die Teilverfüllung von Filterabschnitten ist ebenfalls möglich. Ihr Erfolg hängt laut DVGW W 135 (1998) von der örtlichen geologischen Situation, den Salinitätsgrenzen, den Bereichen der unerwünschten Zuflüsse, dem Zuflussprofil, der Länge der Filterstrecke und der Durchlässigkeit ab.

Ad e-g) Bei der Neuverfilterung wird die gesamte Filtergarnitur ersetzt. Das geschieht in 3 Stufen. Zuerst wird das vorhandene Filterrohr ausgebaut. Metallische Rohre werden überbohrt oder ausgespült und anschließend gezogen. Nichtmetallische Rohre werden meist zerbohrt und dann mittels Greifer entfernt. Danach wird der Brunnen aufgebohrt. Dabei werden die Filterkiesschüttung und der erweiterte Filterkiesraum abgetragen. Um Verockerungen zu entfernen, hilft oft schon ein um 200 mm größerer Ringraumdurchmesser. Abschließend werden die neuen Filter eingesetzt (DVGW W 135, 1998).

Überbohrarbeiten beginnen mit dem Entfernen der Ringraumschüttung durch ausbohren oder Absaugen. Dabei sollte die Grenzschicht zwischen Kiesschüttung und anstehendem Gestein mit entfernt werden, um ältere Ablagerungen zu entfernen. Danach wird die Bohrung durch Spülung gesichert, die Rohre abgeschnitten und gezogen. Reicht die Zugfestigkeit der Filterrohre nicht aus, um sie als Ganzes aus dem Brunnen zu ziehen, so sollte abschnittsweise vorgegangen werden. Nach Entfernung der Ausbauten wird der Brunnen neu ausgebaut, entsandet und hydraulisch getestet (Houben & Treskatis, 2003).

Zu einer Komplettsanierung zählt zudem die Sanierung von Abschlussbauwerken. Laut DVGW W 135 (1998) sind die einzusetzenden Baustoffe auf ihre Trinkwasserverträglichkeit zu prüfen und Abdichtungsmaßnahmen an Rohren, Kabeln und Brunnenköpfen durch nachspannbare Abdichtungen auszuführen. Bei HFB werden im Rahmen einer Komplettsanierung außerdem die Schieber sowie eventuell vorhandene Schiebergestänge bzw. Einstiegsleitern modernisiert. Die erforderlichen Maßnahmen werden bei HFB in Trockenarbeit mit Schleusen bzw. in Nassarbeit in Zusammenarbeit mit Tauchern durchgeführt (pigadi GmbH, 31.08.2017).

In Deutschland werden laut Houben & Treskatis (2003) am häufigsten Einschubverrohrungen, Verpressarbeiten und das Überbohren mit teilweisem oder komplettem Neuausbau des Bohrlochs zur Sanierung eingesetzt. Meist aus Gründen von undichten Ringraumsperren und Korrosion.

Die Abschätzung der ausführungstechnischen und wirtschaftlichen Machbarkeit der angestrebten Maßnahme setzt eine gute Kenntnis über die Verfahren und ihre Ausführungsrisiken voraus. Darüber hinaus sollten Sanierungsmaßnahmen nur nach Abschätzung dieses Ausführungsrisikos, des damit verbundenen Kostenrisikos für den Bauherrn und einer Prognose über den Sanierungserfolg geplant werden. Außerdem sind die eingesetzten Maßnahmen abhängig vom Brunnentyp, der Teufe, der Qualität der Ausbaumaterialien und vom zur Verfügung stehenden Raum (Houben & Treskatis, 2003). Laut Rübesamen (1997, zit. in Houben & Treskatis, 2003) sollten auch die Art des Grundwasserleiters und die Art der Nutzung des Brunnens, als Trink oder Brauchwasserbrunnen, in die Risikobeurteilung mit einfließen.

Houben & Treskatis (2003) kategorisieren das Ausführungsrisiko wie folgt:

- Geringes Ausführungsrisiko ist gegeben, wenn der Brunnen und die Kiesschüttung grundsätzlich richtig bemessen wurden und die Grundsubstanz des Brunnenbauwerks nicht durch Korrosion oder mechanische Defekte beschädigt ist. Hier werden oft Teil- und Volleinschübe verwendet. Diese Methode wird auch zur Sanierung von HFB angewendet, wenn die Standsicherheit teilweise gefährdet ist. Teileinschübe und Manschetten dichten lokale Defekte.
- Ein mittleres Ausführungsrisiko ist bei Maßnahmen gegeben, die eine falsch bemessene Filterkiesschüttung und unpassende Filterschlitzweiten sanieren soll. Ausbohren der Brunnenrohtour, verloren eingebaute Filterrohre und Überbohrtechniken zählen zu solchen Verfahren.

Das Ausführungsrisiko steigt mit dem Kostenrisiko für den Bauherrn, vor allem bei Verpress- und Perforationsarbeiten und Überbohrarbeiten mit dem Ziel der vollständigen Entfernung der alten Brunnenbauten. Zudem steigt das Ausführungsrisiko mit der Tiefe.

Sanierungsmaßnahmen können die Neubaukosten eines Brunnes übersteigen. Laut Tholen (1997) sind Sanierungen, durch die beschränkte wasserrechtliche Situation, aber nicht sofort zu verwerfen. Houben & Treskatis (2003) stellen eine Faustregel auf, nach der ein Neubau in Erwägung gezogen werden sollte, sobald eine Sanierung mehr als die Hälfte der Neubaukosten ausmacht, vor allem weil Schwierigkeiten bei der Sanierung nicht auszuschließen sind und zu einer erheblichen Kostensteigerung führen können. Allerdings darf der ordnungsgemäße Rückbau bei Neubau des Brunnens nicht außer Acht gelassen werden.

Darüber hinaus sind Sanierungen im WRG geregelt. Laut § 21a kann die Behörde zum Schutz des öffentlichen Interesses trotz bestehender Bewilligung Anpassungen an den Stand der Technik der Anlagen fordern, nicht aber wenn ein bereits genehmigter Sanierungsplan oder ein Sanierungsprogramm vorliegt. Bei der Sanierung sind analog zur Regenerierung außerdem die Einbringungsbeschränkungen laut §32a zu beachten. Die Sanierung von Altanlagen wird im WRG (1959) nur für Abwasserentsorgungsanlagen genauer definiert. Nach §33c gilt dann, dass ein Sanierungsprogramm für sanierungspflichtige Anlagen innerhalb von 2 Jahren vom Besitzer des Wasserrechts vorgestellt werden muss, sonst ist die Anlage stillzulegen. Für Wasseranlagen aller Art gilt aber die Instandhaltungspflicht (§50ff, WRG, 1959). Demnach haben die Wasserberechtigten ihre Wasserbenutzungsanlagen einschließlich der zugehörigen Wasseransammlungen und sonstigen Vorrichtungen in dem der Bewilligung entsprechenden Zustand zu erhalten und zu bedienen, sodass keine Verletzung öffentlicher Interessen oder fremder Rechte stattfindet. Die Instandhaltungspflicht endet erst mit der Beseitigung der Anlage.

### **7.5.2 Rückbaumethoden**

Laut Houben & Treskatis (2003) ist das Ziel des Rückbaus die Aufgabe des Brunnens aufgrund von nachlassendem Wasserbedarf, einer ungenügenden Wasserqualität, großräumige Grundwasserabsenkungen oder von wirtschaftlichen Überlegungen im Zusammenhang mit dem Neubau eines Brunnens. Laut WRG (1959) muss nach Erlöschen der wasserrechtlichen Bewilligung die Anlage beseitigt, der ursprüngliche Zustand wieder hergestellt oder sonstige notwendige Vorkehrungen getroffen werden, um den Schutz öffentlicher Interessen und fremder Rechte zu gewährleisten.

Laut Tholen (1997) hängt das Rückbauverfahren von der Brunnenbauart, dem Bohrverfahren im Neubau, dem Ausbaumaterial, der Bohrlochgeometrie und der Brunntiefe ab. Abbildung 7.24 zeigt die Möglichkeit der Rückbaumethoden nach der Art des Ausbaumaterials.

Rückbaumethoden werden grundsätzlich eingeteilt in Verfüllung, Rückbau der Einbauten und den Einbau und die Reparatur der Ringraumbarrieren. Laut Tholen (1997) kann nur ein

ordnungsgemäß hergestellter Brunnen, gefahrlos verfüllt werden, damit betont er abermals die Wichtigkeit der Ringraumabdichtung. Außerdem betont er, dass auch fachgerecht ausgeführte Brunnen verfüllt werden müssen, da durch Korrosion oder mechanische Defekte mit der Zeit Undichtigkeiten entstehen können und viele Brunnen in unmittelbarer Nähe zu aktiven stehen.

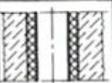
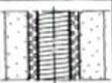
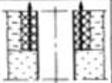
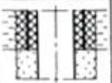
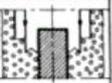
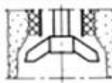
		Einschübe		Überbohrungen			Aufbohren	im freiem Bohrloch
		Vollwandrohr Ringraum- verpreßung	Filter Ringraum- verkiesung	Vollwandrohre für Nachdichtung	Vollwandrohre mit Sperrohr	Filter überbohren / zerbohren	Kiesraum unterschneiden	
Ausbau- material								
Stahl	roh	x	x	x	x	x	—	x
	be- schichtet	x	x	x	x	x	—	x
Edelstahl		x	x	x	x	x	—	x
Kunststoff		x	x	o	o	o	x	o
Steinzeug		x	x	—	—	—	x	o
Pressholz		x	x	o	o	o	x	o

Abbildung 7.24: Übersicht der Rückbaumethoden und deren Anwendungsmöglichkeiten bei verschiedenen Materialien

- a. Verfüllung des Brunnens: Dieses Verfahren wird angewandt, wenn der Brunnen noch über hydraulisch wirksame Ringraumabdichtungen verfügt oder solche nicht notwendig sind, da der Brunnen keine schützende Deckschicht tieferer Grundwasserhorizonte durchteuft. Die Verfüllung wird schichtendifferenziert ausgeführt (Houben & Treskatis, 2003). Tholen (1997) schlägt vor, dass im Bereich der Filterrohre mit entsprechendem Kies aufgefüllt wird und im Bereich der Aufsatzrohre Ton oder Zement zum Einsatz kommt. Alternativ merkt er an, dass auch der gesamte Brunnen mit Zementsuspension verfüllt werden kann. Laut DVGW W 135, (1998) sollte der Verfüllungsplan mit der Behörde abgestimmt werden. Fremdkörper und Einbauten (Pumpen) sind zu entfernen. Ist dies nicht möglich, so sind sie durch Zementation einzukapseln. Abgeschlossen wird die Verfüllung durch eine 1-2m dicke Betonabdichtung.
  
- b. Rückbau der Einbauten: Der Rückbau der Einbauten erfolgt durch Überbohren, Schneiden und Ausbauen oder durch Zerbohren des Brunnenausbaus. Das einfache Ziehen des Ausbaustrangs ist nur bei flachen Brunnen wirtschaftlich und technisch möglich (Houben & Treskatis, 2003). Zuerst werden die Einbauten aus dem Ringraum entfernt. Dies geschieht durch Herausspülen oder „Absaugen“ durch Mammutpumpen, wenn keine Tonsperren vorhanden sind. Danach werden die Rohre z.B. mittels Fangbirne gezogen oder mittels Greifer herausgebohrt. Sind Tonsperren vorhanden und wäre ein Herausbohren nicht wirtschaftlich, so wird der Ausbau überbohrt. Dabei muss die Schneide des Überbohrrohrs den Ringraum bis zur ehemaligen Bohrlochwand erfassen (Tholen, 1997). Laut Houben & Treskatis (2003) erfolgt das Überbohren des gesamten Ausbaus mit anschließender Verfüllung des Bohrlochs bei Brunnen, bei denen die Stockwerkstrennung durch andere Sanierungsverfahren nicht sichergestellt werden kann. Das Zerfräsen und Zerbohren des Ausbaustranges wird bei Brunnen mit geringer Teufe und PVC Ausbau alternativ zum Überbohren durchgeführt (Houben & Treskatis, 2003).

Abschließend erfolgt bei allen Verfahren eine schichtenspezifische Verfüllung des Bohrlochs.

- c. Einbau und Reparatur der Ringraumdichtung: Wenn aus Platzgründen ein Überbohren nicht möglich ist, sollte laut DVGW W 135 (1998) eine Loch- oder Schlitzperforation auf Höhe der Ringraumsperre aus dem Brunneninnenraum mit anschließender Verpressung erfolgen. Die Perforation wird abhängig von der Wandstärke mechanisch oder durch Schussperforation ausgeführt. Danach wird der zu verpressende Bereich mit Doppelpackern abgeschirmt und durch Injektionspumpen eine Tonmehl-Zementsuspension eingebracht. Der Verpressdruck und die Menge sollten dabei registriert werden. Nach dem Aushärten wird der darüberliegende Bohrlochabschnitt schichtendifferenziert verfüllt. Dieses Verfahren kann auch bei Brunnen mit großen Tiefen eingesetzt werden (Houben & Treskatis, 2003).

Die Entscheidungen über den Rückbau und die Wahl des Verfahrens werden oft von den Behörden getroffen. Je nach Gefährdungssituation des Grundwassers kann sich der Rückbau mehr oder weniger aufwändig gestalten. Normale Rückbauarbeiten haben im Grunde ein geringes Kosten- und Ausführungsrisiko. Spezielle Rückbaumaßnahmen bei Brunnen mit höherem Gefährdungspotential bedingen oft kompliziertere Verfahren, weswegen das Kosten- und Ausführungsrisiko steigt (Houben & Treskatis, 2003).

Nach der Demontage der Schachteinbauten und des Abschlussbauwerks, der Abtrennung der Rohwasserleitung und der Verfüllung der Brunnenrohrtour mit geeigneten Schüttgütern, wird das Gelände abschließend meist mit Mutterboden bedeckt und Gras ausgesät. Um Setzungen zu vermeiden, kann bei lageweisem Einbau der Verfüllung immer wieder verdichtet werden (Houben & Treskatis, 2003).

Die Überprüfung des Rückbaus im Untergrund ist im Nachhinein nur sehr eingeschränkt möglich. Deshalb sollte laut Tholen (1997) auf eine genaue Dokumentation geachtet werden, um zumindest einen Vergleich der berechneten und eingebauten Füllmengen zur Überprüfung anstellen zu können.

## 7.6 Gegenüberstellung Theorie und Praxis

Die Praxis wird in dieser Masterarbeit durch ein Interview mit Herrn Ing. Willner von der Firma Züblin vertreten. Im Zuge des Interviews wurde auf folgende Themengebieten näher eingegangen: Tätigkeitsbereich der Firma, Brunnenmanagement, Regenerierung, Bemessung, Wahl des Vortriebverfahrens, Ausbaumaterial und Kontrolle des Vortriebs, Schachtbau, Übergabe eines Brunnens, Probleme und Fehler im Brunnenbau, Einfluss technischer Neuerungen und Ausblick.

Durch das Interview mit Herrn Ing. Willner konnte ein Einblick in die Brunnenbaupraxis gewonnen werden und es trägt dazu bei, Probleme und Herausforderungen im Horizontalfilterbrunnenbau aufzudecken und anzusprechen. Wie zuvor erwähnt, spezialisieren sich Brunnenbauunternehmen meist auf ein bestimmtes Vortriebsverfahren. Da es im Zuge dieser Arbeit nur zur Zusammenarbeit mit einer Firma gekommen ist, beziehen sich die Aussagen und Einblicke aus dem Interview auf das Ranney-(Fally) Verfahren. Aussagen zum Preussag System beruhen auf Eindrücken des Brunnenmeisters, die aus der Zusammenarbeit mit anderen Firmen entstanden sind. Außerdem wird darauf hingewiesen, dass der in der Arbeit zitierte Haertl (zit. in Nemeček, 2006) vormals der Vorgesetzte des befragten Brunnenmeisters war.

Die folgende Tabelle 7.9 stellt die wichtigsten Aussagen aus dem Interview den Grundlagen aus den vorherigen Kapiteln gegenüber.

Tabelle 7.9: Gegenüberstellung von Aussagen aus Literatur und Praxis

Abschnitt	Thema	Literatur	Praxis
Planung	Ermittlung des Wasserandrangs	<p>Balke, Beims, Heers, <i>et al.</i> (2000) definieren einen 80 m großen radialen Grenzbereich, ab welchem die Berechnung mittels DUPUIT THIEM‘ scher Brunnenformel zulässig ist und berechnen den HFB wie einen VFB mit folgender Formel:</p> $s_0 = h_H - \sqrt{2 * \phi_0}$ <p>Nemeček definiert die Absenkung im Brunnen als Summe von Zuströmwiderrstand, Einströmwiderrstand und Rohrreibung.</p>	<p>Die Formel von Nemeček wird in der Praxis verwendet. Allerdings wird dadurch nur die Absenkung, nicht aber die Menge bestimmt. Darum wird meist ein VF-Ersatzbrunnen mit einem Durchmesser, der dem Schachtdurchmesser des HFB entspricht oder geringfügig größer ist, berechnet. Die Berechnung erfolgt hauptsächlich überschlägig, liefert aber gute Ergebnisse.</p>
Planung	Ermittlung des Fassungsvermögens	<p>Das technische Fassungsvermögen eines Brunnens wird durch die erforderliche Brunnenmantelfläche bestimmt, welche wie folgt definiert ist: <math>A_{BR} = \frac{Q}{v_{zul}}</math></p> <p>Die Berechnung nach DVGW W 128 kommentiert die Geschwindigkeitsverteilung entlang der Filterstränge nicht. Geht man aber davon aus, dass die Geschwindigkeit in der Filterstrangspitze am höchsten, meist doppelt so groß ist wie die mittlere Filtergeschwindigkeit, ist, so ergibt sich durch die Berechnung eine Überdimensionierung.</p>	<p>In der Praxis gibt es im Grunde keinen Brunnen, der nicht überdimensioniert ist, da meist nach einer Faustformel, 1 Meter Filterstrang pro Liter pro Sekunde, überschlägig ermittelt wird. Oft wird mit Erfahrungswerten und überschlägigen Methoden gerechnet, die später von einem Gutachter geprüft werden.</p> <p>Grundsätzlich hat man im Brunnenbau aber zu 90 % kein Fassungsproblem, sondern ein Ergiebigkeitsproblem.</p>
Planung	Bemessung Filter	<p>Bei der hydraulischen Filterbemessung werden die Korngrößen der Filterkornschüttung, die Geometrie des Schüttungskörpers (Stützkörpers) sowie die Abmessung der Schlitz und Spaltweiten des Filterrohres abhängig vom petrografischen Aufbau des Grundwasserleiters und der Grundwasserströmungsprozesse bemessen.</p>	<p>Die Filterbemessung erfolgt grundsätzlich anhand der Bestimmung der Korngröße des auf der Baustelle ausgebauten Bodens. Beim Preussag Verfahren wird dann die Kiesschüttung nach Formeln bestimmt bzw. durch Eingabe der Ausgangswerte in ein Programm ermittelt.</p> <p>Durch Erfahrung und Kenntnis des Untergrundes</p>

		<p>Berücksichtigt man die Überlegungen zur hydraulischen Kette, so zeigt die Komplexität der Realbetrachtung, dass Berechnungen, die auf Annahmen und Gleichmäßigkeit beruhen, keine realistischen Ergebnisse für die Bemessung der Filterkiesschüttung liefern können.</p> <p>Bei der Verringerung der Korngröße gegenüber der laut DVGW W 113 berechneten, einer sogenannten „Angstschüttung“, kann es zu Verringerung des <math>k_f</math>-Werts in Fließrichtung kommen.</p> <p>Problematisch in diesem Hinblick ist, dass der Brunnenbauer in Bezug auf eine mögliche Sandführung nur die technische Sandfreiheit im Betrieb nach DIN 18302 gewährleisten muss.</p> <p>Paul (2017) schlägt eine Überhöhung des <math>k_f</math>-Wertes des Schüttgutes vor, da die Durchlässigkeit durch die Brunnenalterung mit der Zeit massiv reduziert wird. Eine zu starke Erhöhung birgt allerdings das Risiko einer inneren Kolmation und in Folge der Sandführung. Die Berechnung der hydraulischen Kette versucht nun ein Optimum des <math>k_f</math>-Wertes für den geplanten Brunnen zu finden.</p>	<p>werden aber auch Verringerungen der Korngröße des Filterkieses vorgenommen, um Sandführung zu vermeiden. So enthält beispielsweise der Untergrund entlang der Donau, im 21. und 22. Wiener Gemeindebezirk dünne Sandschichten, die nur durch eine Verringerung der Korngröße nicht zu einer Sandführung führen.</p> <p>Generell gibt es das Phänomen der Angstschüttung. Aufgrund des Preisdrucks kann es außerdem zur Verwendung von Unterkorn wie zum Beispiel Split kommen.</p> <p>Eine Qualitätskontrolle des Filterkieses und des Einbaus ist jedenfalls empfehlenswert. Der ausschließliche Einsatz von rundkörnigem, gewaschenem Kies ist wichtig. Zudem muss auf den Quarzgehalt geachtet werden, um einer Versinterung vorzubeugen.</p>
Planung	Geophysikalische Untersuchungen	<p>Geophysikalische Untersuchungen können Daten zur Geologie, Aquifergeometrie und zur Wasserqualität liefern, indem sie messbare physikalische Eigenschaften der anstehenden Gesteine, wie Variationen der Dichte, der elektrischen Leitfähigkeit oder des elektrischen Potentials bestimmen. Ihr Einsatz sollte im Vorhinein genau geplant sein und man sollte sich dessen bewusst sein, dass geophysikalische Untersuchungen oft nicht zu einem universellen geologischen Modell führen, da mehrere</p>	<p>Grundsätzlich ist der Brunnenbau durch einen gewissen örtlichen Bezug entstanden. Die meisten Brunnenbauer bewegen sich nicht weiter als 50 km von ihrem Standort. In Österreich gibt es zudem 5-10 Unternehmen, die Brunnenbau österreichweit betreiben, die aber hauptsächlich eher im Aufschlussbohrbereich tätig sind. In Europa gibt es weiter ca. 10 Unternehmen, die über die Ländergrenzen hinweg arbeiten. Alle anderen bleiben an ihrem Standort, denn je besser man den Untergrund kennt, desto besser kann man wirtschaften.</p>

		<p>Interpretationen der Untersuchungsergebnisse möglich sind und komplizierte geologische Verhältnisse häufig gar nicht interpretierbar sein können. Zudem werden geringe Unterschiede der Messgrößen oft gar nicht erfasst (Balke, Beims, Heers, <i>et al.</i>, 2000, S.315). Aus diesem Grund empfiehlt sich, die Untersuchungen durch Versuchsbohrungen zu ergänzen. Dieser kombinierte Ansatz ist zudem meist günstiger, als sich nur auf Bohrungen zu verlassen, da die Anzahl der Bohrlöcher verringert werden kann.</p> <p>Der Entscheidung, wo gebohrt wird, sollte dabei folgendes einfache Konzept zugrunde liegen: Jedes Bohrloch soll die Antwort auf eine offene Frage sein. Somit soll die Zahl an ersten Aufschlussbohrungen und folgend die Kosten gering gehalten werden.</p> <p>Mit Hilfe von Beobachtungsbohrlöchern wird die Reaktion des Grundwassers auf Neubildungsereignisse im jährlichen Verlauf bestimmt. Bohrlöcher entlang von Flüssen können die Wechselwirkungen zwischen Grundwasser und Oberflächengewässer entschlüsseln. Vorteilhaft sind hierfür kontinuierlich aufzeichnende Messstellen in den Bohrlöchern. Des Weiteren können die Bohrlöcher zur Entnahme von Grundwasserproben für die Untersuchung der Wasserqualität dienen.</p>	<p>Es gibt Unternehmen, die für größere Projekte geoelektrische Messungen usw. einsetzen. Für kleinräumige Projekte sind sie jedoch meist zu aufwändig und zu teuer. Hier sollte man auf Aufschlussbohrungen setzen.</p> <p>Beim HFB braucht man grundsätzlich eine Zentralbohrung und idealerweise auch Bohrungen für ein Pegelkreuz. So kann man über zwei verschiedene Absenkmengen einen <math>k_f</math>-Wert für den Untergrund berechnen und auch die Ausdehnung der Absenkung erkennen.</p> <p>Die Kosten für eine Bohrung betragen im Grunde nur einen Bruchteil des gesamten HFB. Deshalb sollten Betreiber auf die Zentralbohrung und die Bohrungen für das Pegelkreuz auf keinen Fall verzichten.</p>
Planung	Geophysikalische Messungen	<p>Methoden der Bohrlochuntersuchung:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Geoelektrische Logs</li> <li>– Gamma Logs</li> <li>– Akustik Logs</li> <li>– Kaliber Logs</li> <li>– Dipmeter Logs</li> <li>– Flowmeter Logs</li> <li>– Photo- und Fernseh Logs</li> </ul>	<p>Geophysikalische Bohrlochkontrollen werden im HFB-Bau grundsätzlich nicht eingesetzt. Bei einer Greiferbohrung ist eine geophysikalische Untersuchung schlichtweg sinnlos. Eventuell sinnvoll ist die Anwendung von Flowmetermessungen, wenn man mehrere Horizonte hat.</p> <p>Kamerabefahrungen (Anm.: Photo und Fernsehlogs) werden in unterschiedlichen Bereichen eingesetzt. Auf</p>

## Ergebnisse und Diskussion

		<ul style="list-style-type: none"> <li>– Temperatur Logs</li> <li>– Deviations Logs</li> </ul> <p>Die passende Methode ist aufgrund der vorliegenden Gesteinsparameter, der verwendeten Bohrlochflüssigkeit (Bohrspülung) und der Bohrlochform zu wählen.</p>	<p>jeden Fall aber zur Brunnenübergabe und vor und nach einer Regenerierung und Sanierung.</p> <p>In diesem Bereich gibt es immer wieder Zusammenarbeit verschiedener Firmen.</p>
Bau	Vortriebsverfahren	<p>Grundsätzlich werden zwei horizontale Bohrverfahren für den Einsatz bei HFB unterschieden. Zum einen HBF-Bohrverfahren, genauer Ranney-, Fehlmann- und Preussag-Verfahren, die zur Gruppe der horizontalen Richtbohrtechnik gehören, und die VHB-Verfahren, die zur steuerbaren Horizontalbohrtechnik zählen.</p>	<p>Die Wahl des Vortriebverfahrens hängt zum einen von der Spezialisierung der Firma ab. Zum anderen wird sie durch den Untergrund bestimmt. In sandigen Böden werden keine Brunnen durch Ranney oder Ranney-Fally Verfahren gebaut. Ebenso unsinnig ist es neben der Donau im Preussag Verfahren vorzutreiben.</p> <p>Durch Brunnenbetreiber kann es jedoch trotzdem zur Ausschreibung von unpassenden Verfahren kommen. Es liegt dann am Brunnenbauunternehmen den Auftraggeber darauf hinzuweisen.</p> <p>Der Einsatz von VHB-Verfahren zur Trinkwassergewinnung in Österreich ist nicht bekannt.</p>
Bau	Vor- und Nachteile Vortriebsverfahren	<p>Ein wesentliches Problem beim horizontalen Vortrieb ist, dass die Bohrspitze, wegen der Längsbewegung der Verrohrung, dazu neigt nach oben auszuweichen. Damit ein Ansteigen und Krümmen der Bohrung verhindert wird und es so gar nicht zu einem Abbruch und einem erneutem Vortriebsversuch kommen muss, ist neben dem genauen Ansatz der ersten Rohre die Modifikation des Bohrkopfes an die Untergrundverhältnisse wichtig</p>	<p>Beim Preussag Verfahren kommt es durch die starkwandigen Vortriebsrohre weniger zu Abweichungen. Allerdings kommt es dadurch auch zu einer Verdichtung der Wandung (Übergang gewachsener Boden/Filterkies), was gemeinsam mit den Schlitzbrückenfiltern zu schlechten Entsandungsleistungen führt. Aber das Verfahren bietet mehrere Möglichkeiten Hindernisse wegzudrücken oder herauszuholen. Außerdem können die Filterrohre individuell angepasst werden. Preussag ist aufwändiger,</p>

## Ergebnisse und Diskussion

		Ein Vorteil des Preussag-Verfahrens ist, dass größere Durchmesser gebohrt werden können, welche auch weniger zum „Ansteigen“ während der Bohrung neigen.	kann dadurch aber auch extremere Randbedingungen abdecken.  Beim Ranney-Fally System ist man eingeschränkter. Es ist für durchlässige Aquifere ausgelegt, preisgünstig und einfach.
Bau	Filterrohrmaterial	Filterrohre werden aus Stahl, verzinktem Stahl und Edelstahl, für spezielle Zwecke, insbesondere bei aggressiven Grundwässern auch aus Kupfer, Bronze, Aluminium, oder besonderen Legierungen sowie aus hartgummi- oder kunststoffbeschichtetem Metall hergestellt. Außerdem gibt es Kunststoff-Filter, mit parallel oder senkrecht zur Rohrachse angeordneten Schlitzen.	In den HFB der 80er Jahre wurde meist rohschwarzer Stahl verbaut. Edelstahl wird erst seit den 90er Jahren vermehrt verbaut, da sich die Preise durch die höheren Abnahmen, vermehrte Produktion und erhöhte Anzahl an Lieferanten verringert haben.  Bei VFB gab es zur selben Zeit die Entwicklung von den Schlitzbrücken- hin zum Wickeldrahtfilter.  Kunststofffilter werden allerdings nur bis DN 300 ausgebaut. Größere Durchmesser werden in Edelstahl ausgeführt, da die notwendige größere Wandstärke der PVC Rohre unverhältnismäßige Kosten verursachen würde.
Bau	Filterrohrtyp	Je nach Vortriebsmethode und Untergrundverhältnissen ergeben sich bei HFB unterschiedliche Möglichkeiten für die Ausführung der Filterrohre und Schlitzweiten. Generell sollten die Filterrohre so ausgelegt sein, dass Wasser möglichst widerstandsarm, sand- und turbulenzfrei in den Brunnenraum eintreten kann, um so eine lange Lebensdauer des Brunnens zu gewährleisten. Zu diesem Zweck sollten die Filter möglichst große Öffnungen aufweisen, um eine gute Wirksamkeit der Brunnenentwicklung, sprich eine spätere sandfreie Gewinnung, zu ermöglichen. Die Filterrohre sollten außerdem entsprechende Festigkeit gegen Zug-, Druck- und Axialkräfte besitzen, korrosionsfest gegen	Die Wahl des Filterrohrtyps ist vom Verfahren abhängig. Beim Ranney-Verfahren werden nur gestanzte Rohre verwendet, während beim Preussag Verfahren Schlitzbrückenfilter eingesetzt werden. Diese haben jedoch schlechte Entwicklungs-/Regeneriereigenschaften und werden heute nur mehr für Bauwasserhaltung eingesetzt.  Der Einbau von Wickeldrahtfiltern beim Preussag-Verfahren ist theoretisch möglich. Ob diese eingesetzt werden, ist aber nicht bekannt.

		<p>Säuren und elektrochemische Vorgänge sein, aus gesundheitlich unbedenklichen Materialien bestehen und langlebig sowie preiswert sein.</p> <p>Diese Anforderungen führen zu folgenden handelsüblichen Ausführungen: Langloch- oder Schlitzfilter, Schlitzbrückenfilter, Wickeldrahtfilter</p>	
Bau	Entsandung	<p>Nach Fertigstellung des Brunnens werden Entwicklungsmaßnahmen durchgeführt, die zu einer Stabilisierung des Brunnen, zur Leistungssteigerung und zur Erhöhung der Nutzungsdauer führen sollen.</p> <p>Die fachgerechte Bemessung und der Ausbau des Brunnens sind für die Entsandungsfähigkeit und den Entsandungserfolg maßgebend.</p> <p>Ungenügende Brunnenentwicklung und Nichtberücksichtigung hydraulischer Anforderungen, wie Absenkung, Eintrittsverluste, Granulometrie und/oder Durchlässigkeit des Grundwasserleiters, sind oft die Ursache für spätere Ergiebigkeitsverluste.</p>	<p>Bei der Festlegung von Brunnenentwicklungsmaßnahmen gibt es vor allem länderübergreifend konträre Meinungen. Die Entsandung durch eine Fördermenge, welche die spätere Betriebsfördermenge um ein Vielfaches übersteigt, ist wichtig, wird jedoch von manchen Unternehmen nicht ausgeführt. Dies hat schließlich eine Leistungsminderung zur Folge.</p> <p>Wenn es kein Ergiebigkeitsproblem am Standort gibt und es trotzdem zu einer Verminderung der Leistung kommt, dann ist meist der Brunnen schlecht gebaut.</p>
Bau	Übergabe der Leistung	<p>Das maßgebende Werkzeug im Zuge der Abnahme (Kollaudation) ist der Leistungspumpversuch. Ziel dieses Betriebstests sollte das Erstellen einer Leistungskurve (Q-s-Kurve) sein, welche die Brunnencharakteristik zum Zeitpunkt der Herstellung widerspiegelt. Diese gibt Hinweise auf den optimalen und maximalen Betriebspunkt und hilft eine standortgerechte Dimensionierung zu überprüfen.</p> <p>Die Überprüfung eines Brunnens nach seiner Herstellung auf Mängelfreiheit durch betriebstechnische, geophysikalische und fernsehteknische Untersuchungen sollte eigentlich selbstverständlich sein und wird in allen Arbeits- und</p>	<p>Die Übergabe hängt prinzipiell davon ab, wie weit die Firma im Prozess beteiligt ist. Je nachdem wie der Vertrag gestaltet ist, wird zum Beispiel nur der Brunnen ohne Pumpen und Einbauten oder ein vollständiger Brunnen gebaut. Bei ersterem erfolgt die Übergabe durch den Leistungspumpversuch. Wenn auch die Sauberkeit stimmt, dann ist die Leistung übergeben. Bei einem vollständigen Brunnen, erfolgt ein Leistungspumpversuch der die Übergabe des Brunnen selbst darstellt und zusätzlich noch eine Kamerabefahrung. Und wenn der Brunnen dann vollständig ist, mit allen Einbauten, erfolgt eine zweite Übergabe, in der auch die Einbauten, wie</p>

		<p>Merkblättern gefordert.</p> <p>Grundsätzlich untersucht die abschließende wasserrechtliche Überprüfung in Österreich nur, ob die errichtete Anlage mit der Bewilligung übereinstimmt. Ist das nicht der Fall, kann ein Auftrag zur Beseitigung der Mängel erteilt werden. Geringfügige Abweichungen können allerdings nach § 121 WRG nachträglich genehmigt werden.</p>	<p>Schiebergestänge, Podest etc., überprüft werden. Abschließend, wenn die Pumpen eingebaut sind, werden Druckproben gemacht.</p> <p>In diesem Bereich gibt es vor allem bei der Zusammenarbeit mehrerer Firmen immer wieder Probleme, oft werden die Einbauten von Installationsfirmen übernommen, die zu wenig Erfahrung und Qualifikation mitbringen, jedoch am günstigsten sind.</p>
Bau	Probleme Zertifizierung	<p>Der Bauunternehmer sollte sich dazu verpflichtet sehen, seine Ausrüstung so zu wählen, dass alle denkbaren Schwierigkeiten des Untergrundes überwunden werden können und er zudem erfahrenes Brunnenbaupersonal einsetzt, das alle fassungsrelevanten Probleme rechtzeitig erkennt und meldet.</p> <p>Laut Conrad (2010) sind diese Voraussetzungen trotz Zertifizierung der Planer, Ingenieure und Unternehmer nach ISO 9000 und anderen Qualitätsmanagementsystemen in der Praxis leider noch immer nicht selbstverständlich.</p>	<p>Oft ist es im Brunnenbau so, dass sich der Planer, der die Leistung ausschreibt, vollkommen auf die Brunnenbaufirma verlässt, weil er in der Gemeinde von der Planung des Kindergartens bis zum Parkplatz für alles zuständig ist. Dasselbe gilt im Grunde für Zivilingenieure.</p> <p>Für solche fachspezifischen, eher seltenen Fälle, wie HFB, braucht es eigentlich Fachplaner. Die breitgefächerten Aufgabengebiete von Zivilingenieuren sollten auf einen tatsächlichen Arbeitsbereich beschränkt werden und mit Referenzen nachgewiesen werden.</p>
Betrieb	Betriebsweise und Monitoring	<p>Conrad (2010) und Houben &amp; Treskatis (2003) betonen den fachmännischen Unterhalt, nicht nur der Pumpen, Leitungen, Armaturen, Steuerungen, Reservoirs und Behälter aller Art, sondern vor allem der Brunnen selbst. Hier wird die Problematik der Phrase „aus den Augen aus dem Sinn“ deutlich. Denn ein Brunnen, der jahrelang störungsfrei arbeitet, wird selten einer Wartung unterzogen.</p> <p>Der Beginn des Brunnenbetriebes ist aber gleichzeitig der Beginn der Brunnenalterung. Die wichtigsten</p>	<p>Brunnenbaufirmen geben Hinweise auf die richtige Betriebsweise. Die Wichtigkeit der Kontrolle und Aufzeichnung der Wasserförderung und der Absenkung des Brunnens wird stets betont. Nur so kann man feststellen, ob und wie sich die Leistung eines Brunnens verändert und ob Regenerierungen nötig sind.</p> <p>Meist gibt es jedoch Probleme, weil sich Brunnenbetreiber nicht an die Vorgaben halten. Solange das Wasser fließt, denkt keiner über die richtige Handhabung nach.</p>

## Ergebnisse und Diskussion

		Beurteilungskriterien für den Brunnenzustand, die während des Brunnenbetriebs erfassbar sind, umfassen: die spezifische Ergiebigkeit $Q_E$ , den Restsandgehalt und die Rohwasserbeschaffenheit.	
Betrieb	Wassermeister	Grundsätzlich trägt der Betreiber von Wasserversorgungsanlagen die Verantwortung für diese und muss sicherstellen, dass Personen, denen bestimmte Aufgaben übertragen werden, ausreichend qualifiziert sind.	Die Überprüfung und Kompetenz der Wassermeister in der Praxis ist ausbaufähig. Schließlich hängt die Lebensdauer eines Brunnens und seiner Bestandteile maßgeblich von ihrem Können ab.
Regenerierung	Angebot und Nachfrage	Brunnenregenerierungen werden prinzipiell von vielen Firmen angeboten. Um Angebote zu vergleichen, ist ein Leistungsverzeichnis essentiell. Pauschalangebote von Firmen sind unrealistisch und daher abzulehnen. Außerdem sollte drauf geachtet werden, dass die anbietenden Firmen theoretisch mehrere Verfahren durchführen können, um diese individuell auf den aktuellen Zustand des Brunnens anzupassen.	Früher war der Bereich der Regenerierung für Brunnenbaufirmen ein größerer Zweig. Heute werden Regenerierungen aber oft von den Unternehmen, die Kamerabefahrungen anbieten, durchgeführt. Diese arbeiten oft nicht professionell und verwenden Methoden, wie beispielsweise einfache Hochdruckspülung, welche nur kurzfristige Wirkungen erzielen.

## 7.7 Übersichtskarte HFB Österreich

Durch die zuvor beschriebenen Methoden konnten schließlich insgesamt 204 Brunnen gefunden werden, wobei nicht alle durch die Wasserbücher der Länder verifizierbar waren. Die Gründe dafür wurden bereits in Kapitel 6.3 erläutert. Abbildung 7.25 zeigt die Anzahl der HFB im Ländervergleich. Tabelle 7.10 zeigt die zur Suche verwendeten Methoden abhängig vom Bundesland.

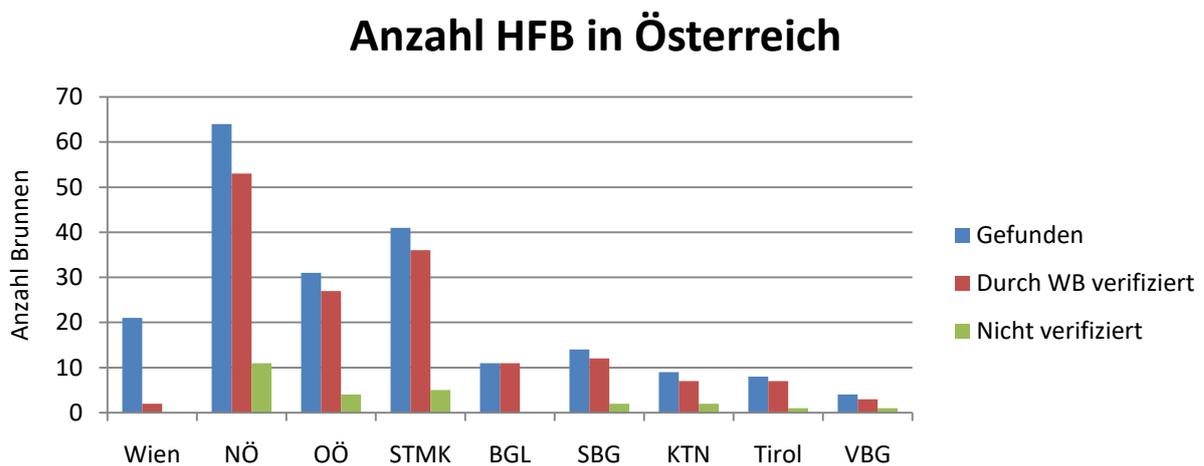


Abbildung 7.25: Verteilung der HFB in Österreich

Tabelle 7.10: Vorgehensweise bei der HFB Suche in Abhängigkeit vom Bundesland

Wien	Daten aus Archiv Züblin, Institut für SWW, WB NÖ
Niederösterreich (NÖ)	Schlagwortsuche im Online-WB NÖ (NÖ-Atlas), an Orten potentieller HFB Standorte
Oberösterreich (OÖ)	Suche im Online-WB OÖ an Orten potentieller HFB Standorte, Zusammenarbeit mit OÖ Wasser
Steiermark (STMK)	Datenbanksuche im WIS des Landes
Burgenland (BGL)	Datenbanksuche im WIS des Landes
Salzburg (SBG)	Datenbanksuche im WIS des Landes
Kärnten (KTN)	Datenbanksuche im WIS des Landes
Tirol	Schlagwortsuche im Online-WB Tirol (tiris), an Orten potentieller HFB Standorte
Vorarlberg (VBG)	Schlagwortsuche im Online-WB VBG (vogis), an Orten potentieller HFB Standorte

Beim Blick auf die Österreichkarte (Abbildung 7.26) lässt sich sofort erkennen, dass sich die HFB entlang der großen Flüsse, Donau, Mur, Inn und Drau, sowie nahe des Bodensees und des Neusiedler Sees befinden. Aus den Untersuchungen zum Baujahr geht hervor, dass die meisten Brunnen von ca. 1969 bis 1980 gebaut wurden. Lediglich in Tirol wurden in den 90er Jahren mehr Brunnen errichtet als davor. In NÖ, OÖ, der Steiermark, dem Burgenland und Vorarlberg wurden 75 % der Brunnen vor 1990 errichtet. In allen Bundesländern, außer Vorarlberg, wurden allerdings auch nach 2000 noch HFB gebaut. Die jüngsten Brunnen, die 2017 gebaut oder bewilligt wurden, befinden sich in OÖ und der Steiermark und dienen zum einen der Nutzwasserversorgung eines Einkaufszentrums und zum anderen der Nutzwasserversorgung eines Stahlrohrerzeugers.

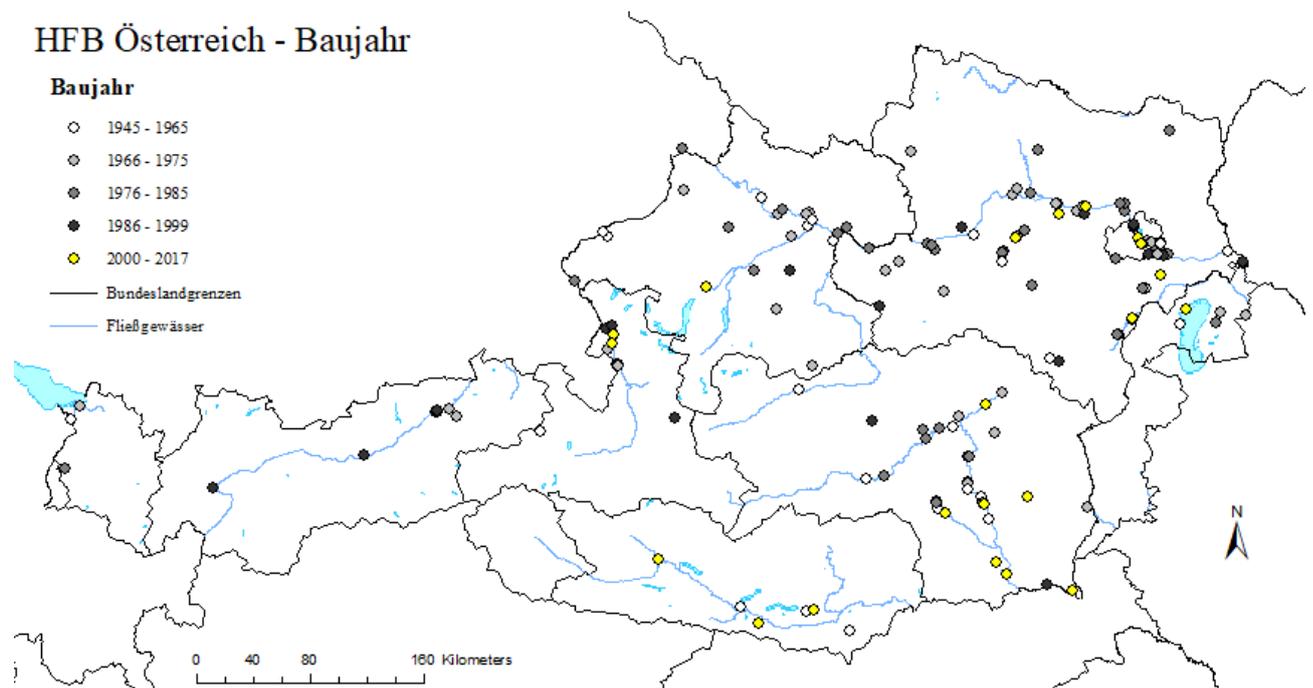


Abbildung 7.26: Österreichkarte HFB nach Baujahr (größere Darstellung im Anhang)

Im Übrigen geht aus der Datensammlung hervor, dass meist große Industriebetriebe und die Wasserversorger größerer Städte und Gemeinden HFB betreiben. Einzelne Haushalte als HFB-Betreiber tauchen erst in den letzten Jahren auf. Diese Brunnen werden oft zur Wärme- und Kälte-Regulierung eingesetzt. Abbildung 7.27 zeigt einmal die Anzahl der Art der Betreiber von HFB in Österreich und einmal die Anzahl im Ländervergleich. Zu Betreibern im Öffentlichen Interesse zählen in diesem Sinne auch Kraftwerksbetreiber, sowie Krankenhäuser und eine Beschneigungsanlage. Meist überwiegt der Anteil dieser Betreiber in den Bundesländern, einzig in der Steiermark finden sich ähnlich viele Industriebetriebe unter den Betreibern. Diese sind vor allem im Bereich der Metallerzeugung und Verarbeitung sowie in der Papier- und Kartonherstellung tätig.

Diese Verteilung spiegelt sich auch in der Verwendung des Wassers wider. So werden, wie in Abbildung 7.28 ersichtlich, ca. 40% als Trinkwasser eingesetzt, etwa 20 % als Nutz- und Industrierwasser und ca. 4% werden thermisch genutzt. Sonstige Einsatzgebiete sind in diesem Zusammenhang beispielsweise die Nutzung zu Feuerlöschzwecken, Beschneigungsanlagen, Versickerungsbrunnen und Wasserhaltungen.

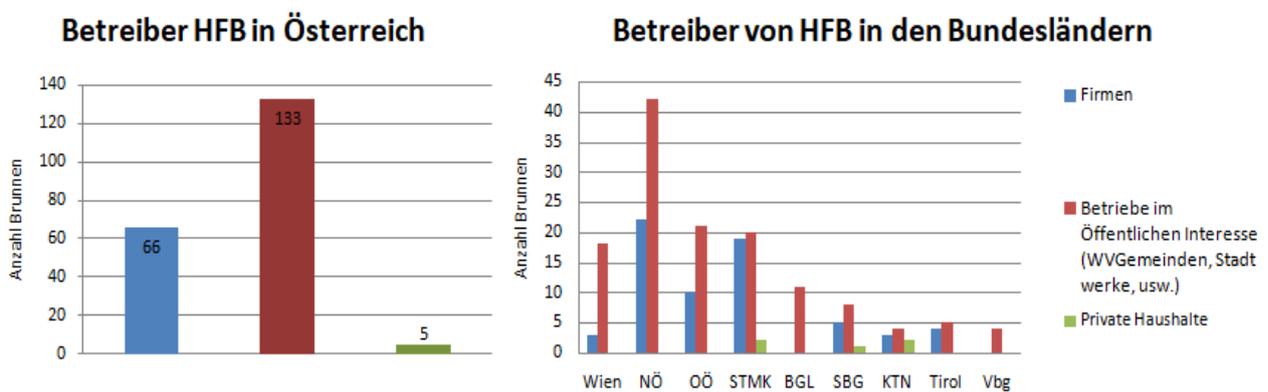


Abbildung 7.27: Betreiber von HFB in Österreich

Im Zusammenhang mit den Betreibern und dem Verwendungszweck sind außerdem die Entnahmemengen relevant. In den meisten Bundesländern befinden sich die Entnahmemengen im Mittel zwischen 50 und 70 l/s. In Wien, Salzburg und Vorarlberg liegt der Wert, mit ca. 200 l/s, jedoch weit höher. In Salzburg ist dies auf die hohen Entnahmen der Papierfabrik zurückzuführen, in Wien auf die Entnahme aus den „Lobaubrunnen“. In Vorarlberg gibt es schlichtweg nur 4 Betreiber, welche zur Trinkwasserbereitstellung zwischen 130 und 220 l/s entnehmen. In Oberösterreich befindet sich zudem ein Brunnen zur Brauchwasserentnahme, der laut Wasserbuch Evidenz, mit der Postzahl 401/169, 22.800 l/s also 22,8 m<sup>3</sup>/s entnimmt.

## Verwendung

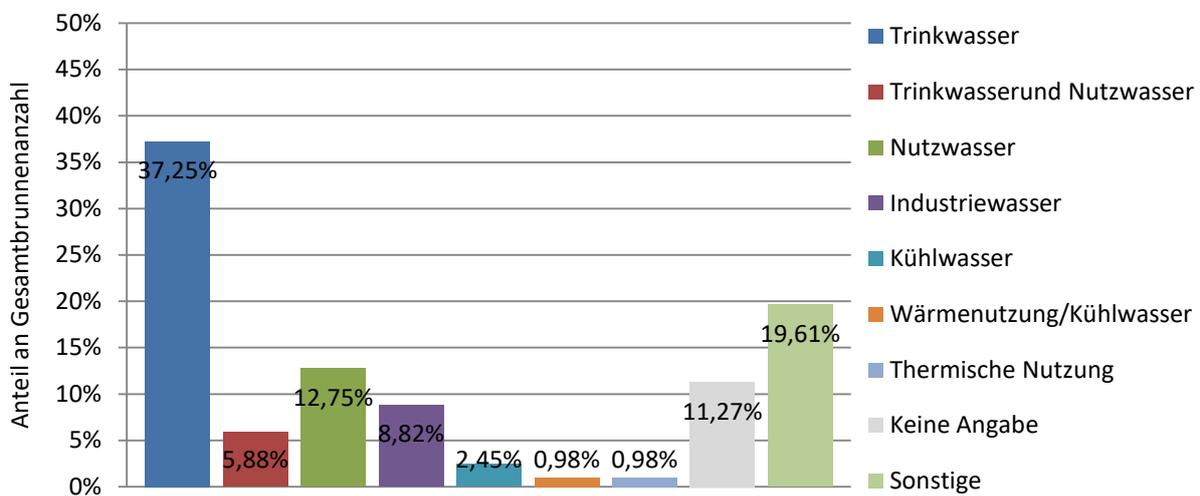


Abbildung 7.28: Verwendung des Wassers aus HFB in Österreich

## HFB Österreich - Entnahmemenge

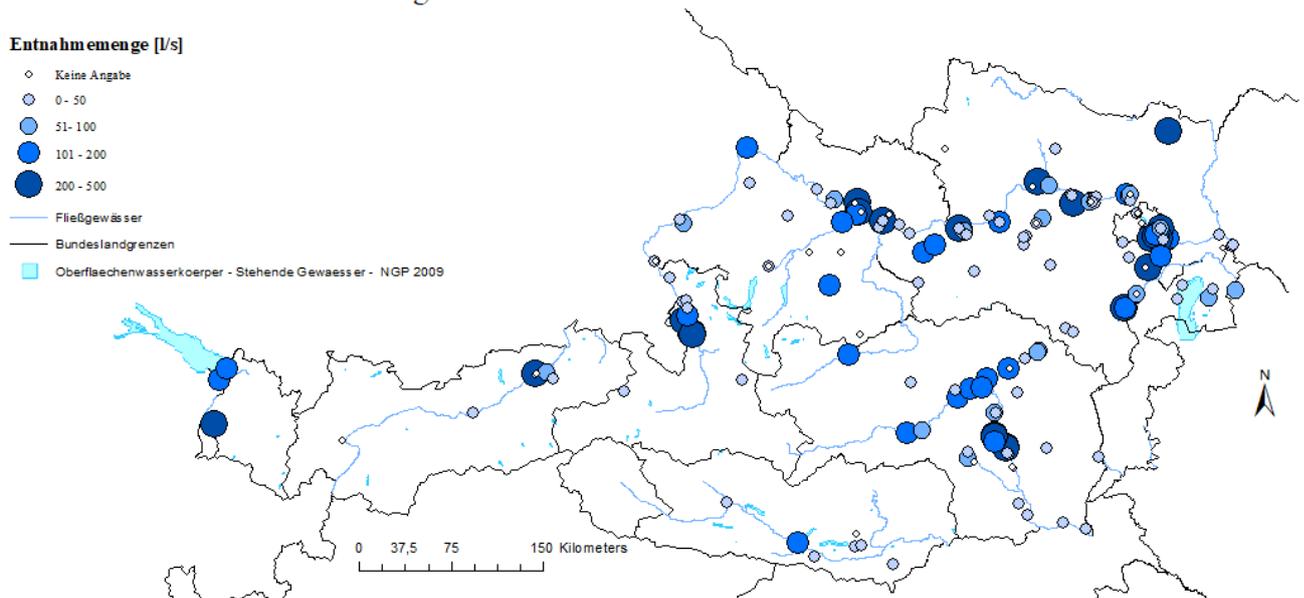


Abbildung 7.29: Entnahmemengen der HFB in Österreich (größere Darstellung im Anhang)

Zur Bauweise der HFB, sofern sie aus der Sichtung des Archivs und den Einträgen der Wasserbücher erkennbar war, lassen sich folgende Aussagen treffen. Wie in Abbildung 7.30 ersichtlich, wurden die meisten Brunnen, falls Informationen vorhanden waren, im Ranney, oder Ranney-Fally Verfahren hergestellt, dies liegt vermutlich an den vorherrschenden Untergrundverhältnissen entlang der Flüsse. Am zweithäufigsten wurden Brunnen in offener Bauweise hergestellt. Die Vortriebshorizonte dieser Brunnen liegen im Mittel 7 m unter der Geländeoberfläche, aber nie tiefer als 10 m. Wie sich die Tiefe der Vortriebshorizonte in Österreich verteilt, zeigt Abbildung 7.31. Im Mittel liegen die Vortriebshorizonte in den Bundesländern zwischen 10 und 20 m. Blickt man auf die Karte, so zeigt sich aber beispielsweise, dass sich in Oberösterreich und dem Burgenland tiefere Brunnen befinden. So auch der tiefste aufgenommene Brunnen, mit 73 m, in Frauenkirchen im Burgenland, und der zweittiefste Brunnen, mit 60 m, in Oberösterreich.

Der Durchmesser des Schachts liegt bei den gefundenen Brunnen zwischen 1 und 4 m, meist jedoch bei 3 m. Die Filterrohrstränge haben einen Durchmesser von 120 bis 600 mm, der Großteil ist jedoch in DN 200 ausgeführt. Abbildung 7.32 zeigt die anteilmäßige Verwendung der Materialien für Filterrohre, sofern sie bekannt waren. Der häufig in älteren Brunnen verwendete SM Stahl bezeichnet sogenanntes Siemens-Martin-Stahl, welches nach den Erfindern seines Herstellungsverfahrens benannt ist und bis in die erste Hälfte des 20. Jahrhunderts bevorzugt erzeugt wurde. Stahl V2A ist schlichtweg eine Bezeichnung für rostfreien Stahl und Rilsan Rohre, sind kunststoffbeschichtete Stahlrohre, die eine Alternative zu Edelstahl bieten sollen. Solche Rohre wurden in Niederösterreich um 1980 teilweise eingesetzt. Ab ca. dieser Zeit setzt man aber vermehrt auf die Anwendung von Edelstahl. Vorreiter im Einsatz dieses Filtermaterials waren 1973 die Stadtwerke Amstetten.

## Vortriebsverfahren

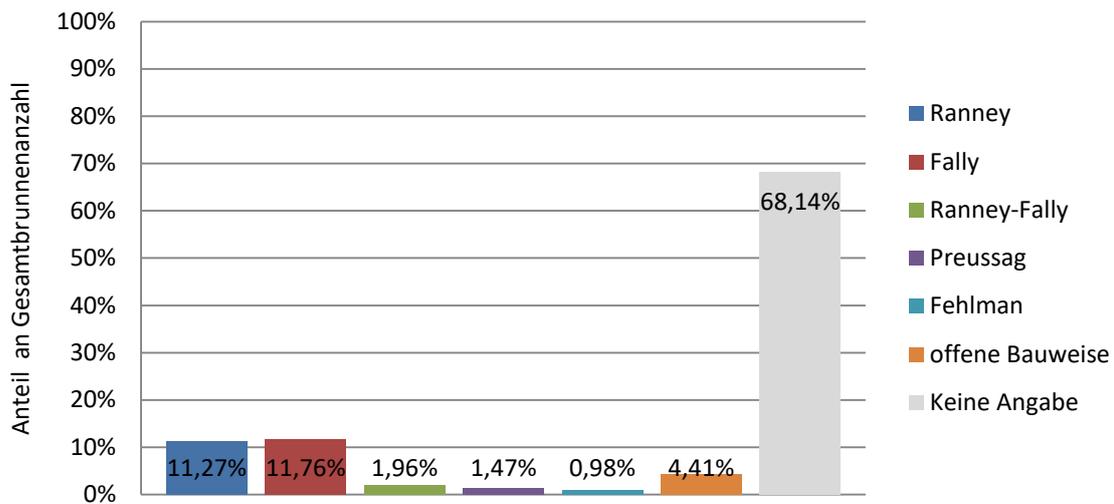


Abbildung 7.30: Verwendung der Vortriebsverfahren

Die Anzahl der Filterrohrstränge reicht von einem Strang bis zu insgesamt 22 Strängen in zwei Horizonten im Schöpfwerk 2 der Stadtwerke Feldkirch. In den übrigen Brunnen variiert die Anzahl dazwischen, höchstens befinden sich aber 12 Stränge (inklusive Blindflanschanschlüsse für zukünftige Filterstränge) in einer Ebene. Sind Informationen über die Anordnung der Stränge vorhanden, so handelt es sich meist um eine sternförmige oder kreuzförmige Anordnung.

## HFB Österreich - Tiefe der Vortriebshorizonte

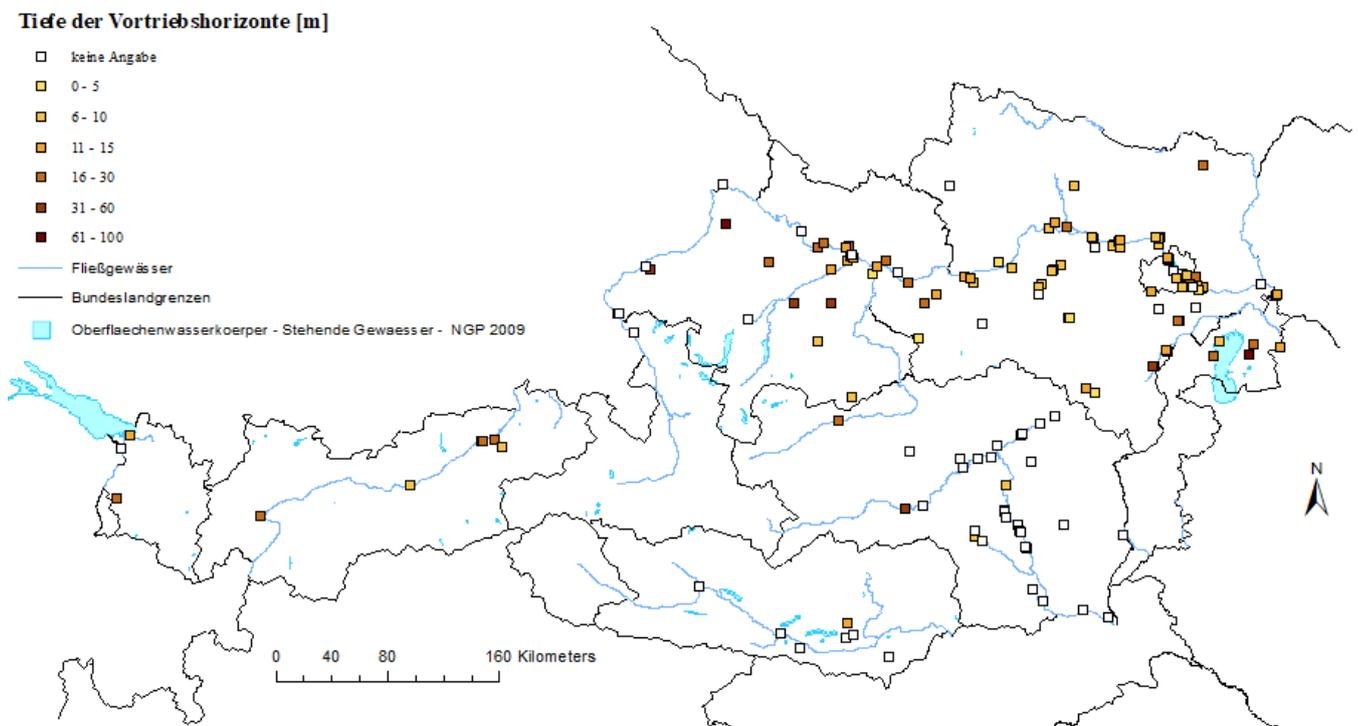


Abbildung 7.31: Tiefe der Vortriebshorizonte der HFB in Österreich (größere Darstellung im Anhang)

## Materialien für Filterrohre

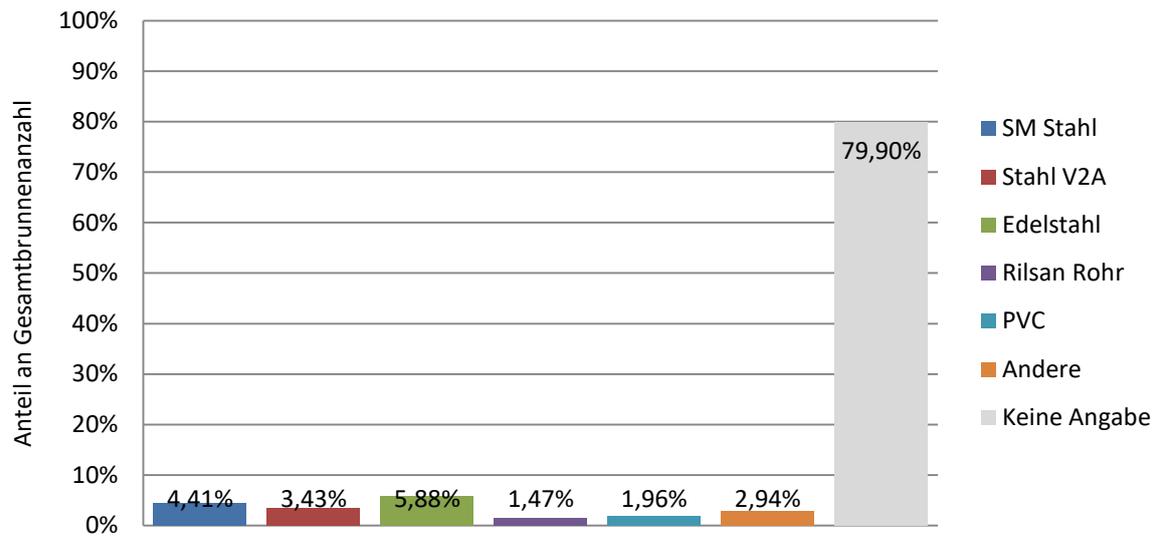


Abbildung 7.32: Verwendung von Materialien für Filterrohre

## 7.8 Diskussion

Vergleicht man die Aussagen aus Theorie und Praxis, so bekommt man zu allererst den Eindruck, dass in der Praxis hauptsächlich überschlägig gerechnet wird und somit die genaue Berechnung laut Theorie überflüssig wird. In der Praxis ersetzen oft Erfahrung und Faustregeln die aufwändigen Berechnungen. Dies ist möglich, weil man laut Willner (Interview, 2017) im Brunnenbau in 90% der Fälle ein Ergiebigkeitsproblem und kein Fassungsproblem hat, d.h. es ergibt sich auch kein Problem aus der Überdimensionierung von Brunnen, solange der Grundwasserleiter geeignet ist. Um dies herauszufinden, werden in der Theorie viele verschiedene Methoden vorgeschlagen (7.1.1). Die Brunnenbaupraxis gibt sich aber im Grunde mit vier Bohrungen und Pumpversuchen zufrieden. Zuweilen auch deshalb, weil sie die nötige Erfahrung und Kenntnisse über den Standort besitzt. Ist ein Gebiet hydrogeologisch so aufgeschlossen wie Österreich, ist das meist auch kein Problem, weil Informationen über Aufschlussbohrungen leicht verfügbar sind. Dies bringt oft auch weniger qualifizierte Unternehmen dazu an Ausschreibungen teilzunehmen. So ergibt sich ein Hauptproblem im Brunnenbau und speziell im Horizontalfilterbrunnenbau. Dieser ist eher die Ausnahme als die Regel. Sogar renommierte Brunnenbaufirmen haben in den letzten Jahren nur durchschnittlich 2 derartige Brunnen jährlich gebaut, dadurch fehlt es vielen Planern und Unternehmen an Erfahrung. Willner (Interview, 2017) spricht an, dass es in solchen Fällen Fachplaner geben sollte, die sich auf ein Thema spezialisieren und ihr Wissen und ihre Erfahrung in diesem Bereich durch mehrere Referenzen belegen müssen. Auch Conrad (2010) sieht die mangelhafte Qualifikation und Erfahrung der Ingenieure und Planer als Ursache für Fehler und eine schlechte Planung. Tholen und Baumann (2002) betonen ebenfalls, dass für die planerischen Vorgaben und ein umfassendes Wissen über die baulichen Zusammenhänge und das Zusammenwirken der einzelnen Ausbauteile eines Brunnens notwendig ist, um Fehler bereits in der Ausschreibung zu vermeiden. Zudem liegt es an den Planern die Neuerungen und Entwicklungen aus der Forschung, wie die Überlegungen zur Filterkiesschüttung von Paul (2017) oder den Einsatz von VHB in der Trinkwasserversorgung nach Sass & Treskatis (2000b), in die Praxis umzusetzen und zu fordern. Des Weiteren sollten die Planer entscheiden können, ob die angebotenen Leistungen der Brunnenbaufirmen umsetzbar sind.

Die zweite Herausforderung während des Lebenszyklus eines HFB ist der Betrieb. Nachdem die Brunnen ordnungsgemäß übergeben wurden, liegt es an den Brunnenbetreibern den Grundstein für einen langjährig problemlosen Betrieb ihrer Brunnen zu legen. Dies sollte vor allem mit Hilfe eines ordentlichen Brunnenmanagements passieren, welches von qualifizierten Personen, den Wassermeistern, umgesetzt wird. Viele Stimmen aus Theorie und Praxis sind sich in dem Punkt einig, dass genau hier ein großes Problem begraben liegt (Conrad, 2010, Tholen und Baumann, 2002 und Willner, Interview, 2017). Denn solange der Brunnen Wasser gibt, machen sich wenige Brunnenbetreiber Gedanken über den Zustand ihrer Wasserversorgungsanlage. Auch die Fortbildung und Überprüfung der Wassermeister könnte noch verbessert werden. Das Brunnenmanagement ist wichtig, um den Einfluss der Brunnenalterung abzuschätzen und die einwandfreie Qualität des Grundwassers zu gewährleisten. Gerade für Gemeinden können langfristig finanzielle Nachteile entstehen, wenn das Brunnenmanagement vernachlässigt wird. Oft wird jedoch nicht auf lange Sicht geplant und ein neuer Brunnen scheint rentabler. Zudem kommt es vor, dass der Wassermeister das Brunnenmanagement vernachlässigt, weil kein Geld für Bau und Regenerierung der Brunnen vorhanden ist. Berücksichtigt man aber den Aufwand für die Bewilligung des neuen Brunnens und den Rückbau des alten so kann eine Regenerierung oder Sanierung sinnvoller sein. In diesem Bereich tritt aber ebenso das Problem auf, dass nicht ausreichend qualifizierte Firmen Pauschalangebote, zum Beispiel für Kamerabefahrung und Regenerierung, erstellen. Die auf diese Weise regenerierten Brunnen zeigen kurzfristig eine

Leistungssteigerung, die aber meist nicht lange anhält, da die Kenntnis über den Brunnenausbau fehlt.

Es ist absehbar, dass über all diesen Problemen ein Hauptproblem steht. Die Bereitstellung finanzieller Mittel. Tholen und Baumann (2002), Conrad (2010) sowie Willner (Interview, 2017) betonen, dass ein Hauptgrund für Fehler im Brunnenbau der herrschende Preisdruck ist. Dies beginnt bereits bei der Planung und Ausschreibung. Der billigste Anbieter wird beauftragt, auch wenn die angebotene Variante, das angebotene Vortriebsverfahren für den Standort vielleicht nicht passend ist. Bei der geophysikalischen Untersuchung betont Willner (Interview, 2017) wie viel mehr Informationen durch eine zusätzliche Bohrung gewonnen werden könnte. Außerdem könnten im Betrieb online Messungen das Brunnenmanagement wesentlich erleichtern. Solche Investitionen können den Lebenszyklus eines Brunnens deutlich verlängern, es lohnt sich aber auf alle Fälle eine Kostenaufstellung zu machen.

Betrachtet man die Datensammlung der HFB in Österreich, so wird klar, dass diese Brunnen teilweise bereits über 60 Jahre im Einsatz sind. Die zu Beginn der Arbeit beschriebene, anfänglich hauptsächlich Nutzung als Brauchwasserbrunnen großer Industriebetriebe (Hunt, 2002) lässt sich auch in der Datensammlung erkennen. Auch dass der Siegeszug der HFB in Österreich seinen Höhepunkt eigentlich in den 1970er bis 80er Jahren hatte. Dies hängt vermutlich mit dem Wirtschaftswachstum nach dem Zweiten Weltkrieg und dem damit einhergehenden Aufkommen neuer Unternehmen zusammen. Auch der Zusammenschluss von Wassergenossenschaften nach dem Zweiten Weltkrieg führt zu höherem Bedarf an Trinkwasser, der durch HFB besser gedeckt werden konnte. Seit dieser Zeit hat der Neubau von HFB nachgelassen. In den letzten Jahren tauchen vermehrt Brunnen zur hydrothermalen Nutzung auf. Dies könnte laut Willner (Interview, 2017) auch ein zukünftiger Wirtschaftszweig für Brunnenbauunternehmen sein.

Die HFB in Österreich werden meist durch das Ranney oder Ranney-Fally Verfahren hergestellt. Dies ist vor allem auf den hierfür perfekten Untergrund zurückzuführen, der in den alluvialen Schotterkörpern entlang der großen Flüsse vorgefunden wird. Wie Willner (Interview, 2017) erwähnt, wäre ein Vortrieb durch andere Verfahren, insbesondere durch das Preussag Kiesmantel Verfahren unter diesen Verhältnissen sinnlos und zu aufwändig. Wie in der Literatur (7.2.1.1) erwähnt, kann der horizontale Vortrieb durch Hindernisse ins Stocken geraten, dies ist vermutlich einer der Hauptgründe, warum man bei weniger tiefen Brunnen eine offene Bauweise wählt.

Die zeitliche Entwicklung der Filterrohrmaterialien in den österreichischen Brunnen deckt sich mit den Informationen aus der Literatur und der Praxis. Wurden anfangs einfache Stahlrohre eingesetzt, so setzte man mit der Zeit aus Kostengründen zunächst auf beschichtete Rohre und später, als sich die Preise durch die höheren Abnahmen, die vermehrte Produktion und die erhöhte Anzahl an Lieferanten verringert hatten, auf Edelstahl.

Leider liegen nur vereinzelt Aufzeichnungen über die Anordnung der Stränge vor. Diese wurden jedoch alle, mit einer Ausnahme, sternförmig angeordnet. Diese Eigenschaft lässt sich vermutlich darauf zurückführen, dass die Möglichkeiten die Anströmung zu den Brunnen zu modellieren oder zu berechnen in deren Gründungsjahren in den 1960er Jahren unverhältnismäßig bzw. nicht vorhanden waren. Darüber hinaus wurden durch die ohnehin gute Durchlässigkeit der fluvialen Schotterkörper und die sternförmige Anordnung wohl zufriedenstellende Ergebnisse erreicht. Zudem wurde durch die sternförmige Anordnung die Möglichkeit geschaffen, bei Hindernissen und dem erzwungenen Abbruch des Vortriebs, eine vergleichbare Ersatzbohrung auszuführen.

## 8. Schlussfolgerungen und Ausblick

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Lebenszyklus von Horizontalfilterbrunnen. Sie fasst den Stand der Technik sowie innovative Forschungsthemen zu den Bereichen Planung, Bau, Betrieb, Regenerierung, Sanierung und Rückbau zusammen. Prinzipiell handelt es sich um ein Thema, dem in der Ausbildung zum Kulturtechniker in Österreich, bis auf seine grundsätzliche Existenz, wenig Aufmerksamkeit geschenkt wird, obwohl HFB in vielerlei Hinsicht Vorteile gegenüber Vertikalfilterbrunnen haben. So zeichnen sie sich beispielsweise durch günstigere Betriebskosten, die Möglichkeit der Anpassung an hydrogeologische Rahmenbedingungen, Vorteile hinsichtlich der Wasserqualität und die individuelle Steuertechnik aus. Die höheren Investitionskosten und die Tatsache, dass kaum mehr so viel Wasserbedarf an einem Ort besteht, um einen HFB zu rechtfertigen, führen dazu, dass sich der Neubau dieser Brunnen in Grenzen hält. Die Planung und der Bau von HFB sind also zu Ausnahmefällen geworden. Die mangelhafte Qualifikation bzw. das fehlende Wissen von Planern wird in dieser Arbeit immer wieder thematisiert, darum richten sich die in der Zielsetzung angeführten Verbesserungsvorschläge zu allererst an die Planer, sich, vor allem bei wenig Erfahrung in diesem Bereich, genügend Informationen über ein geplantes Projekt einzuholen. Dies kann, um eine erste Übersicht zu erhalten, zunächst mit Hilfe der Karte der HFB in Österreich geschehen. Kombiniert mit einer hydrogeologischen Karte des Gebiets, sowie Informationen von benachbarten Brunnenbetreibern können so bereits Aussagen zu Bau, Betrieb und möglichen Alterungserscheinungen getroffen werden. Obwohl sich Brunnenbauunternehmen aktiv an der Forschung und Weiterentwicklung von Vortriebsverfahren und Geräten beteiligen, liegt es vor allem auch am Planer über Innovationen Bescheid zu wissen und diese in der Ausschreibung auch zu fordern. So können Neuerungen in der Praxis Einzug halten und die Kosten für die Umsetzung verringert werden.

Auch für die Brunnenbetreiber ist es wichtig „up to date“ zu sein, einerseits, was den Stand der Technik insbesondere von Brunnenbetrieb und Regenerierungen betrifft, und andererseits, was ihre Wasserfassung selbst betrifft. Zu Ersterem sollten auch die Wassermeister einen Beitrag leisten, erfahren sie doch auf den verpflichtenden Schulungen von Neuerungen und Neuheiten im Brunnenbau. Ob sie über die vorgetragenen Themen Bescheid wissen, wird allerdings kaum überprüft. Die meisten HFB in Österreich sind teilweise mehr als 50 Jahre alt, zu wissen wie sich die Leistung und andere Eigenschaften des Brunnens und des Grundwasserleiters über die Jahre verändert haben, ist wichtig für sein Fortbestehen. Da der Neubau von Trinkwasserbrunnen zum einen teuer ist und zum anderen aus rechtlichen sowie umweltpolitischen Gründen zunehmend schwieriger wird, nimmt die Bedeutung von gutem Brunnenmanagement und effektiven Regenerierungen zu. In diesem Punkt sind die Betreiber auch aufgerufen richtige Lösungen zu finden und sich nicht auf Pauschalangebote von unqualifizierten Unternehmen einzulassen. Weiters wird in diesem Sinne auch der Einsatz von geophysikalischen Untersuchungen im Brunnenstrang in Zukunft zunehmen, um den Zustand des Brunnenausbaus zu erfassen und somit Regenerierungen und das Brunnenmanagement optimal anzupassen. Aus der Arbeit geht hervor, dass Brunnenfirmen die Entwicklung ihrer Regeneriermethoden vorantreiben. Oft ist die Wirkungsweise der durch Patente geschützten Methoden nicht eindeutig feststellbar und ihre Klassifizierung schwierig. Dadurch kann keine Verbesserung der generellen Zertifizierung für diese Verfahren erfolgen, was für eine grundsätzliche Verbesserung von Regenerierleistungen aber notwendig wäre.

Auch im Bereich des Brunnenmanagement kann die Karte der HFB in Österreich genutzt werden. Prüfintervalle sind prinzipiell individuell für jeden Brunnen festzulegen, jedoch orientieren sie sich oft an den Erfahrungen aus dem Betrieb von vergleichbaren Brunnen. Die Karte kann helfen solche Brunnen ausfindig zu machen.

Obwohl die Anzahl neugebauter HFB rückläufig ist, versuchen die Baufirmen ihre Verfahren zu verbessern. Die Entwicklungen im Bereich der HFB gehen in Richtung des Versuchs den horizontalen Vortrieb in jedem Boden zu ermöglichen. Auch die Einsatzgebiete der HFB erweitern sich. Beim Blick auf die Datensammlung zeigt sich, dass die hydrothermale Nutzung der Brunnen in den letzten Jahren zugenommen hat. Da sich die meisten Städte entlang der großen Flüsse befinden, bietet sich diese Art der Wärme- und Kältere regulierung an, die vor allem in kalten Wintern Vorteile gegenüber Luft basierten Systemen hat. Darüber hinaus dürfen ab 2020 im Neubau und ab 2029 im Altbau keine Einreichungen von Heiz- und Kühlanlagen mit fossilen Brennstoffen mehr gemacht werden, was zu einem Revival des HFB führen könnte.

Der Bau von HFB könnte also in Zukunft wieder zunehmen, darum lohnt es sich prinzipiell über diese Art des Brunnenbaus Bescheid zu wissen. In der Literatur taucht immer wieder die Verwendung von VHB zur Trinkwasserversorgung auf, ein Thema, das in Österreich bisher wenig Anwendung fand, auf Grund der Einfachheit aber vermutlich für die Verwendung in hydrothermal genutzten Brunnen interessant wäre.

Die Datensammlung der HFB könnte ausgeweitet werden und zukünftig auch Informationen zu Geologie, Betriebsweise, Regenerierungsempfehlungen etc. enthalten, um Brunnenbetreibern die Suche nach vergleichbaren Brunnen zu erleichtern und mangelnde Erfahrung auszugleichen. Zusätzlich wäre ein Vergleich mit VFB interessant, um die Vor- und Nachteile der jeweiligen Brunnen an einem Standort gegenüberzustellen.

## 9. Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Lebenszyklus von Horizontalfilterbrunnen. Dieser ist gegliedert in Planung, Bau, Betrieb, Regenerierung, Sanierung und Rückbau. Die verschiedenen Phasen werden mit Hilfe einer umfassenden Literaturrecherche und Stimmen aus der Praxis beschrieben.

Zu Beginn werden allgemeine hydrogeologische Grundlagen erklärt und die Eigenschaften eines Grundwasserkörpers zusammengefasst. Anschließend werden die hydraulischen Grundlagen für die Brunnenbemessung erläutert und die Möglichkeiten der Berechnung und Modellierung vorgestellt. Schließlich folgt die Brunnenbemessung.

In den darauffolgenden Kapiteln wird auf die Ergebnisse der Literaturrecherche eingegangen. Die verschiedenen Phasen des Lebenszyklus werden ausführlich beschrieben und notwendige Verfahren und Methoden werden vorgestellt. Zudem wird der rechtliche Aspekt eines jeden Abschnitts berücksichtigt. Den Abschluss der ersten Kapitel bildet die Analyse möglicher Fehler und ihrer Ursachen und soll helfen, gemeinsam mit den Eindrücken aus der Praxis (Interview), die Herausforderungen der HFB abzuschätzen und Verbesserungsvorschläge für die Zukunft liefern. Tabelle 9.1 soll stichwortartig eine Übersicht über die Herausforderungen im Lebenszyklus geben.

Tabelle 9.1: Zusammenfassung der Herausforderungen

Herausforderungen und mögliche Fehler im Lebenszyklus eines Horizontalfilterbrunnens	
Planung	<ul style="list-style-type: none"> <li>– fehlende oder nicht ausreichende Recherche zu den geologischen/hydrogeologischen Verhältnissen</li> <li>– ungenügende Kenntnisse über die zu erwartende Grundwasserqualität, insbesondere im Hinblick auf mögliche anthropogene Kontaminationen oder geogen bedingte Versalzungen und daraus folgende Inkrustationen</li> <li>– ungenügende Kenntnis der passenden Verfahren, dadurch mangelhafte Ausschreibung</li> <li>– Einhaltung der Fristen für Bewilligungen</li> </ul>
Bau	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Vertikalität des Schachtes</li> <li>– Unpassendes Vortriebsverfahren</li> <li>– Blöcke, Hindernisse</li> <li>– Aufsteigen der Bohrung</li> <li>– Unpassender Filterkies</li> <li>– Verwendung unpassender Filterrohrmaterialien: wie Schlitzbrückenfilter oder Kunststoff bei großen Durchmessern (unwirtschaftliche Wandstärke)</li> <li>– Material muss auf den Grundwasserchemismus abgestimmt sein - Korrosion</li> <li>– Ungenügende Entsandung: Bei Ranney erfolgt die Entsandung während des Vortriebs - Stützfilter Bei Preussag muss entsandet werden - oft ungenügender Übergang zum gewachsenen Boden</li> <li>– Ungenügende Dokumentation</li> </ul>

Betrieb	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Keine Daten des Betriebstests sowie einer abschließenden Kamerabefahrung</li> <li>– Betriebsweise: zu hohe Entnahmeraten, stark intermittierender Betrieb Absenken unter die Filterstrangachse</li> <li>– schlechtes/kein Brunnenmanagement: keine Vergleichsdaten, um die Brunnenalterung einzuschätzen.</li> <li>– Wichtige Daten, um beispielsweise die Ergiebigkeit zu berechnen, sind: Wasserspiegelmessungen im Brunnenrohr und im Peilrohr, Fördermengen in Abhängigkeit von Zeit und Betriebszustands des Brunnens, außerdem Restsandgehalt und Rohwasserbeschaffenheit</li> <li>– Funktions- und Sichtprüfungen</li> <li>– Wartungsplan</li> <li>– Ausfallmanagement</li> <li>– Schäden am Ausbaumaterial durch: fehlenden oder fehlerhaften Korrosionsschutz, generelle Materialfehler, aber auch Verarbeitung und Herstellungsfehler, sowie Bemessungs- und Bedienungsfehler</li> <li>– Zufluss von Fremdwasser aus dem Brunnenumfeld (Umläufigkeiten, Gehölzwuchs, etc.)</li> </ul>
Regenerierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Pauschalangebote, unqualifizierte Unternehmen</li> <li>– unpassende Verfahren im Hinblick auf Filtermaterial und Grundwasserbeschaffenheit</li> <li>– geringe Eindringtiefe des Verfahrens</li> <li>– Genehmigung bei chemischer Regenerierung</li> <li>– Anzeigepflicht bei mechanisch, dynamischer Regenerierung</li> <li>– Verkeimung des Brunnens, Veränderung der Rohwasserbeschaffenheit</li> <li>– Schäden an den Ausbaumaterialien</li> <li>– Geringe Leistungssteigerung aufgrund zu später Regenerierung</li> </ul>
Sanierung und Rückbau	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Sanierungskonzept</li> <li>– Abschätzung von Ausführungsrisiko, Kostenrisiko, Sanierungserfolg</li> <li>– Unzureichende Wiederherstellung der Sperrschicht</li> <li>– Unzureichende Dokumentation</li> </ul>

Den Abschluss der Arbeit bildet dann die Analyse und Darstellung der Horizontalfilterbrunnen in Österreich. Durch die Recherche im Archiv einer Brunnenbaufirma und in den Online-Wasserbüchern der Bundesländer wurden insgesamt 204 HFB gefunden. Diese Brunnen und einige ihre Eigenschaften wurden schließlich mit Hilfe eines GIS dargestellt.

Obwohl die Anzahl der neugebauten HFB, trotz vieler Vorteile, rückläufig ist, ist es wichtig, dass sich Planer und Betreiber informieren um die Herausforderungen im Lebenszyklus eines HFBs zu meistern. Vor allem auch weil ein Großteil der HFB in Österreich bereits über 50 Jahre im Einsatz ist und somit dem Brunnenmanagement, nicht zuletzt aus rechtlichen und umweltpolitischen Gründen, erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden muss.

Die Erhebung der HFB in Österreich kann Betreibern und Planern helfen, ähnliche Brunnen zu finden und zu vergleichen. In Zukunft könnte diese Datensammlung ausgeweitet und durch Informationen zu Betriebsweise, Regenerierempfehlungen, Wasserchemismus, Hydrogeologie etc. ergänzt werden. Auch wäre ein Vergleich von HFB und VFB an ähnlichen Standorten interessant. Die Verwendung von VHB zur Wasserversorgung ist in Österreich quasi kaum vertreten, daher wäre eine Untersuchung dieser Methode im Vergleich zu den bewährten Methoden interessant.

## 10. Literatur

- Abramova, A., Schneider, W. & Maximov, G. (2014) Kombination von Ultraschall- und Druckwellenverfahren zur innovativen Regenerierung von Brunnen. *geotechnik*. [Online] 37 (1), 40–46. Available from: doi:10.1002/gete.201300015.
- Bailey, J. & Wicklein, A. (2008) A comprehensive approach to improving well performance. *Watermark - British Columbia Water and Waste Association*. 17 (1), 34–36.
- Bakker, M., Kelson, V.A. & Luther, K.H. (2005) Multilayer Analytic Element Modeling of Radial Collector Wells. *Ground Water*. [Online] 0 (0), 050901015612001. Available from: doi:10.1111/j.1745-6584.2005.00116.x.
- Balke, K.D., Beims, U., Heers, W. & Matthes, G. (2000) *Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd.4, Grundwassererschließung*. Borntraeger.
- Bieske, E. (1965) *Handbuch des Brunnenbaus Band II Grundlagen, Bohrbrunnen, Schachtbrunnen, Horizontalfilterbrunnen, Bohrungen, Grundwassermeßstellen, Grundwasserabsenkungen, Bohrpfähle, Quellfassungen, Unfallverhütung, Rechtsfragen, Geschichtliches*. Berlin Konradshöhe, Rudolf Schmidt.
- BMLFUW, Abteilung IV/3 (2011). Grundwasserkörper. Online im Internet: URL: <https://www.bmlfuw.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/grundwasser/Grundwasserkoerper.html> [Abruf 24.10.2017]
- Bundesamt für Umwelt Schweiz (2007). Grundwasserschutzzonen. Online im Internet: URL: <http://www.bafu.admin.ch/grundwasser/07483/07485/10037/index.html?lang=de> [Abruf 22.02.2016]
- Bundesverband für Geothermie: <http://www.geothermie.de>; [Abruf 10.10.2016]
- Chen, C., Wan, J. & Zhan, H. (2003) Theoretical and experimental studies of coupled seepage-pipe flow to a horizontal well. *Journal of Hydrology*. [Online] 281 (1–2), 159–171. Available from: doi:10.1016/S0022-1694(03)00207-5.
- cleanwells GbR (2009-2017): <http://cleanwells.de/de/brunnenregenerierung/eingesparte-betriebskosten>, im Jänner 2017
- Conrad, R.M. (2010) *GRUNDWASSERFASSUNGEN: Bau – Betrieb und Unterhalt – Werterhaltung - Sanierung*. Weiterbildungskurse 2010. Schweizerischer Brunnenmeister Verband.
- Daffner, T. (2012) *Planung, Bau und Betrieb von Horizontalfilterbrunnen in Trocken- und Nassaufstellung*.
- Daffner, T., Hüper, G., Scheppat-Rosenkranz, B. & Leibenath, C. (2010) Erfahrungen bei der Planung von Horizontalfilterbrunnen in Nass- und Trockenaufstellung (Teil 1). *bbr-Leitungsbau, Brunnenbau, Geothermie*. (05/2010), 42–49.
- Daffner, T., Hüper, G., Scheppat-Rosenkranz, B. & Leibenath, C. (2010) Erfahrungen bei der Planung von Horizontalfilterbrunnen in Nass- und Trockenaufstellung (Teil 2). *bbr-Leitungsbau, Brunnenbau, Geothermie*. 48–53.
- Dimkić, M., Pusić, M., Vidovic, D., Petković, A., et al. (2011) Several natural indicators of radial well ageing at the Belgrade groundwater source, part 1. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*. 63 (11), 2560–2566.
- Etschel, G. (2008) *Regenerierung von Trink- und Brauchwasserbrunnen, sowie geothermischen Brunnen nach DVGW W 130*.
- Forkel, C. (2004) *Numerische Modelle für die Wasserbaupraxis: Grundlagen, Anwendungen, Qualitätsaspekte*. [Online]. Aachen, Shaker.
- Fritsch et al. (2011) *Mutschmann/Stimmelmayer Taschenbuch der Wasserversorgung*. [Online]. Available from: <http://www.springer.com/de/book/9783834898050> [Accessed: 21 September 2017].

- Glombitza, F., Aubel, T., Schaffrath, M. & Janneck, E. (2014) *Wirtschaftlicher Maßnahmenvergleich verschiedener Verfahren zur Fassung Ableitung und Reinigung von bergbaulich kontaminierten Grundwässern*.
- Grombach, P. (2000) Google-Books-ID: FuKvqYwSAaQC. *Handbuch der Wasserversorgungstechnik*. Oldenbourg Industrieverlag.
- Grossmann, J. (2000) Regeneration von Trinkwasserbrunnen. *gwf Wasser-Abwasser*. 141 (9), 586–593.
- Haitjema, H., Kuzin, S., Kelson, V. & Abrams, D. (2010) Modeling Flow into Horizontal Wells in a Dupuit-Forchheimer Model. *Ground Water*. [Online] 48 (6), 878–883. Available from: doi:10.1111/j.1745-6584.2010.00694.x.
- Handl, S. (2013) *Hydraulische Optimierung und Simulation von Qualitätsfragestellungen im Einzugsbereich von Horizontalfilterbrunnen*. [Online]
- Hantush, M.S. & Papadopoulos, I.S. (1962) Flow of Ground Water to Collector Wells. *Journal of the Hydraulics Division*. 88 (5), 221–244.
- Harms, C. (2017) Entsorgung von Bohrspülung und Bohrklein. In: 3. *Brunnenbausymposium*. 30 March 2017 Berlin. p.
- Henkel, S., Weidner, C., Roger, S., Schüttrumpf, H., et al. (2012) Untersuchung der Verockerungsneigung von Vertikalfilterbrunnen im Modellversuch: Ein Beitrag zum Prozessverständnis der chemischen Verockerung in der Tagebauentwässerung. *Grundwasser*. [Online] 17 (3), 157–169. Available from: doi:10.1007/s00767-012-0198-9.
- Hölting, B. & Coldewey, W.G. (2012) *Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie*. (8th edition) . Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag.
- Houben, G. (2017) Untersuchung von Feinstpartikelablagerungen in der Bohraureole. In: 3. *Brunnenbausymposium*. 31 March 2017 Berlin. p.
- Houben, G. & Treskatis, C. (2003) *Regenerierung und Sanierung von Bohrbrunnen, m.CD-ROM*. 1., Aufl. München, Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Huang, C.-S., Tsou, P.-R. & Yeh, H.-D. (2012) An analytical solution for a radial collector well near a stream with a low-permeability streambed. *Journal of Hydrology*. [Online] 446–447 48–58. Available from: doi:10.1016/j.jhydrol.2012.04.028.
- Huber, M. & Daffner, T. (2012) Regenerierung eines Horizontalfilterbrunnens in Trockenauftsellung. *bbr-Leitungsbau, Brunnenbau, Geothermie*. Jahresmagazin 2012. 46–52.
- Hunt, H. (2002) American Experience in Installing Horizontal Collector Wells. In: *Riverbank Filtration*. Water Science and Technology Library. [Online]. Springer Netherlands. pp. 29–34. Available from: doi:10.1007/0-306-48154-5\_3 [Accessed: 18 September 2016].
- Koch, M. (2004) *Skript Allgemeine Hydrogeologie*. Kassel, Fachbereich Bauingenieurwesen, Fachgebiet Geohydraulik und Ingenieurhydrologie.
- Krishan, G. (2015) Environmental tracer techniques in groundwater investigations. *Water and Energy International*. 58 (7), 57–63.
- Lakshmi, V. (2016) Beyond GRACE: Using Satellite Data for Groundwater Investigations. *Groundwater*. [Online] Available from: doi:10.1111/gwat.12444 [Accessed: 19 September 2016].
- Lee, E., Hyun, Y., Lee, K.-K. & Shin, J. (2012) Hydraulic analysis of a radial collector well for riverbank filtration near Nakdong River, South Korea. *Hydrogeology Journal*. [Online] 20 (3), 575–589. Available from: doi:10.1007/s10040-011-0821-3.
- Lerner, D.N., Issar, A.S. & Simmers, I. (1990) *Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge; [contribution to UNESCO International Hydrogeological Programme IHP in the framework of project III 2.4c]*. Book, Whole. [Online]. Hannover, Heise

- Merkel, G. (2008) Google-Books-ID: TSF\_3SnciIMC. *Technik der Wasserversorgung: Praxisgrundlagen für Führungskräfte*. Oldenbourg Industrieverlag.
- Missteat, B. (2000) *Groundwater recharge assesement: A key component of river basin management*.
- Missteat, B., Banks, D. & Clark, L. (2007) *Water Wells and Boreholes*. (1st edition) . Wiley.
- Mohamed, A. & Rushton, K. (2006) Horizontal wells in shallow aquifers: Field experiment and numerical model. *Journal of Hydrology*. [Online] 329 (1–2), 98–109. Available from: doi:10.1016/j.jhydrol.2006.02.006.
- Moore, R., Kelson, V., Wittman, J. & Rash, V. (2012) A Modeling Framework for the Design of Collector Wells. *Ground Water*. [Online] 50 (3), 355–366. Available from: doi:10.1111/j.1745-6584.2011.00850.x.
- Mosch, S. (2017) Filterkies im Brunnenbau. In: 3. *Brunnenbausymposium*. 31 March 2017 Berlin. p.
- Nachtnebel, H.P. (2007) *Studienblätter zu Hydrologie und Flussgebietsmanagement*.
- Nag, S. & Saha, S. (2014) Integration of GIS and Remote Sensing in Groundwater Investigations: A Case Study in Gangajalghati Block, Bankura District, West Bengal, India. *ARABIAN JOURNAL FOR SCIENCE AND ENGINEERING*. [Online] 39 (7), 5543–5553. Available from: doi:10.1007/s13369-014-1098-3.
- Nemeček, E.P. (2006) *Horizontalfilterbrunnen*. Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft / Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft. Graz, Eigenverl. d. Inst. für Siedlungswasserwirtschaft u. Landschaftswasserbau.
- Niehues, B. (1999) DVGW Umfrage ‘Brunnenregenerierung’. In: *Tagungsband*. 13.Oktober 1999 p.
- Oberleitner, M.D.F. (2007) *WASSERRECHT -Einführung und Überblick*.
- Paul, K.F. (2017) Neue Erkenntnisse zur Brunnenentwicklung. In: 3. *Brunnenbausymposium*. 31 March 2017 Berlin. p.
- Pfeil, A. (2014) *Optimierung des Brunnenbetriebs am Beispiel der Grundwassergewinnungsanlagen eines Industriebetriebs*.
- Pietsch, R. & Etschel, G. (2017) Überdurchschnittliche Leistungssteigerung eines Brunnens durch chemiefreie Regenerierung. *gwf Wasser-Abwasser*. 27–30.
- pigadi GmbH. Online im Internet: URL: <http://www.pigadi.de/index.php?id=27&L=0> [Abruf: 16.3.2017]
- Quergedacht (2013) (01), 12–15.
- Sander, J. (2006). Bedeutung und Inhalt der Brunnenakte. *bbr-Leitungsbau, Brunnenbau, Geothermie*. Jahresmagazin 2006. 3/76
- Sass, I. & Treskatis, C. (2000a) Herstellungs- und Bemessungsgrundlagen für einen verlaufsgesteuerten Trinkwasserbrunnen als Pilotversuch an einem Standort in Krefeld. *Grundwasser*. [Online] 5 (1), 24–34. Available from: doi:10.1007/s767-000-8341-x.
- Sass, I. & Treskatis, C. (2000b) Verlaufsgesteuerte Trinkwasserbrunnen als neues Fassungsorgan für die Grundwassererschließung. *Grundwasser*. [Online] 5 (1), 17–23. Available from: doi:10.1007/s767-000-8340-0.
- Spektrum (2000). Wasserkreislauf. Online im Internet: URL: <http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/wasserkreislauf/18005> [Abruf:10.10.2016]
- Spektrum (2000). Beharrungszustand. Online im Internet: URL: <http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/beharrungszustand/1525> [Abruf: 6.3.2017]
- Spiridonoff, S. (1964) DESIGN AND USE OF RADIAL COLLECTOR WELLS. *JOURNAL AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, VOL 56, NO 6, P 689-698, JUNE 1964. 4 FIG, 1 TAB, 13 REF.*

- Steußloff, S. (2004) Leistungsverzeichnisse und Ausschreibungsunterlagen. *bbr- Leitungsbau, Brunnenbau, Geothermie*. (2), 3–8.
- Sun, D. & Zhan, H. (2006) Flow to a horizontal well in an aquitard–aquifer system. *Journal of Hydrology*. [Online] 321 (1–4), 364–376. Available from: doi:10.1016/j.jhydrol.2005.08.008.
- TECmetall (2003-2017). Wickeldrahtfilter. Online im Internet: URL: <http://www.lochblech.ch/de/spaltsieb.html> [Abruf: 7.4.2017]
- Tewes, S. (2017) Umgang mit Spülung und Bohrgut auf Brunnenbaustellen. In: 3. *Brunnenbausymposium*. 30 March 2017 Berlin. p.
- Tholen, M. (1997) *Arbeitshilfen für den Brunnenbauer*. Köln, Verlagsges. Müller.
- Tholen, M. (2012) *Arbeitshilfen für den Brunnenbauer: Brunnenausbau- und Brunnenbetriebstechniken*. 2., überarbeitete Auflage. Bonn, Wirtschafts- u. Verlagsges. Gas u. Wasser.
- Tholen, M. (2017) Berücksichtigung bei Ausschreibung und Vergabe. In: 3. *Brunnenbausymposium*. 30 March 2017 Berlin. p.
- Tholen, M. & Baumann, K. (2002) *Mängel an Brunnen und Grundwassermessstellen*. bbr Wasser, Kanal- und Rohrleitungsbau (01/2002), 24–34.
- Treskatis, C. (2017) *Bohrbrunnen: Planung Ausbau Betrieb*. (9th edition) . München, Deutscher Industrieverlag.
- Treskatis, C. & Betschart, A. (2012) Anströmung von Fassungssträngen am Beispiel eines Horizontalfilterbrunnens im Grundwasserfeld Hardhof. *Aqua & Gas*. (10/2012), 34–47.
- Treskatis, C., Volgnandt, P., Wessollek, H., Puronpää-Sch&#x000E, P., et al. (1998) Anforderungsprofile an den wirtschaftlichen Bau und Betrieb von Bohrbrunnen. *Grundwasser*. [Online] 3 (3), 117–128. Available from: doi:10.1007/s767-1998-8578-y.
- Tsou, P.R., Zheng Yi Feng, Hund Der Yeh & Ching Sheng Huang (2010) Stream depletion rate with horizontal or slanted wells in confined aquifers near a stream. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. [Online] 7 (2), 2347–2371. Available from: doi:10.5194/hessd-7-2347-2010.
- Umweltbundesamt (2005). hydrochemische Karte Österreichs. Online im Internet: URL: [http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/wasser/wasser\\_daten/hydrochem/](http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/wasser/wasser_daten/hydrochem/) [Abruf 23.10.2017]
- Wiacek, H. (2005) *Brunnenmonitoring zur optimalen Brunnennutzung und -pflege*. Mainz, Johannes Gutenberg-Universität.
- Wicklein, A. & Steußloff, S. (2006) *Brunnen - ein komplexes System: Wege und Möglichkeiten eines wirtschaftlichen Brunnenbetriebes*. (2nd edition) . Renningen, expert.
- Zimmermann, I. (2003) *Ressourcenkosten und standortspezifische Kennzahlen in der Trinkwassergewinnung*. Graz, Technische Universität

### **Rechtliche Grundlagen, technische Richtlinien, Normen und Regelwerke:**

- DIN 4049-1 (1992) *Hydrologie; Grundbegriffe*.
- DVGW W 107 (2016) *Aufbau und Anwendung numerischer Grundwassermodelle in Wassergewinnungsgebieten*.
- DVGW W 111 (1997) *Planung, Durchführung und Auswertung von Pumpversuchen bei der Wassererschließung*.
- DVGW W 112(A) (2011) *Grundsätze der Grundwasserprobenahme aus Grundwassermessstellen*.
- DVGW W 113 (2001) *Bestimmung des Schüttkorndurchmessers und hydrogeologischer Parameter aus der Korngrößenverteilung für den Bau von Brunnen*.
- DVGW W 118 (2005) *Bemessung von Vertikalfilterbrunnen*.

- DVGW W 119 (2002) *Entwickeln von Brunnen durch Entsandern - Anforderungen, Verfahren, Restsandgehalte.*
- DVGW W 121 (2003) *Bau und Ausbau von Grundwassermessstellen.*
- DVGW W 125 (2004) *Brunnenbewirtschaftung - Betriebsführung von Wasserfassungen.*
- DVGW W 128 (2008) *Bau und Ausbau von Horizontalfilterbrunnen.*
- DVGW W 130 (2007) *Brunnenregenerierung.*
- DVGW W 135 (1998) *Sanierung und Rückbau von Bohrungen, Grundwassermessstellen und Brunnen.*
- DVGW W 614 (2001) *Instandhaltung von Förderanlagen.*
- ÖNORM B 2601 (2004) *Wasserschließung-Brunnen; Planung, Bau und Betrieb.*
- ÖVGW W 10/1 (2017) *Zertifizierungsprogramm W10/1 Wassermeister.*
- ÖVGW W 72 (2004) *Schutz- und Schongebiete.*
- Trinkwasserverordnung - TWV (2017)*
- Wasserrechtsgesetz 1959 (2017)*
- WRRL, 2000/60/EG (2000) *Richtlinie zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.*

## **11. Anhang**

Beilage 1: Österreichkarte HFB nach Baujahr

Beilage 2: Österreichkarte HFB nach Entnahmemenge

Beilage 3: Österreichkarte HFB nach Tiefe der Vortriebshorizonte



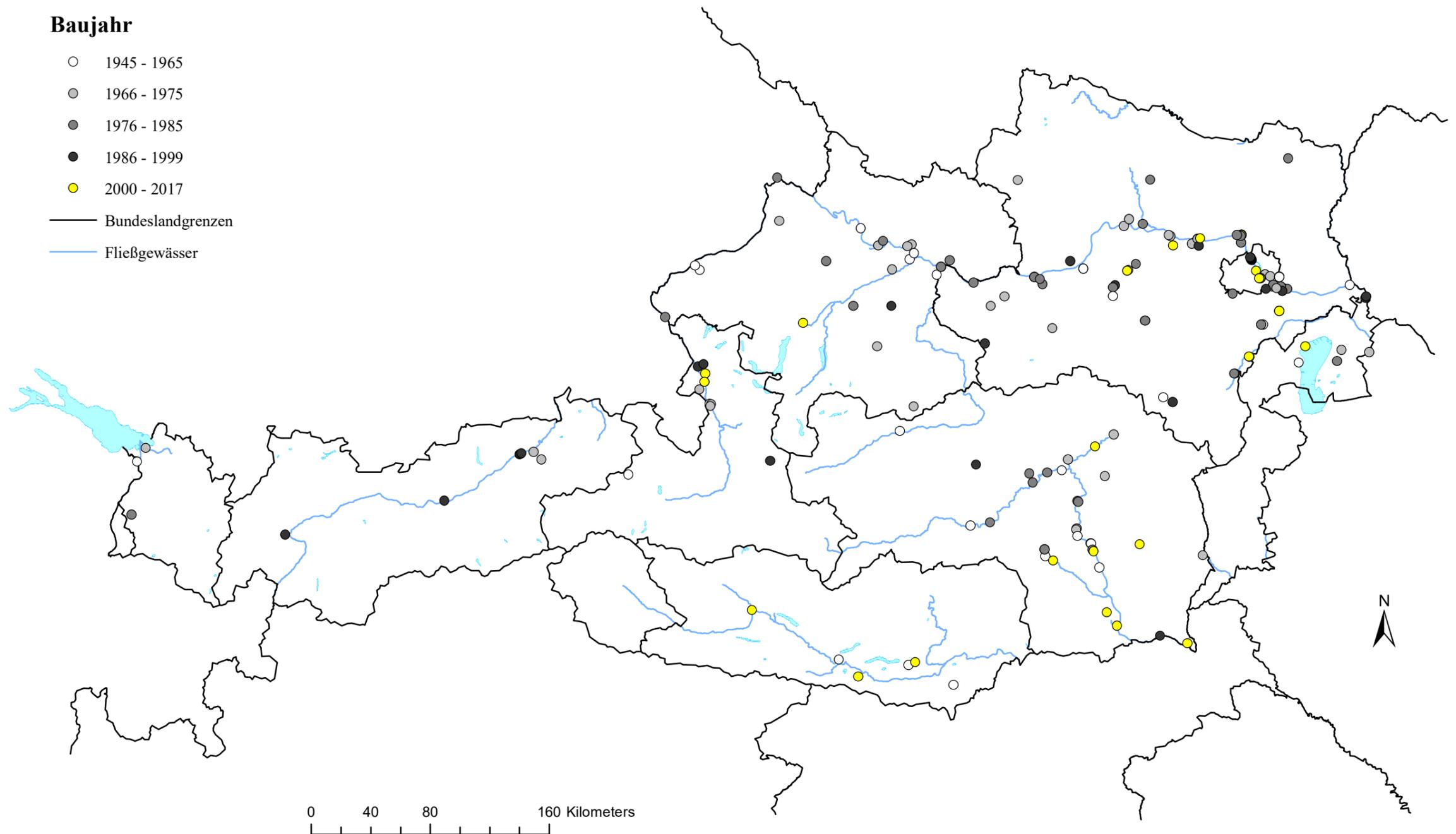
# HFB Österreich - Baujahr - Beilage 1

## Baujahr

- 1945 - 1965
- 1966 - 1975
- 1976 - 1985
- 1986 - 1999
- 2000 - 2017

— Bundeslandgrenzen

— Fließgewässer

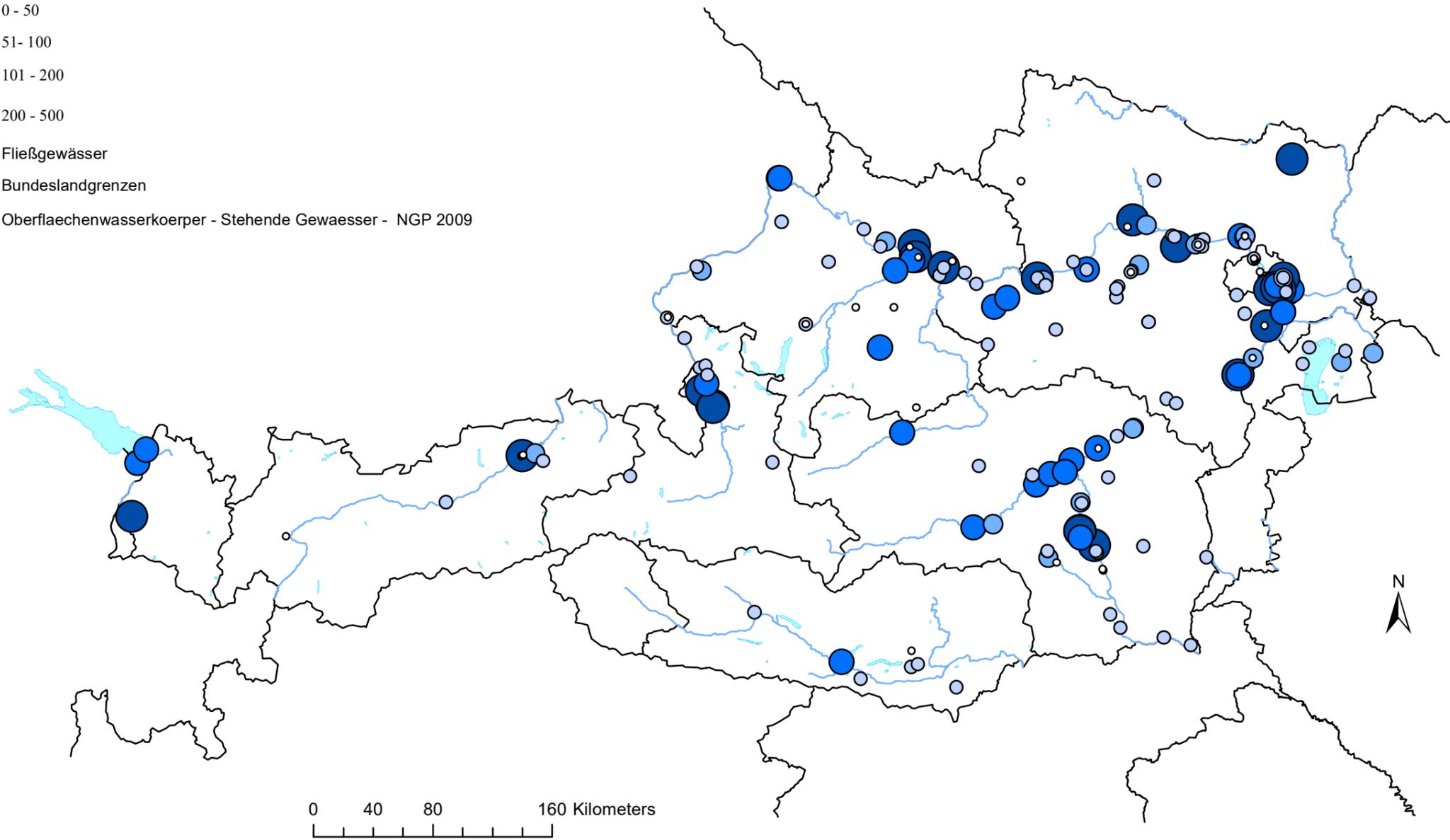




# HFB Österreich - Entnahmemenge - Beilage 2

## Entnahmemenge [l/s]

- Keine Angabe
- 0 - 50
- 51 - 100
- 101 - 200
- 200 - 500
- Fließgewässer
- Bundeslandgrenzen
- Oberflächengewässer - Stehende Gewässer - NGP 2009





# HFB Österreich - Tiefe der Vortriebshorizonte - Beilage 3

Tiefe der Vortriebshorizonte [m]

- keine Angabe
- 0 - 5
- 6 - 10
- 11 - 15
- 16 - 30
- 31 - 60
- 61 - 100
- Fließgewässer
- Bundeslandgrenzen
- Oberflächengewässer - Stehende Gewässer - NGP 2009

