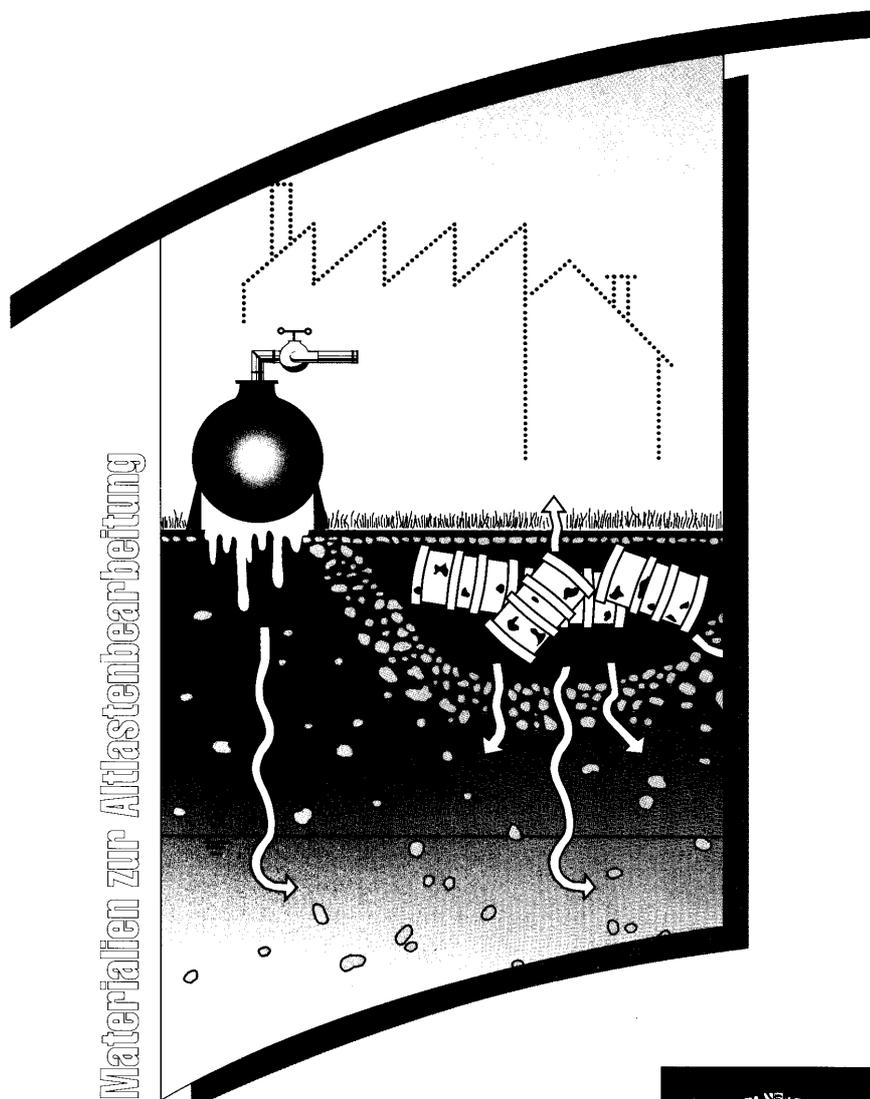
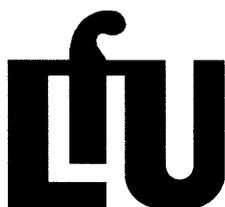


**Handbuch Altlasten
und Grundwasserschadensfälle**

**Leitfaden
Erkundungsstrategie
Grundwasser**



Materialien zur Altlastenbearbeitung

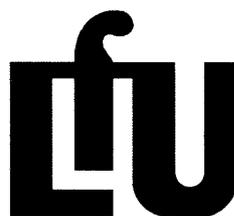
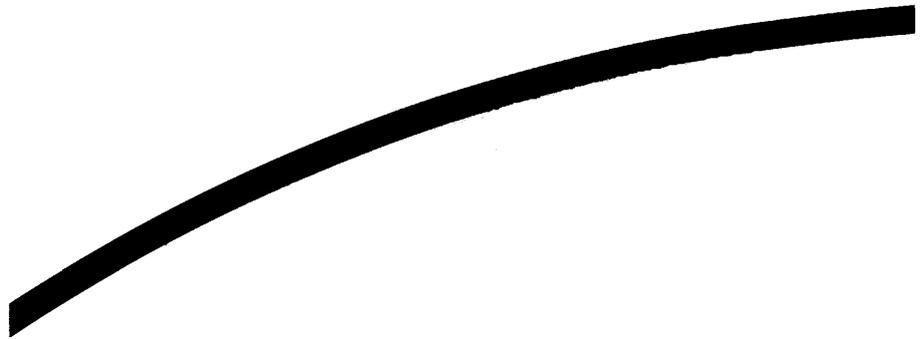


**BODEN
ABFALL
ALTLASTEN**



**Handbuch Altlasten
und Grundwasserschadensfälle**

Leitfaden Erkundungsstrategie Grundwasser



Herausgegeben von der
Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg
1. Auflage

Karlsruhe 1996



Altlastenfachinformation im WWW

IMPRESSUM

Herausgeber: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
Griesbachstr. 1, 76185 Karlsruhe

Projektbearbeitung: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
Abt. Boden, Abfall, Altlasten
Referat 54, Sanierung von Altlasten und Grundwasserschadensfällen
U. Kunzmann, Dr. I. Blankenhorn

Projektgruppe:

Herr Kunzmann, Herr Bock, Landesanstalt für Umweltschutz, Referat 54
Herr Dr. Ruf, Landesanstalt für Umweltschutz, Referat 53
Herr Dr. Eitel, Landesanstalt für Umweltschutz, Referat 55
Herr Dr. Bruder, Geologisches Landesamt, Außenstelle Stuttgart
Herr Auerbach, Amt für Wasserwirtschaft und Bodenschutz Ravensburg/Landratsamt Ravensburg
Herr Franßen, Amt für Wasserwirtschaft und Bodenschutz Reutlingen/Landratsamt Tübingen

Teilnehmer des Workshops am 6./7.09.1995 in Vaihingen-Horrheim:

Herr Bürgermeister Armbruster, Stadt Kehl
Herr Gehring, Herr Schnepf, Umweltministerium Baden-Württemberg
Herr Dr. Seng, Herr Schmid, Herr Kunzmann, Herr Bock, Herr Flittner, Herr Dr. Ruf, Herr Dr. Eitel, Herr Grimm-Strehle, Landesanstalt für Umweltschutz
Herr Dr. Bruder, Herr Dr. Engesser, Geologisches Landesamt
Herr Franßen Landratsamt Tübingen
Herr Kirchholtes, Amt für Umweltschutz, Stadt Stuttgart
Herr Röhm, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung
Herr Röder, Bayrisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München
Herr Schimmel, Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landesentwicklung, Dresden
Herr Dr. Barczewski, VEGAS, Universität Stuttgart
Herr Prof. Teutsch, Geologisches Institut, Universität Tübingen
Herr Eschbach, Robert Bosch GmbH, Stuttgart
Herr Ertel, Herr Dinkel, UW Umweltwirtschaft GmbH
R. Crocoll, S. Denzel, T. Behnert Weber-Ingenieure Pforzheim GmbH

Verfasser: Planungsgemeinschaft Umweltwirtschaft GmbH und Weber-Ingenieure:

T. Ertel, R. Dinkel UW Umweltwirtschaft GmbH
R. Crocoll, S. Denzel, T. Behnert Weber-Ingenieure Pforzheim GmbH

Karlsruhe, Januar 1996

Bei diesem Ausdruck handelt es sich um eine Adobe Acrobat Druckvorlage. Abweichungen im Layout vom Original sind rein technisch bedingt. Der Ausdruck sowie Veröffentlichungen sind -auch auszugsweise- nur für eigene Zwecke und unter Quellenangabe des Herausgebers gestattet.

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGEN.....	1
TEIL I: STRATEGIE.....	3
1. EINLEITUNG	3
1.1 Zielsetzung	3
1.2 Aufbau und Benutzerhinweise	4
2. GRUNDLAGEN.....	6
3. ERKUNDUNG SCHUTZGUT GRUNDWASSER	8
3.1 Grundgedanken.....	8
3.2 Erkundungsschritte	9
3.3 Bewertung	15
4 GRUNDWASSERERKUNDUNG	18
4.1 Vorgehensweise.....	18
4.2 Hydrogeologisches Arbeitsmodell	21
4.3 Anzahl der Grundwassermeßstellen.....	24
4.4 Positionierung von Grundwassermeßstellen.....	32
4.5 Meßstellenbau und Bohrlochgeophysik	36
4.6 Hydraulische Kennwerte.....	40
4.7 Probennahme	45
4.8 Parameterumfang	50
5 INDIREKTE EMISSIONSERMITTLUNG.....	53
5.1 Emissionsermittlung über Grundwassererkundung	53
5.2 Rückrechnung auf Schadstoffkonzentration im Gefahren- bzw. Schadensherd	54
5.3 Plausibilitätskontrolle	55
TEIL II: FALLBEISPIELE.....	56
FALLBEISPIEL 1: PORENGRUNDWASSERLEITER, HOMOGEN	58
1. Standortbeschreibung	58
2. Hydrogeologisches Arbeitsmodell	60
3. Anzahl GWM.....	61
4. Positionierung GWM	63
5. Meßstellenbau/Bohrlochgeophysik	64
6. Hydraulische Kennwerte.....	66
7. Probennahme	68
8. Parameterumfang	70
9. Emissionsermittlung über Grundwassererkundung und Plausibilitätskontrolle.....	72
10. Bewertung	74
11. Hydrogeologische Parameter	75
FALLBEISPIEL 2: KARST-/KLUFTGRUNDWASSERLEITER	76
1. Standortbeschreibung	76
2. Hydrogeologisches Arbeitsmodell	77
3. Anzahl GWM.....	79
4. Positionierung GWM	80
5. Meßstellenbau/Bohrlochgeophysik	81
6. Hydraulische Kennwerte.....	82
7. Probennahme	83
8. Parameterumfang	85
9. Emissionsermittlung über Grundwassererkundung und Plausibilitätskontrolle.....	87
10. Bewertung	88
11. Hydrogeologische Parameter	89

FALLBEISPIEL 3: POREN-GRUNDWASSERLEITER, HETEROGEN	90
1. Standortbeschreibung	90
2. Hydrogeologisches Arbeitsmodell	92
3. Anzahl GWM	93
4. Positionierung GWM	95
5. Meßstellenbau/Bohrlochgeophysik	96
6. Hydraulische Kennwerte	97
7. Probennahme	98
8. Parameterumfang	100
9. Emissionsermittlung über Grundwassererkundung und Plausibilitätskontrolle.....	102
10. Bewertung	104
11. Hydrogeologische Parameter	105
FALLBEISPIEL 4: SCHICHTIG GEGLIEDERTER GRUNDWASSERLEITER	106
1. Standortbestimmung	106
2. Hydrogeologisches Arbeitsmodell	107
3. Anzahl GWM	108
4. Positionierung GWM	110
5. Meßstellenbau/Bohrlochgeophysik	111
6. Hydraulische Kennwerte	112
7. Probennahme	113
8. Parameterumfang	114
9. Emissionsermittlung über Grundwassererkundung und Plausibilitätskontrolle.....	115
10. Bewertung	115
11. Hydrogeologische Parameter	116
FALLBEISPIEL 5: KLUFTGRUNDWASSERLEITER	117
1. Standortbestimmung	117
2. Hydrogeologisches Arbeitsmodell	118
3. Anzahl GWM	120
4. Positionierung GWM	122
5. Meßstellenbau/Bohrlochgeophysik	123
6. Hydraulische Kennwerte	125
7. Probennahme	126
8. Parameterumfang	128
9. Emissionsermittlung über Grundwassererkundung und Plausibilitätskontrolle.....	130
10. Bewertung	133
11. Hydrogeologische Parameter	134
FALLBEISPIEL 6: POREN-/KLUFTGRUNDWASSERLEITER	135
1. Standortbeschreibung	135
2. Hydrogeologisches Arbeitsmodell	137
3. Anzahl GWM	138
4. Positionierung	140
5. Meßstellenbau/Bohrlochgeophysik	142
6. Hydraulische Kennwerte	144
7. Probennahme	145
8. Parameterumfang	147
9. Emissionsermittlung über Grundwassererkundung und Plausibilitätskontrolle.....	149
10. Bewertung	151
11. Hydrogeologische Parameter	152
A. ANHANG	153
1. LEGENDE	153
2. DIAGRAMME.....	154
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	157
TABELLENVERZEICHNIS.....	158
INDEXVERZEICHNIS.....	159

B. ANHANG: HYDROGEOLOGISCHES ARBEITSMODELL.....	161
1 ANWENDUNG DES HYDROGEOLOGISCHES ARBEITSMODELLS.....	161
1.1 FUNKTIONEN	161
1.2 VORAUSSETZUNGEN	161
2 BESCHREIBUNG	162
2.1 GRUNDSÄTZLICHE HINWEISE.....	162
2.2 KOSTENRECHNUNG	163
2.3 HYDROGEOLOGISCHE PARAMETER.....	164

Abkürzungen

Erläuterung zu den Abkürzungen s.a. Abbildung 3 (S. 10 bzw. S. 154 ff.)

A	Abstrom, z.B. c_A , Q_A
KGW	Kontaktgrundwasser, z.B. c_{KGW} , Q_{KGW}
GW	Grundwasser, z.B. c_{GW} , Q_{GW}
Z	Zustrom, z.B. c_Z , Q_Z
ZT	Zustromanteil, z.B. Q_{ZT}
SH	Gefahren- bzw. Schadensherd, z.B. c_{SH} , Q_{SH}
SiWa	Sickerwasser, z.B. c_{SiWa} , Q_{SiWa}
a	durch einen Pumpversuch nach der Pumpversuchsdauer t_{pV} erfaßte Abstrombreite rechtwinklig zur Grundwasserfließrichtung [m]
ALHB	Altlasten-Handbuch
A_A	Grundwasserquerschnittsfläche im unmittelbaren Abstrom des Gefahren- bzw. Schadensherdes $A_A = B_A * h_{GW}$ [m ²]
A_{KGW}	Grundwasserquerschnittsfläche, die der Kontaktgrundwasservolumenstrom durchfließt [m ²]
A_{SiWa}	Grundfläche des Gefahren- bzw. Schadensherdes, die der Sickerwasservolumenstrom durchsickert [m ²]
B_A	Breite der Grundwasserquerschnittsfläche A_A [m]
BN	Beweisniveau i. S. d. ALHB
c	Konzentration [µg/l]
c_A	Schadstoffkonzentration im Grundwasserabstrom eines Gefahren- bzw. Schadensherdes [µg/l]
c_{KGW}	Schadstoffkonzentration im Kontaktgrundwasser des Gefahren- bzw. Schadensherdes [µg/l]
c_{SiWa}	Schadstoffkonzentration im Sickerwasser des Gefahren- bzw. Schadensherdes [µg/l]
c_{SH}	Überbegriff für c_{SiWa} und c_{KGW} :
$c_{SH} = c_{SiWa}$	bei Lage des Gefahren- bzw. Schadensherdes in der ungesättigten Zone
$c_{SH} = c_{KGW}$	bei Lage des Gefahren- bzw. Schadensherdes in der gesättigten Zone
c_Z	Schadstoffkonzentration im Grundwasserzustrom [µg/l]
eM	einzelfallbezogene Mindestanforderung gemäß Verwaltungsvorschrift Orientierungswerte
E	Emission von Schadstoffen aus dem Gefahren- bzw. Schadensherd in das Grundwasser, abgeleitet aus E(SH) und/oder E(A) [g/d]
E_{max-W}	maximal zulässige Emission bezogen auf den Schutz von Grundwasser [g/d]
E(A)	Emission von Schadstoffen aus dem Gefahren- bzw. Schadensherd in das Grundwasser berechnet aus der Grundwassererkundung [g/d]
E(SH)	Emission von Schadstoffen aus dem Gefahren- bzw. Schadensherd in das Grundwasser berechnet aus der Gefahren- bzw. Schadensherderkundung [g/d]
GW	Grundwasser
GWL	Grundwasserleiter
GWN	Grundwasserneubildung [mm/a]
h_{GW}	Grundwassermächtigkeit [m]
h_{KGW}	Kontaktgrundwassermächtigkeit [m]
I	Grundwassergefälle [-]

k_f	Durchlässigkeitsbeiwert für Grundwasser [m/s]
KGW	Kontaktgrundwasser: Grundwasser im Kontaktbereich mit kontaminiertem Material des Gefahren- bzw. Schadensherdes
n	Anzahl der Grundwassermeßstellen [-]
n_f	durchflußwirksamer Hohlraumanteil [-]
P-W	Prüfwert zum Schutz von Grundwasser vor Schadstoffeinträgen aus kontaminiertem Boden bzw. Ablagerungsgut [$\mu\text{g/l}$]
Q_A	Grundwasservolumenstrom über die Breite des Gefahren- bzw. Schadensherdes in dessen direktem Abstrom. Q_A enthält Q_{SH} [m^3/d]
Q_{KGW}	Kontaktgrundwasservolumenstrom über die Breite des Gefahren- bzw. Schadensherdes in dessen direktem Abstrom [m^3/d]
Q_{PV}	Grundwasserentnahmerate bei einem Pumpversuch [m^3/s]
Q_{SiWa}	Sickerwasservolumenstrom, der nach Durchsickerung von kontaminiertem Material des Gefahren- bzw. Schadensherdes dem Grundwasser zuströmt [m^3/d]
Q_{SH}	Überbegriff für Q_{KGW} und Q_{SiWa} : Sickerwasservolumenstrom Q_{SiWa} bzw. Kontaktgrundwasservolumenstrom Q_{KGW} , der nach Durchsickerung von bzw. Kontakt mit kontaminiertem Material dem Grundwasser zufließt [m^3/d]
Q_Z	Grundwasservolumenstrom über die Breite des Gefahren- bzw. Schadensherdes in dessen Zustrom [m^3/d]
Q_{ZT}	Teilstrom von Q_Z , der nicht den Gefahren- bzw. Schadensherd durchströmt [m^3/d]
T	Transmissivität [m^2/s]
t_{PV}	Pumpversuchsdauer [h]
v_f	Filtergeschwindigkeit nach DARCY [m/s]
VwV	Verwaltungsvorschrift, hier: VwV Orientierungswerte
x, y	Ortskoordinaten [m]

Teil I: Strategie

1. Einleitung

1.1 Zielsetzung

Die Analyse der bisherigen Altlastenbearbeitung ergab, daß in ca. 80% der Fälle das **Schutzgut Grundwasser** bewertungsrelevant war.

Ausgehend von der Bedeutung des Schutzgutes und der Einführung der Verwaltungsvorschrift Orientierungswerte ergibt sich die Notwendigkeit eines Leitfadens "Erkundungsstrategie Grundwasser"¹.

Ziel des vorliegenden Leitfadens ist es

- sichere Entscheidungsgrundlagen für die Bewertung von Erkundungsergebnissen zu geben
 - ausgehend von der gewonnenen Entscheidungssicherheit ein frühzeitiges, sicheres Ausscheiden aus der laufenden Bearbeitung zu ermöglichen (Kostenminimierung)
 - eine einheitliche und nachvollziehbare Vorgehensweise bei der Erkundung des Schutzgutes Grundwasser für Altlasten und Schadensfälle aufzustellen
 - die Vorgehensweise bei der Erkundung des Schutzgutes Grundwasser auf die grundsätzlichen Anforderungen der VwV Orientierungswerte abzustimmen
-

Der Leitfaden ist Teil der Fortschreibung der systematischen Altlastenbearbeitung in Baden-Württemberg (Abb. 1, S. 4).

Die Gefahren- bzw. Schadensherderkundung, die einen wichtigen Baustein in der Gesamtstrategie zur Erkundung des Grundwassers darstellt, ist Gegenstand einer separaten Bearbeitung. Sie soll in einem weiteren Leitfaden zusammengefaßt werden.

¹ Gemeinsame Verwaltungsvorschrift des Umwelt- und Sozialministeriums über Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen (VwV Orientierungswerte) - Gemeinsames Amtsblatt des Landes Baden-Württemberg GABl., 33, 1993, S. 1115 - 1123.

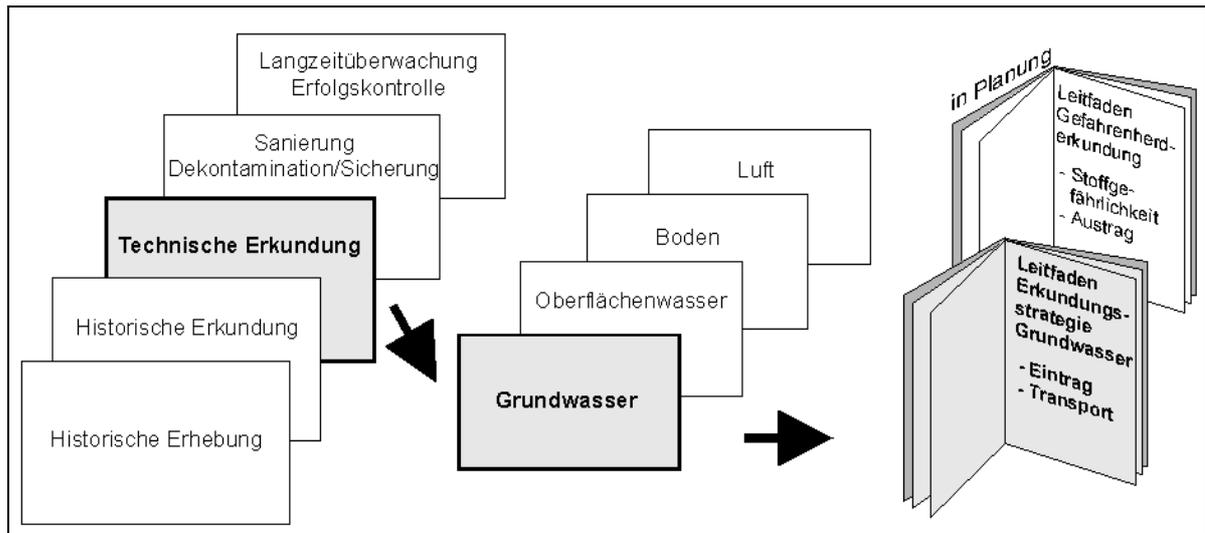


Abb. 1: Einordnung des Leitfadens Erkundungsstrategie Grundwasser

Der vorliegende Leitfaden wendet sich an alle, die mit der systematischen Altlastenbearbeitung befaßt sind, sowohl an Behörden als auch an Fachbüros.

1.2 Aufbau und Benutzerhinweise

Der vorliegende Leitfaden "Erkundungsstrategie Grundwasser" besteht aus **2 Teilen**.

- Teil I: Strategie
- Teil II: Fallbeispiele

Teil I gliedert sich in 5 Kapitel. Kapitel 1 (S. 3ff.) enthält die Zielsetzung und den inhaltlichen Aufbau des Leitfadens.

In Kapitel 2 (S. 6ff.) werden die derzeitigen Arbeitsgrundlagen der Altlastenbearbeitung in Baden-Württemberg, Altlasten-Handbuch und VwV Orientierungswerte, kurz dargestellt².

Aufbauend auf diesen Grundlagen wird in Kapitel 3 (S. 8ff.) eine allgemeine Erkundungsstrategie für das Schutzgut Grundwasser entwickelt. Sie stellt den übergeordneten Rahmen dar und vermittelt die Zusammenhänge zwischen Gefahren- bzw. Schadensherd erkundung und Grundwasser erkundung. Weiterhin werden wichtige, im Leitfaden gebrauchte Begriffe definiert.

In Kapitel 4 (S. 18ff.) wird die technische Durchführung einer Grundwasser erkundung anhand von Leitfragen unter Berücksichtigung hydrogeologischer Gegebenheiten detailliert dargestellt. Zur Erhöhung der Entscheidungssicherheit werden Qualitätsansprüche an die Erkundungsergebnisse formuliert.

Kapitel 5 (S. 53ff.) beschreibt, wie aus den Ergebnissen der Grundwasser erkundung die Emission von Schadstoffen aus einem Gefahren- bzw. Schadensherd abgeleitet werden kann.

² MINISTERIUM FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg.): Altlasten-Handbuch Teil 1: Altlasten-Bewertung. Teil 2: Untersuchungsgrundlagen. - Reihe Wasserwirtschaftsverwaltung, Heft 18 und 19. Stuttgart 1988.

Teil II ergänzt den Leitfaden durch 6 ausgewählte Fallbeispiele. Sie dienen zur näheren Erläuterung der Standardvorgehensweise und der zur Verfügung stehenden Alternativen.

Die Benutzung des Leitfadens verdeutlicht Abbildung 2.

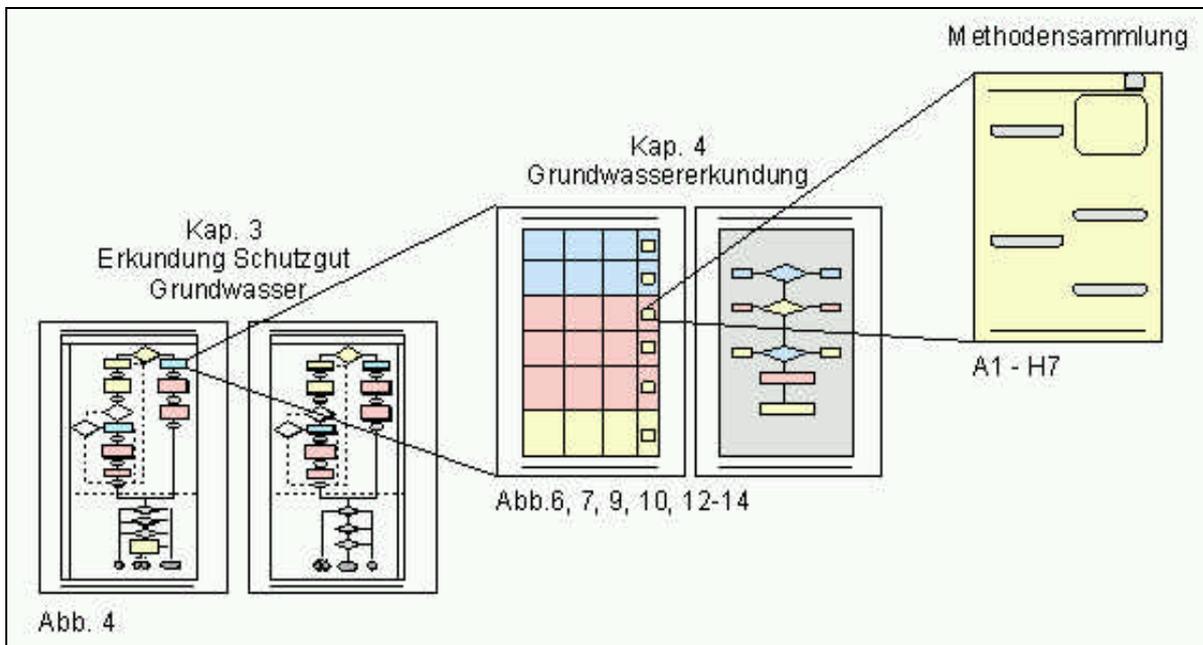


Abb. 2: Benutzung des Leitfadens Erkundungsstrategie Grundwasser

Die zur Bewertung des Schutzgutes Grundwasser im Einzelfall erforderlichen Schritte sind aus Abbildung 4 (S. 11ff. bzw. S. 155ff.) abzuleiten.

Zur technischen Durchführung des Schrittes Grundwassererkundung sind die Tabellen und Flußdiagramme (Abb. 6, 7, 9, 10, 12, 13 und 14) zu den jeweiligen Leitfragen anzuwenden. Hier werden Empfehlungen zu konkreten Fragestellungen dargestellt.

Gleichzeitig wird der Bearbeiter bei jeder Leitfrage auf Erkundungstechniken hingewiesen, die in der Loseblattsammlung Methoden zur Grundwassererkundung näher beschrieben sind³.

³ LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG: Methodensammlung. Teil 1: Methoden zur Grundwassererkundung. Materialien zur Altlastenbearbeitung, Band 20, Karlsruhe 1995.

2. Grundlagen

Die Bearbeitung von Altlasten in Baden-Württemberg erfolgt seit 1987 anhand des Altlasten-Handbuches (ALHB). Im ALHB wurde festgelegt, bei der Altlastenbearbeitung stufenweise vorzugehen. Dieses stufenweise Vorgehen ist eng verknüpft mit einer der jeweiligen Erkundungsstufe angeschlossenen Bewertung. Dadurch wird garantiert, daß für jede Stufe im Einzelfall genau bestimmt werden kann, wie vorzugehen ist. Der Handlungsbedarf wird hier über Risikofaktoren festgelegt.

Aufgrund dieser, nach einem einheitlichen Schema vorzunehmenden Bewertung, läßt sich der Handlungsbedarf ermitteln und eine landesweite Dringlichkeitsliste erstellen.

Ziel dieser Vorgehensweise ist es, als ungefährlich erkannte Standorte möglichst frühzeitig von der weiteren Bearbeitung auszuschneiden. Die Vorteile dieses Verfahrens liegen auf der Hand: die jeweils erforderliche Maßnahme wird fachlich und wirtschaftlich optimiert, die Verhältnismäßigkeit der aufgewendeten Mittel sichergestellt.

Beim stufenweisen Vorgehen werden Erkundungsstufen unterschieden, die mit einer Bewertung auf dem jeweiligen Beweismiveau (BN) abgeschlossen werden:

- historische Erhebung HistE - BN 0
- historische Erkundung E₀₋₁ - BN 1
- orientierende Erkundung E₁₋₂ - BN 2
- nähere Erkundung E₂₋₃ - BN 3
- eingehende Erkundung/Sanierungsvorplanung E₃₋₄ - BN 4

Das Bewertungsverfahren ist ein vergleichendes Verfahren, das Erkundungsergebnisse qualitativ bewertet. Es dient dazu, das Gefährdungspotential, das von einer Altlast ausgeht, im Vergleich mit einem vorgegebenem Standard zu ermitteln. Dies hat den Vorteil, daß auch völlig unterschiedliche Fälle miteinander verglichen werden können. Auch bei sehr geringen Kenntnissen über die tatsächlichen Verhältnisse im Untergrund kann eine Bewertung nach landeseinheitlichem Muster vorgenommen werden.

Die mit steigendem Kenntnisstand gewonnenen quantitativen Erkundungsergebnisse konnten aber bei der bisherigen Bewertung auf den Beweismiveaus BN 2 und BN 3 nicht in wünschenswertem Maße berücksichtigt werden.

Mit Einführung der VwV Orientierungswerte wurde ergänzend zum ALHB eine Grundlage zur Festlegung von Handlungsbedarf und Sanierungszielen für Altlasten und Schadensfälle eingeführt. Sie nennt Zahlenwerte und Regeln zur quantifizierbaren Berücksichtigung der Erkundungsergebnisse. Die Beeinträchtigung des Schutzgutes Grundwasser, ausgehend von Gefahren- bzw. Schadensherden, wird durch wirkungsbezogene Werte definiert. Dies sind die Prüfwerte (P-W-Werte) für den Schutz von Grundwasser und Grundwassernutzungen. Darüber hinaus werden tolerierbare Werte für Emissionen (E_{max}-W-Werte) aus Altlasten und Schadensfällen definiert.

Wichtige Begriffe zur Anwendung der VwV

- **Gefahrenherd**
Verdachtsfläche mit mutmaßlicher P-W-Wert Überschreitung
 - **Schadensherd**
P-W-Wert Überschreitung nachgewiesen
 - **Nutzungswürdiges Grundwasservorkommen**
als nutzungswürdig ist ein Grundwasservorkommen einzustufen, aus dem - unter Würdigung aller Umstände des Einzelfalles jetzt oder künftig - ein Entnehmen, Zutagefördern, Zutageleiten oder Ableiten von Grundwasser mit dem Ziel, dieses Wasser zu nutzen (unabhängig von der Art der Nutzung), möglich und zweckmäßig sein kann..⁴
-

⁴ LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG: Verwaltungsvorschrift Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen einschließlich Erläuterungen. - Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung xx/96. Karlsruhe 1996 (in Vorbereitung).

3. Erkundung Schutzgut Grundwasser

3.1 Grundgedanken

Die technische Erkundung von Altlasten und Schadensfällen umfaßt in der Regel

- Erkundung des Gefahren- bzw. Schadensherdes
- Erkundung der betroffenen Schutzgüter

Die Erkundung des Gefahren- bzw. Schadensherdes kann direkt erfolgen oder indirekt über die betroffenen Schutzgüter.

Im Hinblick auf das Schutzgut Grundwasser ist die entscheidende Beurteilungsgröße für den Gefahren- bzw. Schadensherd der Volumenstrom Q_{SH} und die Schadstoffkonzentration c_{SH} des Sickerwassers bzw. Kontaktgrundwassers, das dem Grundwasser zugeführt wird.

Die **direkte Emissionserkundung** (= Gefahren- bzw. Schadensherderkundung) beinhaltet daher, je nach Möglichkeit des Einzelfalles, eine Untersuchung von Sickerwasser und/oder Kontaktgrundwasser. Daneben besteht die Möglichkeit des Laborversuches zur Sickerwasser- bzw. Kontaktgrundwasserprognose (c_{SH} -Prognose).

Bedingt durch die heterogene Schadstoffverteilung im Boden bzw. im Ablagerungsgut, ist es erfahrungsgemäß schwierig, repräsentative Einzelproben zu gewinnen. Durch die Untersuchung eines Probenkollektivs kann ein Werteintervall angegeben werden. Anhand der Ergebnisse der direkten Emissionserkundung wird eine quantitative Bewertung der Gefährdung des Grundwassers möglich.

Durch die Grundwassererkundung (**indirekte Emissionsermittlung**) werden die hydrogeologischen Verhältnisse und die bereits eingetretene Schädigung des Grundwassers erfaßt. Zu erkundende Beurteilungsgrößen sind die Schadstoffkonzentration im Grundwasser und der durch die Emission beeinflusste Grundwasservolumenstrom.

Anhand der Höhe der Grundwasserbelastung und einer Quantifizierung des Volumenstroms ist eine Rückrechnung auf Volumenstrom und Schadstoffkonzentration des Sicker- bzw. Kontaktgrundwassers aus dem Gefahren- bzw. Schadensherd möglich.

Zwischen Altablagerungen, Altstandorten und Schadensfällen wird im weiteren nicht unterschieden. Die im vorliegenden Leitfaden beschriebene Vorgehensweise anhand von Leitfragen ist prinzipiell bei allen o.g. Typen anwendbar. Bei der Durchführung von Sofortmaßnahmen bei Schadensfällen ergeben sich aufgrund des Zeitbedarfes Abweichungen von der systematischen Vorgehensweise.

3.2 Erkundungsschritte

Die **Einzelschritte** der Erkundungsstrategie Schutzgut Grundwasser sowie deren relative zeitliche Abfolge sind in Abbildung 4 (S. 11ff. bzw. S. 155ff.) als Strategiediagramm dargestellt.

Die verwendete Nomenklatur orientiert sich am ALHB, der VwV Orientierungswerte und deren Erläuterungen⁵. Die für die Emissionberechnungen zu bestimmenden Eingangsgrößen sind an Hand von zwei schematisierten Fallgestaltungen graphisch dargestellt (Abb. 3 bzw. S. 154).

Berechnungsgrößen

Abbildung 3a zeigt einen Gefahren- bzw. Schadensherd, der oberhalb der freien Grundwasseroberfläche liegt. Hier wird die Emission $E(SH)$ aus Sickerwasservolumenstrom Q_{SiWa} und der Konzentration c_{SiWa} ermittelt. In Abbildung 3b ist der Fall dargestellt, bei dem der Gefahren- bzw. Schadensherd unterhalb der freien Grundwasseroberfläche liegt. Hier wird die Emission $E(SH)$ aus dem Volumenstrom des Kontaktgrundwassers Q_{KGW} und der Konzentration c_{KGW} ermittelt.

In der Praxis treten Kombinationen beider Fallgestaltungen auf (Gefahren- bzw. Schadensherd nur teilweise über der Grundwasseroberfläche). Dann sind beide Betrachtungsweisen zur Ermittlung der Emission $E(SH)$ erforderlich.

⁵ LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG: Verwaltungsvorschrift Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen einschließlich Erläuterungen. - Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung xx/96. Karlsruhe 1996 (in Vorbereitung).

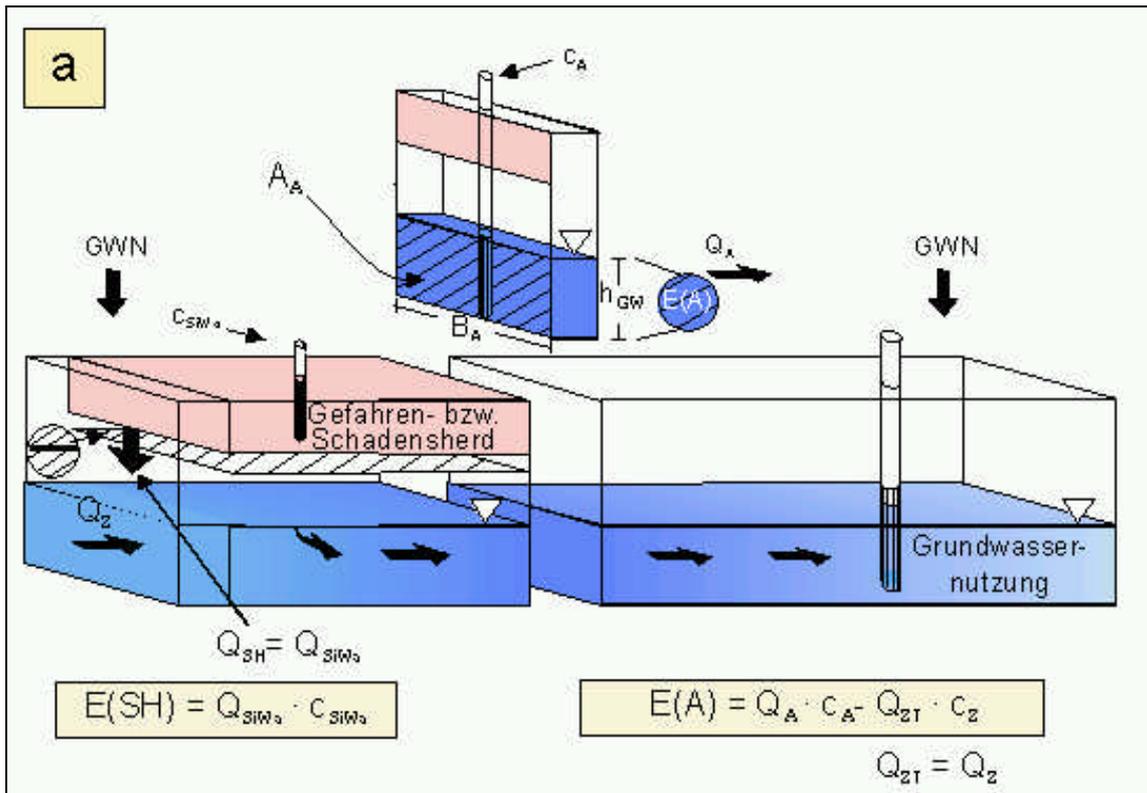
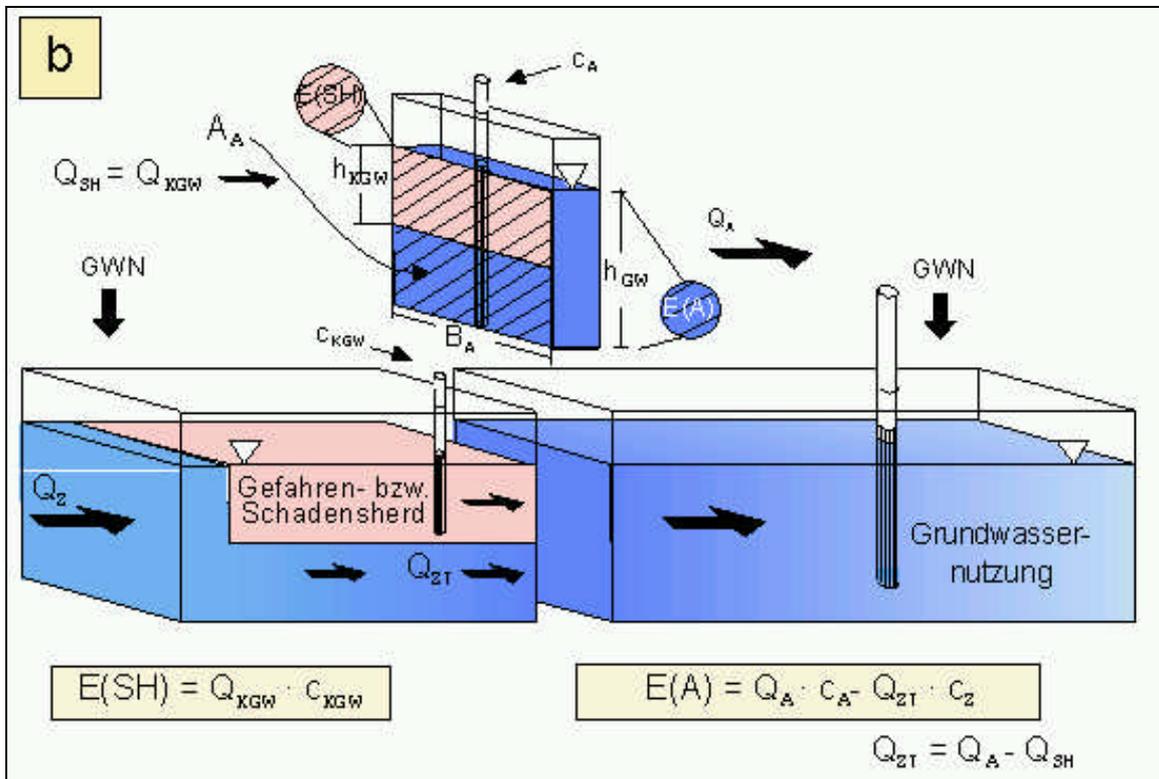


Abb. 3: Erläuterung zu den Berechnungsgrößen E(SH) und E(A) bzw. deren Eingangsgrößen

a: Gefahren- bzw. Schadensherd oberhalb der freien Grundwasseroberfläche



b: Gefahren- bzw. Schadensherd unterhalb der freien Grundwasseroberfläche

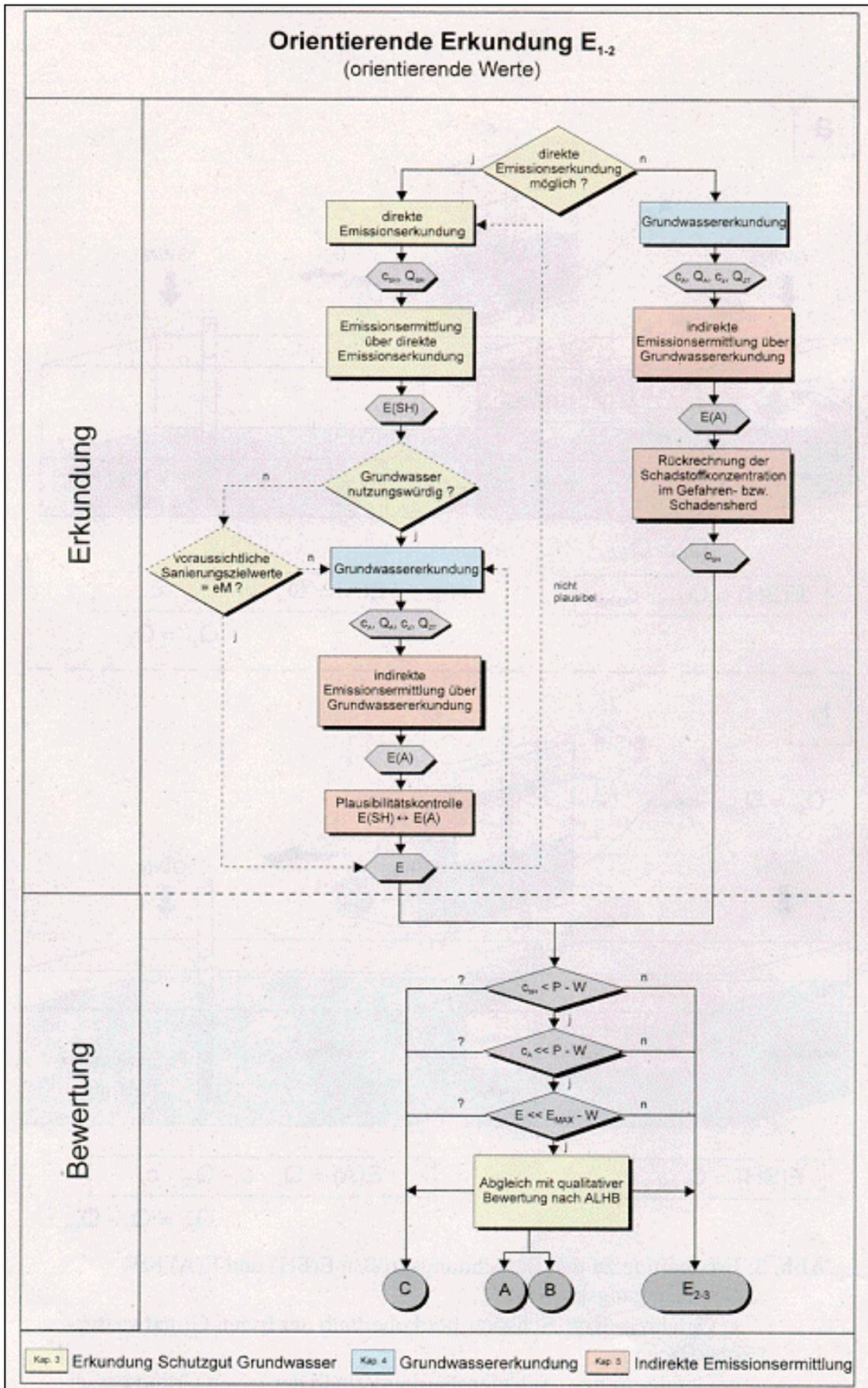
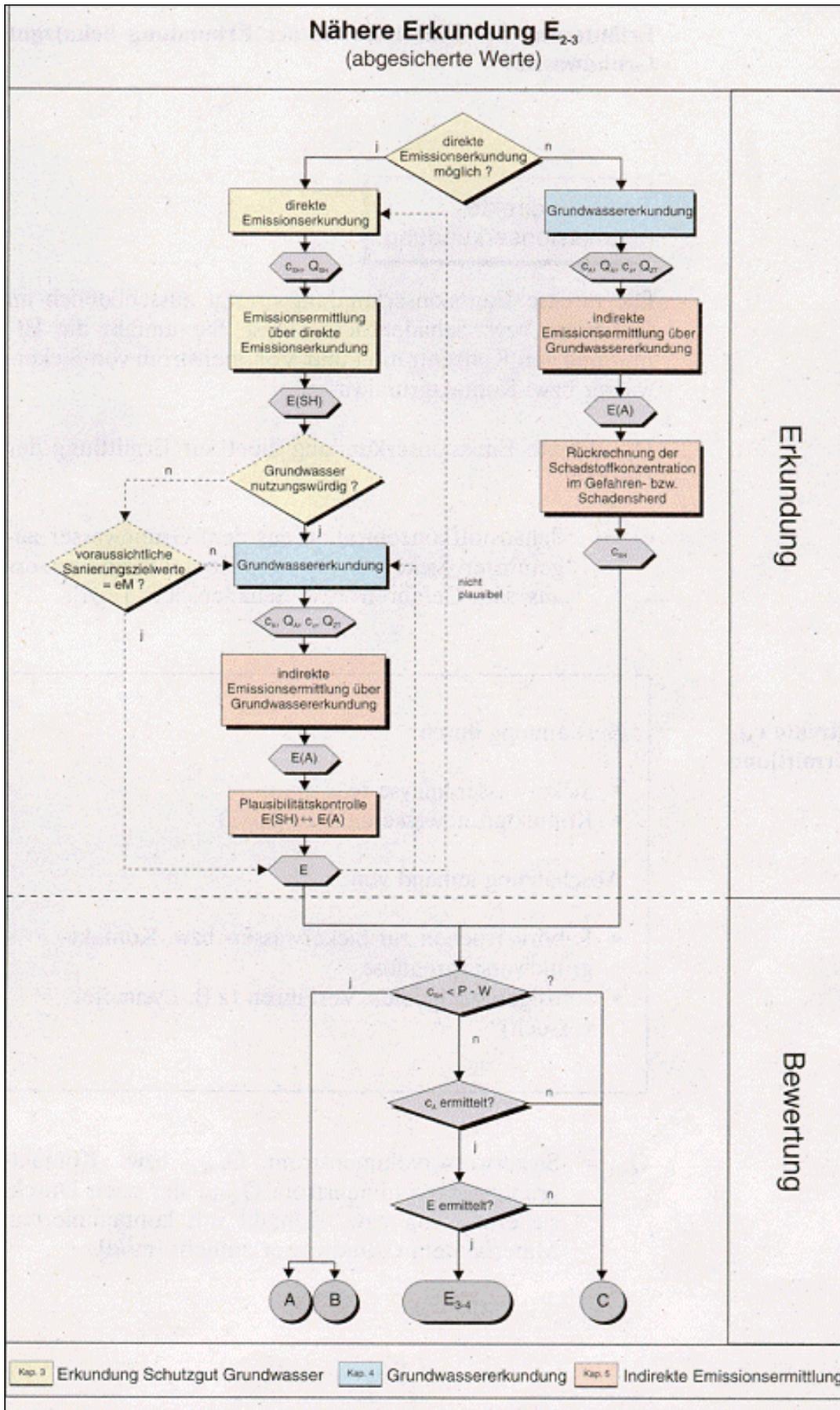


Abb. 4: Strategiediagramm Erkundung Schutzgut Grundwasser

a: Orientierende Erkundung



b: Nähere Erkundung

Erläuterung der Einzelschritte der Erkundung Schutzgut Grundwasser

Direkte Emissionserkundung

Die direkte Emissionserkundung erfolgt ausschließlich im Gefahren- bzw. Schadensherd selbst. Sie umfaßt die Ermittlung von Konzentration und Volumenstrom von Sickerwasser bzw. Kontaktgrundwasser.

Die direkte Emissionserkundung dient zur Ermittlung der Größen:

c_{SH} = Schadstoffkonzentration des dem Grundwasser zugeführten Sickerwassers bzw. Kontaktgrundwassers aus dem Gefahren- bzw. Schadensherd [$\mu\text{g/l}$].

direkte c_{SH} -Ermittlung

Bestimmung durch

- Sickerwasseranalyse (c_{SiWa})
- Kontaktgrundwasseranalyse (c_{KGW})

Abschätzung anhand von

- Laborversuchen zur Sickerwasser- bzw. Kontaktgrundwasserprognose
 - sonstigen geeigneten Verfahren (z.B. Lysimeterversuch)
-

Q_{SH} = Sickerwasservolumenstrom Q_{SiWa} bzw. Kontaktgrundwasservolumenstrom Q_{KGW} , der nach Durchsickerung von bzw. Kontakt mit kontaminiertem Material dem Grundwasser zufließt [m^3/d].

Emissionsermittlung über direkte Emissionserkundung

Aus der Schadstoffkonzentration c_{SH} und dem Volumenstrom Q_{SH} wird die Emission $E(SH)$ ermittelt.

$E(SH)$ = Emission von Schadstoffen aus dem Gefahren- bzw. Schadensherd in das Grundwasser [g/d] berechnet als

$$E(SH) = Q_{SH} * c_{SH}$$

Grundwasser nutzungswürdig?

Das zu untersuchende Grundwasser ist im Regelfall als nutzungswürdig einzustufen (Entscheidung der Fachbehörde). Eine Grundwassererkundung ist durchzuführen.

Voraussichtliche Sanierungszielwerte = eM?

Für den Sonderfall eines nicht nutzungswürdigen Grundwasservorkommens ist durch die Fachbehörde vorab zu prüfen, ob als späteres Sanierungsziel die einzelfallbezogenen Mindestanforderungen (eM) gemäß VwV Orientierungswerte zur Anwendung kommen. Dies stellt einen Vorgriff auf die normalerweise erst in der Erkundungsstufe E₃₋₄ stattfindende Festlegung von Sanierungszielen dar. Kommen die eM-Werte zur Anwendung und ist eine direkte Emissionserkundung möglich, kann auf eine Grundwassererkundung verzichtet werden.

Grundwassererkundung

Durch die Grundwassererkundung werden die Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser und die hydrogeologischen/hydraulischen Verhältnisse bestimmt. Anhand quantifizierbarer Erkundungsergebnisse kann das Maß der Grundwasserbeeinträchtigung beurteilt werden:

c_A = Schadstoffkonzentration im Grundwasserabstrom eines Gefahren- bzw. Schadensherdes [$\mu\text{g/l}$]

Q_A = Grundwasservolumenstrom über die Breite des Gefahren- bzw. Schadensherdes in dessen direktem Abstrom [m^3/d]. Q_A enthält Q_{SH} .

c_Z = Schadstoffkonzentration im Grundwasserzustrom [$\mu\text{g/l}$]

Q_{ZT} = Teilstrom von Q_Z , der nicht den Gefahren- bzw. Schadensherd durchströmt [m^3/d].

Indirekte Emissionsermittlung über Grundwassererkundung

Aus der im Grundwasser ermittelten Schadstoffkonzentration c_A und dem zugehörigen Q_A sowie c_Z und Q_{ZT} kann die Emission aus dem Gefahren- bzw. Schadensherd durch Rückrechnung indirekt ermittelt werden (Kap. 5, S. 53ff.):

$E(A)$ = Emission von Schadstoffen aus dem Gefahren- bzw. Schadensherd in das Grundwasser [g/d]
berechnet als

$$E(A) = Q_A * c_A - Q_{ZT} * c_Z$$

Vereinfachend wird angenommen, daß sich die Kontaktgrundwasserkonzentration unabhängig von der Zustrombelastung einstellt. Läßt sich nachweisen, daß die Zustrombelastung einen relevanten Einfluß auf die Kontaktgrundwasserkonzentration hat, kann dies berücksichtigt werden.

Rückrechnung auf Schadstoffkonzentration im Gefahren- bzw. Schadensherd

Ist eine direkte Emissionserkundung am Standort nicht möglich, so muß zur Bewertung des Gefahren- bzw. Schadensherdes versucht werden, aus den Ergebnissen der Grundwassererkundung auf die Schadstoffkonzentration c_{SH} zu schließen. Nach der Rückrechnung von $E(A)$ kann über die Annahme eines plausiblen Volumenstroms für Sickerwasser bzw. Kontaktgrundwasser Q_{SH} die gesuchte Konzentration c_{SH} [$\mu\text{g/l}$] ermittelt werden (Kap. 5, S. 53ff.):

$$c_{SH} = E(A) / Q_{SH}$$

Plausibilitätskontrolle $E(\text{SH}) \leftrightarrow E(\text{A})$

Wurden aus einer direkten Emissionserkundung und einer Grundwassererkundung die Emissionen $E(\text{SH})$ und $E(\text{A})$ ermittelt, muß zur Erhöhung der Entscheidungssicherheit bei der Bewertung eine Plausibilitätskontrolle durchgeführt werden. Das Ergebnis ist die Ableitung einer den Standort kennzeichnenden Emission E (Kap. 5, S. 53ff.).

Entscheidungssicherheit

Die Werte für c , Q und E sind in der orientierenden und der näheren Erkundung zu ermitteln. In einfachen Fällen werden Einzelwerte, meist jedoch Werteverteilungen, die auch zeitvariant sein können, bestimmt. D.h. es sind auch mögliche Änderungen für die Zukunft, beispielsweise durch wandernde Schadstofffronten, darzustellen.

Ist nur eine Abschätzung möglich, sollte hinsichtlich einer Erhöhung der Entscheidungssicherheit bei der Bewertung eine Randwertbetrachtung (Min-Max-Betrachtung) durchgeführt werden.

3.3 Bewertung

Auf **Beweisniveau BN 1** erfolgt gemäß ALHB eine rein qualitative **Bewertung** von Gefahrenherden und dem davon ausgehenden Risiko für die Schutzgüter.

Auf **Beweisniveau BN 2** regelt die quantitative Bewertung, ob ein Schadensherd vorliegt und wie die Beeinträchtigung der Schutzgüter zu bewerten ist. Für die Bewertung werden die orientierenden Werte c_{SH} , c_{A} und E mit den P-W- bzw. E_{max} -W-Werten der VwV Orientierungswerte verglichen.

Orientierende Werte decken mutmaßliche Belastungsschwerpunkte ab. Zu ihrer Ermittlung sind die Vorgaben zur Grundwassererkundung (Kap. 4.1, S. 18ff.) zu beachten.

Wird mindestens eines der Kriterien

$$c_{\text{SH}} < \text{P-W}$$

$$c_{\text{A}} \ll \text{P-W}$$

$$E \ll E_{\text{max}}\text{-W}$$

nicht erfüllt, so ergibt sich Handlungsbedarf hinsichtlich einer näheren Erkundung E_{2-3} für das Schutzgut Grundwasser.

Ist für den Sonderfall "nicht nutzungswürdiges Grundwasservorkommen" bereits im Verlauf der orientierenden Erkundung abzusehen, daß als zukünftiger Sanierungszielwert die einzelfallbezogene Mindestanforderung (eM) zur Anwendung kommen, muß das Kriterium

$$c_{\text{A}} \ll \text{P-W}$$

nicht erfüllt sein.

In manchen Fällen ist eine direkte Schadensherderkundung nicht zuverlässig oder nur mit sehr hohem Aufwand möglich. Dann müssen c_{SH} und E indirekt aus c_A ermittelt werden. Lassen sich in solchen Fällen im Grundwasser keine Schadstoffkonzentrationen in relevanter Größe nachweisen, sind solche jedoch zu einem späteren Zeitpunkt möglich, wird mit fachtechnischer Kontrolle (C) bewertet.

Abgleich mit qualitativer Bewertung nach ALHB

Im Stadium der orientierenden Erkundung sind die vorliegenden Werte für Schadstoffkonzentrationen sowie die hieraus abgeleiteten Emissionen als nicht abgesichert (= orientierend) einzustufen. Sie sind somit im Hinblick auf eine größtmögliche Entscheidungssicherheit als alleinige Bewertungsgrundlage nicht ausreichend. Deshalb ist trotz einer möglichen Erfüllung der drei o. g. Kriterien deren Plausibilität durch einen Abgleich mit den qualitativen Ergebnissen zu überprüfen.

Bei einer auffälligen Diskrepanz zu den vorliegenden quantitativen Ergebnissen kann weiterer Handlungsbedarf hinsichtlich einer näheren Erkundung ($E_{2.3}$) bestehen, sofern die technischen Möglichkeiten eine Verbesserung der Datenqualität zulassen. Trifft dies nicht zu, ist auf fachtechnische Kontrolle (C) zu entscheiden.

Bestätigt der Abgleich die Erfüllung der drei genannten Kriterien, kann auf Ausschneiden (A) bzw. Belassen (B) bewertet werden.

Bei einer Bewertung auf **Beweisniveau BN 3** wird ausschließlich der als abgesichert geltende Wert c_{SH} mit dem P-W-Wert verglichen. Zur Ermittlung dieses c_{SH} -Wertes sind die Vorgaben zur Grundwassererkundung (Kap. 4.1, S. 18ff.) zu beachten.

Wird das Kriterium

$$c_{SH} < P-W$$

erfüllt, kann auf Ausschneiden (A) bzw. Belassen (B) bewertet werden.

Ist auf diesem Beweisniveau eine direkte Schadensherderkundung nicht zuverlässig oder nur mit sehr hohem Aufwand möglich, muß c_{SH} indirekt aus c_A ermittelt werden. Lassen sich in solchen Fällen im Grundwasser keine Schadstoffkonzentrationen in relevanter Größe nachweisen, sind solche jedoch zu einem späteren Zeitpunkt möglich, wird mit fachtechnischer Kontrolle (C) bewertet.

Liegt c_{SH} über dem P-W-Wert, ergibt sich hieraus der Handlungsbedarf eingehende Erkundung/Sanierungsvorplanung $E_{3.4}$.

Die $E_{3.4}$ -Bearbeitung ist allerdings nur möglich, wenn für c_A und E abgesicherte Werte vorliegen.

c_A ermittelt?

E ermittelt?

Können diese nicht aus den Ergebnissen der direkten Schadensherderkundung ermittelt werden, muß c_A und c_Z im Grundwasser gemessen und $E (= E(A))$ daraus berechnet werden. Lassen sich in solchen Fällen im Grundwasser keine Schadstoffkonzentrationen in relevanter Größe nachweisen, sind solche jedoch zu einem späteren Zeitpunkt möglich, wird auch hier mit fachtechnischer Kontrolle (C) bewertet.

Ein auf der VwV Orientierungswerte basierendes Verfahren zur **Priorisierung** sanierungsnotwendiger Fälle ist entwickelt und zur Einführung vorgesehen. Mit seiner Einführung wird sich an den Anforderungen an die Erkundungsstrategie Schutzgut Grundwasser jedoch nichts ändern.

wirtschaftliche Abwägung

Grundsätzlich ist zu prüfen, ob die Bewertungskriterien c , Q und E für die jeweiligen Beweiseniveaus zuverlässig ermittelt werden können.

Dabei gilt es, Erkundungsaufwand gegen Entscheidungssicherheit unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten abzuwägen.

Bedeutet hoher Erkundungsaufwand nur einen geringen Zuwachs an Entscheidungssicherheit, dann kann unter der Annahme ungünstiger Verhältnisse bewertet werden.

4 Grundwassererkundung

4.1 Vorgehensweise

Durch die **Grundwassererkundung** im Abstrom eines Gefahren- bzw. Schadensherdes wird die Beeinträchtigung eines Grundwasservorkommens durch **Schadstoffemissionen** untersucht. Betrachtet werden die Schadstoffgehalte im Grundwasser (c_A , c_Z) sowie die hydrogeologischen Gegebenheiten am Standort zur Quantifizierung von Volumenströmen (Q_A , Q_Z). Die Bewertungskriterien c_A und $E(A)$ werden für alle vorkommenden Schadstoffe ermittelt.

Der **Grundwasservolumenstrom** Q_A (entsprechend auch Q_Z) errechnet sich nach **DARCY** aus:

$$Q_A = k_f * I * A_A$$

Die **Grundwasserquerschnittsfläche** A_A im unmittelbaren Abstrom des Gefahren- bzw. Schadensherdes wird aufgespannt durch die Breite B_A und die Grundwassermächtigkeit h_{GW} (Abb. 3, S. 10). Die Breite B_A ergibt sich aus der Breite des Gefahren- bzw. Schadensherdes rechtwinklig zur Grundwasserfließrichtung. Mögliche Schwankungen der Grundwasserfließrichtung sind hierbei zu berücksichtigen (Kap. 4.4, S. 32ff.).

Die zur Erkundung maßgebliche **Grundwassermächtigkeit** h_{GW} wird bestimmt durch die Vorgaben zur Tiefenmittelung über den direkt betroffenen Grundwasserleiter⁶.

Danach erfolgt die **Tiefenmittelung** im Regelfall über die gesamte Mächtigkeit bis zur Grundwassersohle. Bei mächtigen Grundwasserleitern sollte nur eine Tiefe von maximal 30 m herangezogen werden. Darüber hinaus sollte zur Tiefenmittelung die Tiefe, die den Schutz vorhandener Grundwasserfassungen sicherstellt, verwendet werden. Hinweise zur Tiefenmittelung, wie z.B. die Vorgehensweise bei schichtig gegliederten Grundwasserleitern geben die Erläuterungen zur VwV Orientierungswerte.

Eine Tiefenmittelung im Sinne der VwV wird erreicht durch **zuflußgewichtete** Pumpproben in vollkommenen Meßstellen (s. S. 36). Sie kann im Falle einer horizontalen Beprobung auch rechnerisch erfolgen.

Zur Bewertung gemäß Kapitel 3.3 (S. 15) ist es erforderlich, daß die ermittelten Werte einen jeweils vorgegebenen **Flächenanteil von A_A** kennzeichnen. Dies gilt sowohl für die Schadstoffkonzentration c_A als auch für die hydraulischen Parameter zur Ermittlung von Q_A .

Der durch die Werte zu kennzeichnende Flächenanteil von A_A wird in Abhängigkeit von der Erkundungsstufe definiert (Abb. 5, S. 20). Unter der Annahme eines vollkommenen Meßstellenausbaus entspricht bei konstantem h_{GW} der prozentuale Flächenanteil an A_A demselben prozentualen Anteil an der Strecke B_A .

⁶ LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG: Verwaltungsvorschrift Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen einschließlich Erläuterungen. - Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung xx/96. Karlsruhe 1996 (in Vorbereitung).

20%/50%-Kriterium

- E_{1-2} : orientierende Werte
Die für den direkt betroffenen Grundwasserleiter ermittelten Werte sind bei Prüfwertunterschreitung für mindestens 20% von A_A aussagekräftig. Die mutmaßlichen Belastungsschwerpunkte werden erfaßt⁷.
- E_{2-3} : abgesicherte Werte
Die für den direkt betroffenen Grundwasserleiter ermittelten Werte sind für mindestens 50% von A_A aussagekräftig. Die Belastungsschwerpunkte sind bekannt und werden erfaßt.

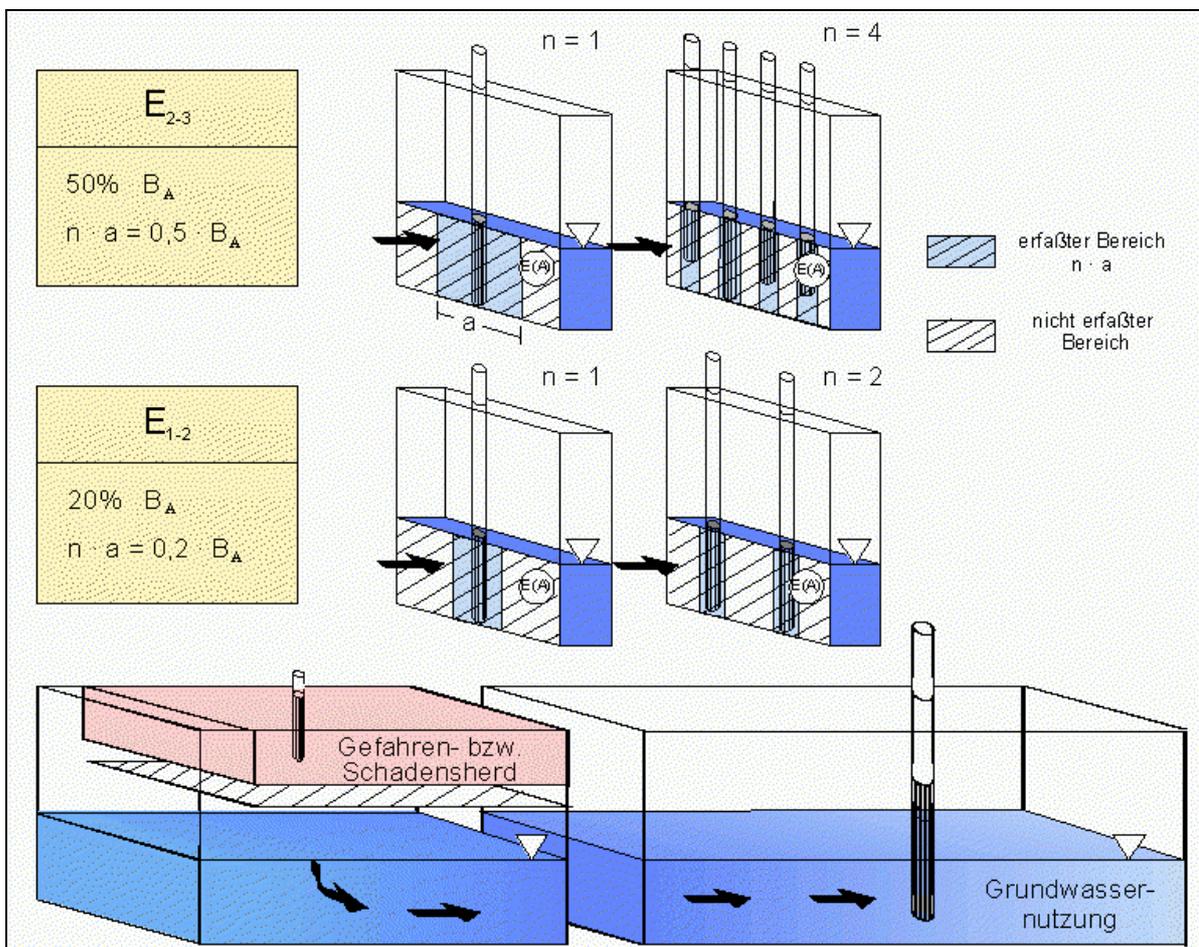


Abb. 5: Erläuterung des 20%/50%-Kriteriums

⁷ Bei den im folgenden genannten Zahlenangaben zu Flächenanteil von A_A , Grundwassermächtigkeit, Flurabstand, ungesättigter Zone und Ergiebigkeit etc. handelt es sich um Diskussionsergebnisse der Projektgruppe Erkundungsstrategie Grundwasser. Die Zahlenwerte beruhen auf Erfahrungen der beteiligten Fachleute und sind bezogen auf die hydrogeologischen Verhältnisse in Baden-Württemberg.

Bei Durchführung der Grundwassererkundung sind grundsätzlich einzelne **Themenblöcke** zu bearbeiten. Leitfragen charakterisieren diese Themenblöcke (Kap. 4.2 - 4.8, S. 21ff.).

Leitfragen

- Hydrogeologisches Arbeitsmodell (Kap. 4.2, S. 21ff.):
Welche hydrogeologischen Verhältnisse und Daten liegen vor?
 - Anzahl der Grundwassermeßstellen (Kap. 4.3, S. 24ff.):
Wieviele Grundwassermeßstellen sind zur Erkundung notwendig?
 - Positionierung von Grundwassermeßstellen (Kap. 4.4, S. 32ff.):
Wo sind die Grundwassermeßstellen zu positionieren?
 - Meßstellenbau und Bohrlochgeophysik (Kap. 4.5, S. 36ff.):
Wie soll der Meßstellenbau (Bohrtechnik, Ausbau) erfolgen, welche bohrlochgeophysikalischen Messungen werden benötigt?
 - Hydraulische Kennwerte (Kap. 4.6, S. 40ff.):
Welche hydraulischen Kennwerte sind durch welche Methoden zu ermitteln?
 - Probennahme (Kap. 4.7, S. 45ff.):
Wie werden Grundwasserproben entnommen?
 - Parameterumfang (Kap. 4.8, S. 50ff.):
Welche chemisch-physikalischen Parameter werden ausgewählt?
-

Die Beantwortung der Leitfragen erfolgt anhand von Flußdiagrammen und Tabellen (Abb. 6, 7, 9, 10, 12, 13 und 14), in denen die entscheidungsrelevanten Faktoren berücksichtigt sind.

4.2 Hydrogeologisches Arbeitsmodell

Das Ziel der Grundwassererkundung ist es, im Abstrom eines Gefahren- bzw. Schadensherdes die Beeinträchtigung eines Grundwasservorkommens zu erfassen. Dies erfordert Kenntnisse der Grundwasserströme und des Schadstofftransports. Hierbei wird das hydrogeologische Arbeitsmodell im Laufe der Erkundung mit wachsendem Kenntnisstand weiterentwickelt. Folgende Grundlagen fließen dabei ein:

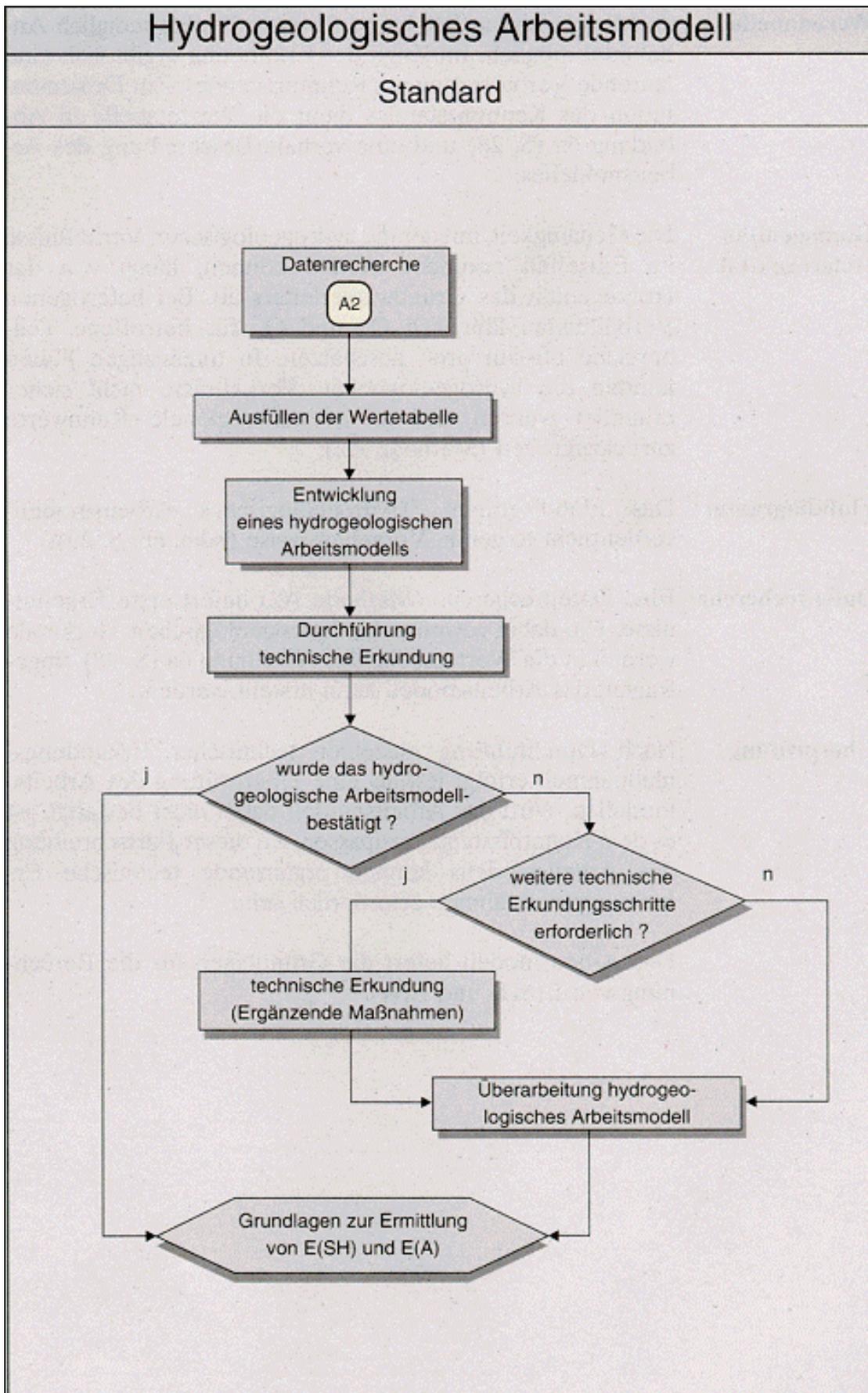
Grundlagen Arbeitsmodell

- Schichtaufbau, Schichtlagerung, Tektonik
 - Charakteristik der ungesättigten Zone
 - Homogene/heterogene Grundwasserleiter
 - Gliederung in Grundwasserstockwerke (Lage der stockwerkstrennenden Schichten, schwebende Grundwasserstockwerke)
 - Flurabstand der freien Grundwasseroberfläche bzw. Grundwasserdruckfläche unter Berücksichtigung jahreszeitlicher Schwankungen
 - Geometrie der Grundwassersohle (insbesondere bei Kiesrinnen) und der randlichen Begrenzung des Grundwasserleiters
 - Vorflutverhältnisse, Infiltration/Exfiltration
 - hydraulische Verbindungen mit benachbarten Grundwasserleitern
 - Grundwasserneubildung
 - Grundwasserfließrichtung und Abstandgeschwindigkeit mit Berücksichtigung wasserstandsabhängiger Variationen
 - Transmissivität, Durchlässigkeitsbeiwert, durchflußwirksamer Hohlraumanteil, Speicherkoeffizient, Dispersivität
 - geogene Grundwasserbeschaffenheit
 - anthropogene Schadstoffbelastung des Grundwassers
-

Hydrogeologisches Arbeitsmodell											
Hydrogeologische Parameter											
		BN1/Planung E _{1,2} (vermutet)			BN2 (orientierend)			BN3 (abgesichert)			
		min	mittel	max	min	mittel	max	min	mittel	max	plausibel
Geometrie											
A _{SiWa} [m ²]											
B _A [m]											
h _{GW} [m]											
A _A [m ²]	B _A · h _{GW}										
h _{KGW} [m]											
A _{KGW} [m ²]	B _A · h _{KGW}										
Hydraulik											
Fließrichtung [°]											
T [m ² /s]											
k _r [m/s]											
l [-]											
n _r [-]											
a [m]	Der Berechnungsansatz ist anzugeben										
Q _{pv} [m ³ /s]											
t _{pv} [h]											
Volumenströme											
Q _A [m ³ /d]	$k_r \cdot A_A \cdot l \cdot 86400$										
Q _{SiWa} [m ³ /d]	$\frac{A_{SiWa} \cdot GWN}{365000}$										
Q _{KGW} [m ³ /d]	$k_r \cdot A_{KGW} \cdot l \cdot 86400$										
Q _{SH} [m ³ /d]	Q _{SiWa} bzw. Q _{KGW} oder Q _{SH} + Q _{KGW}										
Q _{ZT} [m ³ /d]	Q _A - Q _{SH}										
GWN [mm/a]											
Emission											
c _r [µg/l]											
c _{SH} [µg/l]											
c _A [µg/l]											
E(SH) [g/d]	Q _{SH} · c _{SH} · 10 ³										
E(A) [g/d]	(Q _A · c _A - Q _{ZT} · c _r) · 10 ³										

Abb. 6: Vorgehensweise zur Aufstellung des Hydrogeologischen Arbeitsmodells

a: Hydrogeologische Parameter



b: Standard

Auf Beweisniveau BN 1 sind für viele Punkte lediglich Annahmen möglich. Im Zuge der Erkundung ergibt sich eine laufende Verbesserung des Kenntnisstandes. Zur Dokumentation des Kenntnisstandes dient die **Wertetabelle** in Abbildung 6a (S. 22) und eine verbale Beschreibung des Arbeitsmodelles.

Die Genauigkeit, mit der die hydrogeologischen Verhältnisse im Einzelfall erkundet werden können, hängt von der **Homogenität** des Grundwasserleiters ab. Bei heterogenen Verhältnissen läßt sich Q_A und Q_Z für betroffene Teilbereiche oft nur grob abschätzen. In ungünstigen Fällen können die hydrogeologischen Verhältnisse nicht sicher erkundet werden und es ist auf regionale Kennwerte zurückzugreifen (Methode A2).

Das **Flußdiagramm** "Hydrogeologisches Arbeitsmodell" verdeutlicht folgende Vorgehensweise (Abb. 6b, S. 23):

Eine **Datenrecherche** (Methode A2) liefert erste Erkenntnisse. Die dabei gewonnenen hydrogeologischen Merkmale werden in die Wertetabelle der Abbildung 6a (S. 22) eingetragen, das Arbeitsmodell kann erstellt werden.

Nach Durchführung einzelner technischer Erkundungsmaßnahmen erfolgt jeweils eine **Überprüfung** des Arbeitsmodelles. Wird das Arbeitsmodell dabei nicht bestätigt, ist es dem Kenntnisstand anzupassen. Zu dieser Fortschreibung des Arbeitsmodells können ergänzende technische Erkundungsmaßnahmen erforderlich sein.

Das Arbeitsmodell liefert die Grundlage für die Berechnung von $E(SH)$ und $E(A)$.

4.3 Anzahl der Grundwassermeßstellen

Die Anzahl erforderlicher **Grundwassermeßstellen** ergibt sich aus den je nach Beweisniveau zu erfassenden Flächenanteilen von A_A . Die Anzahl ist abhängig von der Breite B_A und der an den einzelnen Meßstellen zu erfassenden Abstrombreite a . Voraussetzung für die **Ermittlung der Lage der Strecke B_A** ist die Kenntnis der Grundwasserfließrichtung. Sie kann über eine Meßstellenanordnung in Form eines hydrogeologischen Dreieckes (Methode D1) bestimmt werden.

Die Breite B_A ergibt sich aus der Breite des Gefahrenherdes rechtwinklig zur Grundwasserfließrichtung und deren Schwankungsbereich (Kap. 4.4, S. 32ff.). Durch die Grundwassermeßstellen soll ein definierter Anteil von B_A untersucht werden. Dies erfolgt durch Pumpversuche und die dabei **erfaßte Abstrombreite a** . Mit Hilfe des hydrogeologischen Arbeitsmodells kann a bestimmt bzw. abgeschätzt werden. Neben der Ergiebigkeit der Meßstelle ist a abhängig von der Pumpversuchsdauer t_{PV} und der Entnahmerate Q_{PV} .

Faustformel

Bei heterogenen Grundwasserleitern ist die Bestimmung der Meßstellenanzahl über die Abstrombreite a oft nicht möglich oder nur grob abschätzbar, da beispielsweise Kluftabstände und Wasserwegsamkeiten nicht hinreichend bekannt sind. In diesen Fällen sollte zunächst eine Meßstelle pro 50 lfm von B_A eingerichtet werden. Für Standorte durchschnittlicher Größe wird damit sichergestellt, zunächst mit maximal 1 - 3 Meßstellen für die Ersterkundung auszukommen.

Kann für a ein Wert zuverlässig angegeben werden (s. S. 30ff.), erfolgt die Ermittlung der Meßstellenanzahl n iterativ (s. S. 25) nach dem Kriterium:

Kriterium für a

$n * a = 0,2 * B_A$ für E_{1-2} bzw.

$n * a = 0,5 * B_A$ für E_{2-3}

a = erfaßte Abstrombreite nach Pumpdauer t_{PV} [m]

n = Meßstellenanzahl [-]

B_A = Breite der Grundwasserquerschnittsfläche [m]

Für die Planung bedeutet dies, daß durch die gewählte Kombination von Meßstellenanzahl, Pumpversuchsdauer und Entnahmerate die Möglichkeit einer Erfassung von mindestens 20% bzw. 50% der Grundwasserquerschnittsfläche A_A bestehen soll.

Iterative Bestimmung von n und a

Zugeschnitten auf den Einzelfall erfolgt eine Variation der Parameter Meßstellenanzahl n und der erfaßten Abstrombreite a . Berücksichtigt werden hier technische und finanzielle Aspekte zur standortgerechten Umsetzung der geplanten Erkundungsmaßnahmen.

Bei kleinem Flurabstand können relativ einfach und preiswert mehrere Grundwasseraufschlüsse hergestellt werden, so daß hier die Gewichtung zugunsten einer größeren Meßstellenanzahl ausfallen wird. Bei großem Flurabstand ist meist aus Kostengründen eine hohe Meßstellendichte nicht zu realisieren.

Durch die Wahl einer hohen Entnahmerate und einer langen Versuchszeit bis zur Probennahme kann eine große Abstrombreite a je Meßstelle erfaßt werden. Um dadurch keine übermäßige Verdünnung zu bewirken, **sollte a nicht mehr als 20 m betragen.**

Durch die schrittweise Vorgehensweise muß unter erkundungstechnischen und **kostenminimierenden Gesichtspunkten** versucht werden, eine für den Einzelfall optimale Kombination von Meßstellenanzahl, Entnahmerate, Pumpversuchsdauer und erzielter Erfassung des Grundwasserabstromes zu erreichen.

Bei der Festlegung der Anzahl notwendiger Grundwassermeßstellen zur Erfassung des vorgegebenen Flächenanteiles von A_A sind auch geeignete, bereits **vorhandene Grundwasseraufschlüsse** (z. B. Quellen) zu berücksichtigen. Die Eignung vorhandener Grundwassermeßstellen muß bezüglich ihrer Lage zu B_A und dem Meßstellenausbau überprüft werden.

Die aus der Faustformel bzw. aus der iterativen Bestimmung ermittelte Meßstellenanzahl n stellt die im Abstrom notwendige Meßstellenanzahl dar.

Sind aus dem Zustrom des Gefahren- bzw. Schadensherdes keine zuverlässigen Daten vorhanden, ist eine weitere Meßstelle (**Zustrommeßstelle**) einzurichten. Sofern diese nur zur Messung des Grundwasserstandes dient, reicht eine flache 2"-Meßstelle aus.

Neben der Abschätzung der zu erfassenden Abstrombreite in der Planungsphase, sollte nach der Durchführung von Pumpversuchen eine **Überprüfung der tatsächlich erreichten Abstrombreite** unter Verwendung der ermittelten Werte erfolgen.

Bei einer Unterschreitung des zu erfassenden Flächenanteiles

$$n * a = 0,2 * B_A \text{ für } E_{1-2} \text{ bzw.}$$

$$n * a = 0,5 * B_A \text{ für } E_{2-3}$$

ist im Einzelfall zu prüfen, ob weitere technische Erkundungsmaßnahmen erforderlich sind.

Zu einzelnen Handlungsanweisungen im Standard (Abb. 7b, S. 28) können für bestimmte einzelfallspezifische Besonderheiten nachfolgende **Alternativen** (Abb. 7a, S. 27) angewendet werden.

Bei **hohen Grundwasserflurabständen** ($> 30 \text{ m}$)⁸ kann der durch die Meßstelle zu erfassende Flächenanteil von A_A verringert werden

auf 10% von B_A für E_{1-2}

auf 25% von B_A für E_{2-3} .

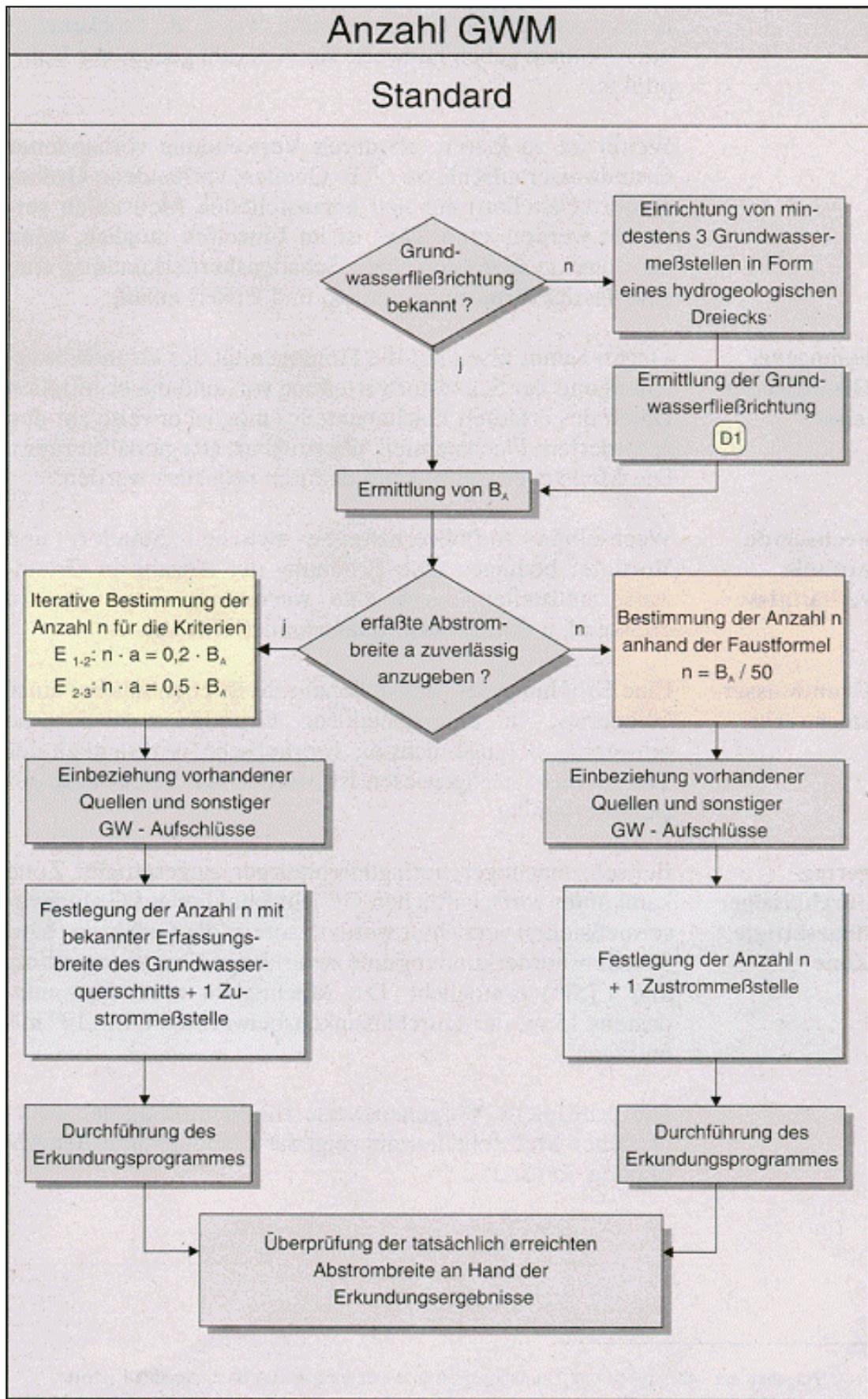
Bei **sehr heterogenen Verhältnissen** (z. B. ausgeprägte Verkarstung) und hohem Grundwasserflurabstand besteht die Möglichkeit, von der Anwendung der Faustformel abzuweichen. Die Anzahl der Grundwassermeßstellen kann dann unter der nach der Faustformel ermittelten liegen.

⁸ Bei den im folgenden genannten Zahlenangaben zu Flächenanteil von A_A , Grundwassermächtigkeit, Flurabstand, ungesättigter Zone und Ergiebigkeit etc. handelt es sich um Diskussionsergebnisse der Projektgruppe Erkundungsstrategie Grundwasser. Die Zahlenwerte beruhen auf Erfahrungen der beteiligten Fachleute und sind bezogen auf die hydrogeologischen Verhältnisse in Baden-Württemberg.

Anzahl GWM		
Alternative		
Einzelfallspezifische Besonderheit	Abweichungen/Alternativen zum Standard	Methodenbeschreibung
GW - Flurabstand > 30 m	- reduzieren der zu erfassenden Abstrombreite auf 10% (E _{1,2}) und 25% (E _{2,3})	
sehr heterogene Verhältnisse: z. B. ausgeprägte Verkarstung und hoher Grundwasserflurabstand	- Festlegung der Anzahl von Meßstellen nach karsthydrologischen Gesichtspunkten - Beschränkung auf vorhandene aussagekräftige GW - Aufschlüsse (z. B. Quellen) - Verzicht auf GW - Meßstellen wenn eine direkte Gefahren- bzw. Schadensherderkundung möglich ist	
Gefahren- bzw. Schadensherderkundung und Aufbau des Grundwasserleiters lassen homogene Schadstoffverteilung erwarten	- Reduzierung der Meßstellenanzahl gegenüber Standard, da auf zu erfassende Abstrombreite a aus kleinen tatsächlich erkundeten Teilflächen rechnerisch geschlossen werden kann	
wechselnde Abflußverhältnisse zwischen Standort und Vorfluter	- Erhöhung der Anzahl an GWM aufgrund wechselnder Lage der Grundwasserquerschnittsfläche (A _s)	
mehrere GW - Stockwerke sind vorhanden	E _{2,3} : - Erhöhung der Meßstellenanzahl zur Erkundung des tieferen GW - Stockwerks	
Mächtigkeit der ungesättigten Zone > 15 m und Durchlässigkeitsbeiwert < 1·10 ⁻⁷ m/s	- Verzicht auf GW - Meßstellen, wenn Gefahren- bzw. Schadensherderkundung möglich	

Abb. 7: Vorgehensweise zur Bestimmung der Anzahl Grundwassermeßstellen

a: Alternative



b: Standard

Karsthydrologische Gesichtspunkte, wie z. B. Trockentäler oder Dolinen geben Hinweise zur Auswahl geeigneter Bohrpunkte.

Weiter ist zu klären, ob durch Verwendung vorhandener Grundwasseraufschlüsse (z. B. Quellen, vorhandene Grundwassermeßstellen) auf neu herzustellende Meßstellen verzichtet werden kann. Dies ist im Einzelfall möglich, wenn eine direkte Gefahren- bzw. Schadensherderkundung eine zuverlässige Ermittlung von c_{SH} und $E(SH)$ zuläßt.

Liegen Kenntnisse über die **Homogenität des Grundwasserleiters** und der Schadstoffverteilung vor, sind die ermittelten Daten des erfaßten Flächenanteiles möglicherweise auf den geforderten Flächenanteil übertragbar (Regionalisierung). Die Meßstellenanzahl kann dadurch reduziert werden.

Wechselnde Abflußverhältnisse zwischen Standort und Vorfluter bedingen eine Erhöhung der Anzahl an Grundwassermeßstellen durch eine wechselnde Lage der zu erfassenden Grundwasserquerschnittsfläche A_A .

Eine Erhöhung der Meßstellenanzahl ist ebenfalls bei einer Gliederung in unterschiedliche **Grundwasserstockwerke** notwendig. Solange nicht die hydraulische Wirksamkeit der Trennschicht nachgewiesen ist, werden die Stockwerke getrennt erkundet.

Bei sehr mächtiger, **geringdurchlässiger, ungesättigter Zone** kann unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten auf Grundwassermeßstellen verzichtet werden, sofern die Gefahren- bzw. Schadensherderkundung eine zuverlässige Ermittlung von c_{SH} und $E(SH)$ ermöglicht. Die Mächtigkeit muß dazu mindestens 15 m, der Durchlässigkeitsbeiwert $k_f < 1 \cdot 10^{-7}$ m/s betragen⁹.

Die prinzipielle Vorgehensweise zur Ermittlung der erforderlichen Meßstellenanzahl zeigt das Flußdiagramm der Abbildung 7b (S. 28).

⁹ Angaben zur Mächtigkeit und Durchlässigkeit in Anlehnung an TA Siedlungsabfall (Dritte Allgemeine VwV zum Abfallgesetz vom 14.05.1993): Anforderung an geologische Barriere unterhalb Deponieplanum $k_f < 1 \cdot 10^{-7}$ m/s und Mächtigkeit > 3 m.

Ermittlung der erfaßten Abstrombreite a

Die erfaßte Abstrombreite a kann in erster Näherung abgeschätzt werden:

Abb. 8a: Zylinderformel¹⁰

$$a = 2 \cdot \sqrt{\frac{t_{PV} \cdot Q_{PV} \cdot 3.600}{\pi \cdot h_{GW} \cdot n_f}} \Rightarrow t_{PV} = \frac{a^2 \cdot \pi \cdot h_{GW} \cdot n_f}{Q_{PV} \cdot 14.400}$$

(abgeleitet aus der
"Zylinderformel der Porengeschwindigkeit")¹⁰

a = erfaßte Abstrombreite der Meßstelle zum Zeitpunkt t_{PV} [m]
 t_{PV} = Pumpversuchsdauer [h]
 Q_{PV} = Entnahmerate [m^3/s]
 h_{GW} = Grundwassermächtigkeit [m]
 n_f = durchflußwirksamer Hohlraumanteil

Die Beziehung beschreibt, aus welcher Entfernung $a/2$ Wasser während eines Pumpversuches die Meßstelle erreicht. Die Entfernung hängt hierbei von der Auslegung des Pumpversuches (t_{PV} , Q_{PV}) und von den hydrogeologischen Parametern (n_f , h_{GW}) ab.

Die Zylinderformel kann strenggenommen nur unter den vereinfachenden Annahmen

- einer vernachlässigbaren natürlichen Grundwasserfließgeschwindigkeit
- einer radialsymmetrischen Anströmung der Meßstelle während der Entnahme (homogener Grundwasserleiter)

angewendet werden. Die Zylinderformel ist in vielen Fällen ausreichend zur ersten Bestimmung von a .

Bei einer nicht vernachlässigbaren Grundwasserfließgeschwindigkeit beschreibt folgende Gleichung die Zuströmung (**Strömungsgleichung**):¹¹

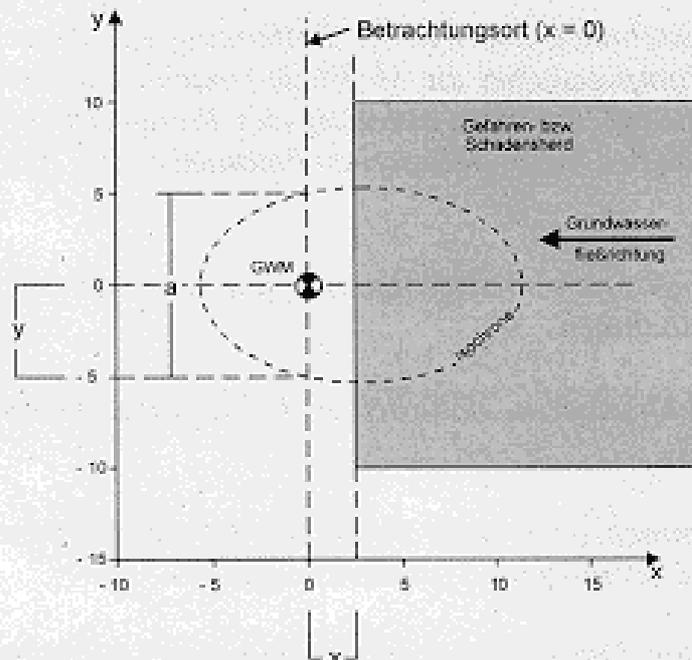
¹⁰ LANGGUTH, H.-R./VOIGT, R.: Hydrogeologische Methoden, Berlin 1980, S. 226 ff.

¹¹ BEAR, J./JACOBS, M. (1965) in: MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND FORSTEN BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg.): Leitfaden für die Beurteilung und Behandlung von Grundwasserverunreinigungen durch leichtflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe - Reihe Wasserwirtschaftsverwaltung, Heft 13. Stuttgart 1983, S. 51.

$$t_{PV} = \left(\frac{n_f \cdot Q_{PV} \cdot 86.400}{2\pi \cdot v_f^2 \cdot h_{GW}} \cdot \left[x \cdot \frac{2\pi \cdot h_{GW} \cdot v_f}{Q_{PV} \cdot 86.400} \right. \right. \\ \left. \left. - \ln \cdot \left(x \cdot \sin \left[y \cdot \frac{2\pi \cdot h_{GW} \cdot v_f}{Q_{PV} \cdot 86.400} \right] / y \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \cos \left[y \cdot \frac{2\pi \cdot h_{GW} \cdot v_f}{Q_{PV} \cdot 86.400} \right] \right) \right] \right) \cdot 24$$

Linien gleicher Fließzeit (Isochronen) bei stationärer, paralleler Grundströmung¹⁾

- t_{PV} = Pumpversuchsdauer [h]
 n_f = durchflußwirksamer Hohlraumanteil [-]
 Q_{PV} = Entnahmerate [m³/s]
 v_f = Filtergeschwindigkeit $v_f = k_f \cdot I \cdot 86.400$ [m/d]
 h_{GW} = Grundwassermächtigkeit [m]
 x, y = Ortskoordinaten [m] s. Abb. 8
 Argument für sin und cos im Bogenmaß



a = erfaßte Abstrombreite für $x = 0$ m [m]

Abb. 8b: Darstellung der Ortskoordinaten zur Strömungsgleichung nach BEAR & JACOBS

In Tabelle 1 sind beispielhaft die nach der Gleichung von BEAR & JACOBS und nach der Zylinderformel berechneten Fließzeiten für unterschiedliche erfaßte Abstrombreiten dargestellt. Variiert werden die Parameter Entnahmerate Q_{PV} , Durchlässigkeitsbeiwert k_f , durchflußwirksamer Hohlraumanteil n_f und das hydraulische Gefälle I .

$h_{GW} = 20 \text{ m}$ $x = 0$ $y = a/2$			$t_{PV} \text{ [h]}$					
			$a = 10 \text{ m}$			$a = 5 \text{ m}$		
Q_{PV} [m ³ /s]	k_f [m/s]	n_f [-]	BEAR & JACOBS		Zylinderformel	BEAR & JACOBS		Zylinderformel
			$I=0,001$	$I=0,01$		$I=0,001$	$I=0,01$	
0,01	$1 \cdot 10^{-2}$	0,2	9,4	n.b.	8,7	2,2	n.b.	2,2
0,005	$1 \cdot 10^{-2}$	0,2	26,0	n.b.	17,5	4,7	n.b.	4,4
0,005	$1 \cdot 10^{-3}$	0,2	17,5	26,0	17,5	4,4	4,7	4,4
0,003	$1 \cdot 10^{-4}$	0,25	36,4	36,6	36,4	9,1	9,1	9,1
0,002	$1 \cdot 10^{-4}$	0,05	10,9	11,1	10,9	2,7	2,7	2,7
0,001	$1 \cdot 10^{-6}$	0,15	65,5	65,5	65,4	16,4	16,4	16,4
0,001	$1 \cdot 10^{-5}$	0,05	21,8	21,8	21,8	5,5	5,5	5,5
0,0003	$1 \cdot 10^{-6}$	0,05	72,7	72,7	72,7	18,2	18,2	18,2
0,0002	$1 \cdot 10^{-5}$	0,01	21,8	21,8	21,8	5,5	5,5	5,5

n.b.: t_{PV} nicht bestimmbar, Punkt (x;y) liegt außerhalb der Trennstromlinie

Tab. 1: Fließzeiten berechnet nach BEAR & JACOBS und nach der Zylinderformel für erfaßte Abstrombreiten von $a = 10 \text{ m}$ und $a = 5 \text{ m}$ im Lockergestein

Tabelle 1 verdeutlicht, daß bei hohem Durchlässigkeitsbeiwert k_f in Verbindung mit hohem Grundwassergefälle I , der Rechenansatz nach BEAR & JACOBS vorzuziehen ist.

4.4 Positionierung von Grundwassermeßstellen

Zur Positionierung der erforderlichen **Grundwassermeßstellen** ist B_A zu ermitteln. Dies erfolgt anhand der Grundwasserfließrichtung (Kap. 4.3, S. 24 und Methode D1) und der Geometrie des Gefahren- bzw. Schadensherdes (Abb. 9a, S. 34).

Bei bekannter und **gleichbleibender Grundwasserfließrichtung** ergibt sich B_A rechtwinklig zur Fließrichtung unmittelbar im Abstrom des Gefahren- bzw. Schadensherdes. B_A wird dabei begrenzt durch die Einhüllenden des Gefahren- bzw. Schadensherdes in Fließrichtung. Läßt sich bei wechselnder Grundwasserfließrichtung eine vorherrschende Richtung bestimmen, kann ebenso verfahren werden.

Wenn jedoch der **Schwankungsbereich der Fließrichtung** berücksichtigt werden muß, ist dies nicht zulässig. Dann werden zuerst die Tangenten in Richtung der beiden extremen Fließrichtungen an den Gefahren- bzw. Schadensherd gelegt. B_A liegt senkrecht zur Winkelhalbierenden.

Der Abstand von Grundwassermeßstellen zum Gefahren- bzw. Schadensherd sollte zur Minimierung nicht quantifizierbarer Verdünnungseffekte im Bereich des einfachen Flurabstandes

liegen, jedoch 30 - 50 m nicht übersteigen¹². Dabei sind Möglichkeiten des lateralen Schadstofftransportes in der ungesättigten Zone zu berücksichtigen.

Durch die Lage der Grundwassermeßstellen nahe an B_A , kann vereinfachend deren erfaßte Abstrombreite a parallel zu B_A als Streckenanteil von B_A bestimmt werden.

Ein **geometrischer Ansatz** zur Positionierung der Grundwassermeßstellen ist möglich, wenn die Schadstoffausbreitung in ungesättigter und gesättigter Zone in grober Näherung als homogen betrachtet werden kann. Dann sind die Meßstellen mehrheitlich so entlang B_A anzuordnen, daß sie überwiegend den Abstrom des Flächen- bzw. Konzentrationsschwerpunkts erfassen.

Ansonsten lassen sich verschiedene Untersuchungsverfahren zur Festlegung der Bohrpunkte heranziehen.

Hinweise aus **Fotolineationen** (Methode A1) sind zur Positionierung von Grundwassermeßstellen im Festgestein dann heranzuziehen, wenn Lineare im Bereich des Gefahren- bzw. Schadensherdes oder im unmittelbaren Umfeld erkennbar oder bekannt sind.

Durch **geoelektrische Untersuchungen** können bevorzugte Fließwege oder bei geringem Flurabstand Schadstoffahnen abgegrenzt werden. Durch seismische Untersuchungen lassen sich Störungszonen und Grenzschichten lokalisieren (Methoden G1 - G7).

Geomorphologische Erscheinungsformen können zur Positionierung von Grundwassermeßstellen ebenso herangezogen werden wie Ergebnisse aus **Markierungsversuchen** (Methode E9).

¹² Bei den im folgenden genannten Zahlenangaben zum Flurabstand handelt es sich um Diskussionsergebnisse der Projektgruppe Erkundungsstrategie Grundwasser. Die Zahlenwerte beruhen auf Erfahrungen der beteiligten Fachleute und sind bezogen auf die hydrogeologischen Verhältnisse in Baden-Württemberg.

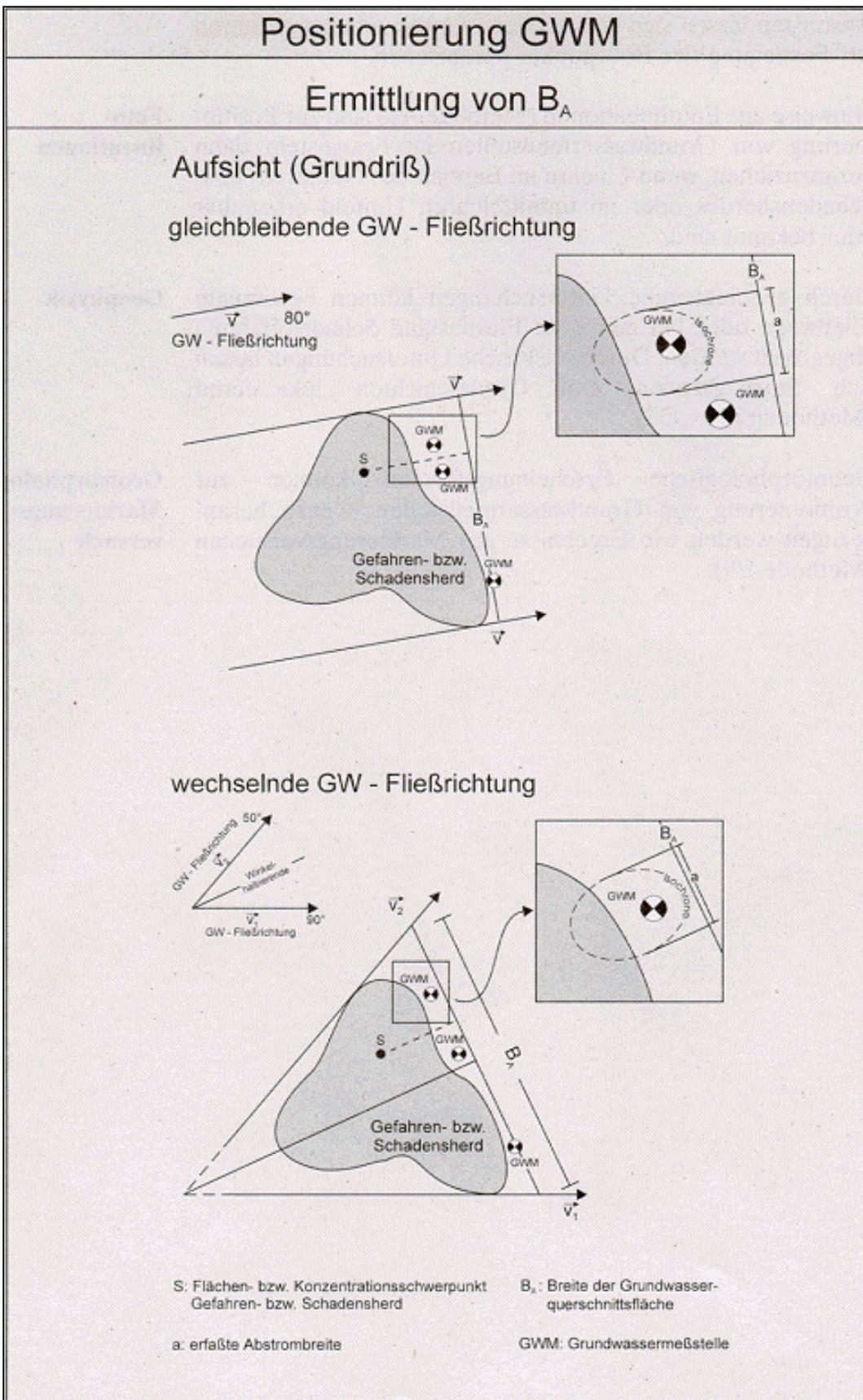
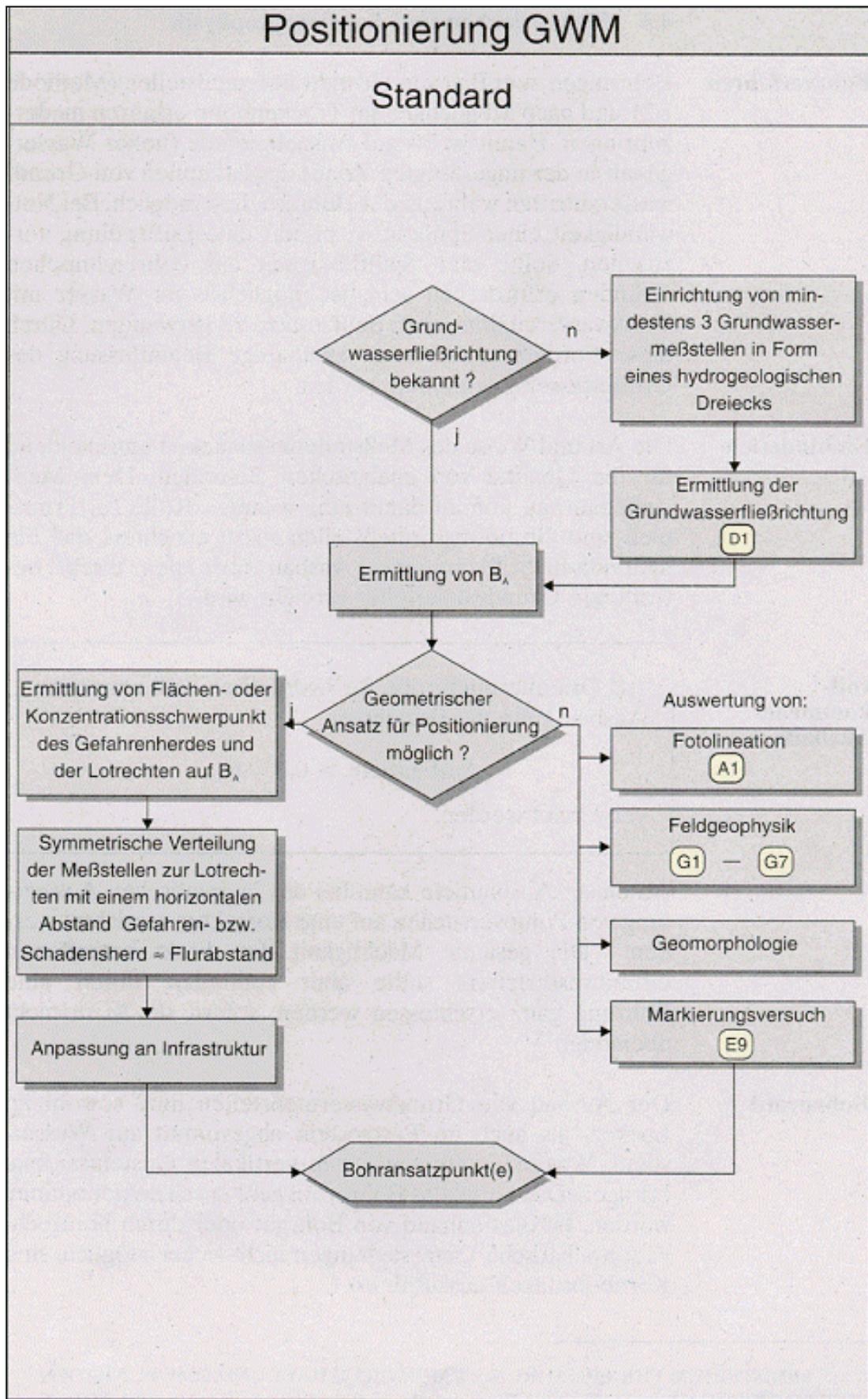


Abb. 9: Positionierung Grundwassermeßstellen

a: Ermittlung von B_A



b: Standard

4.5 Meßstellenbau und Bohrlochgeophysik

Bohrverfahren

Bohrungen zum Bau von Grundwassermeßstellen (Methode B2) sind nach Möglichkeit im Trockenbohrverfahren niederzubringen. Damit ist bis auf Ausnahmefälle (hoher Wassergehalt in der ungesättigten Zone) das Erkennen von Grundwasserzutritten während der Bohrarbeiten möglich. Bei Notwendigkeit einer Spülung ist primär eine Luftspülung vorzusehen. Sollte eine Spülflüssigkeit aus bohrtechnischen Gründen erforderlich sein, ist möglichst nur Wasser mit Trinkwasserqualität ohne Spülzusätze zu verwenden. Durch diese Forderung soll eine nachhaltige Beeinflussung des Grundwassers vermieden werden.

Einbindetiefe

Die Art und Weise des Meßstellenausbaues ist entscheidend für die Qualität von analytischen Befunden. Dem Meßstellenausbau kommt damit eine wichtige Rolle zu. Prinzipiell sind Grundwassermeßstellen so zu errichten, daß ein hydraulisch vollkommener Ausbau über den direkt betroffenen Grundwasserleiter erreicht wird.

Als Orientierungsgröße für hydraulisch **vollkommenen Ausbau** kann die Beziehung

$$\text{Ausbautiefe} > 0,7 * h_{\text{GW}}$$

verwendet werden.

Ab dieser Ausbautiefe kann bei der hydraulischen Auswertung von Pumpversuchen auf eine Korrektur verzichtet werden¹³. Die gesamte Mächtigkeit des direkt betroffenen Grundwasserleiters sollte aber zumindest durch eine Bohrung ganz erschlossen werden, sofern sie 30 m nicht übersteigt.

Der Ausbau von Grundwassermeßstellen muß sowohl im Locker- als auch im Festgestein abgestimmt auf Wasserstand, Wasserzutritte sowie den vertikalen Gesteinsaufbau erfolgen. Dazu muß das **Bohrprofil** geologisch aufgenommen werden. Ist dies anhand von Bohrgut oder durch bohrlochgeophysikalische Untersuchungen nicht sicher möglich, sind Kernbohrungen auszuführen.

Ein **bohrlochgeophysikalisches Standardprogramm** (Methoden H1 - H7) ist grundsätzlich bei einer aufgeschlossenen Grundwassermächtigkeit von mehr als 10 m im unverrohrten Bohrloch auszuführen. Es umfaßt Flowmeter-, Temperatur-, Salinometer-, Gamma-Ray-, Kaliber- und Elektrik-Log. Sollte aufgrund der Gebirgseigenschaften eine Verrohrung z. B. in Form von einem Stützfilterrohr notwendig sein, wird das Standardprogramm um das Kaliber-Log reduziert.

¹³ MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg.): Arbeitsblatt Pumpversuche im Porengrundwasserleiter. - Schriftenreihe Wasserwirtschaftsverwaltung Baden-Württemberg. 124 S., Stuttgart 1976.

Liegen schwebende Grundwasserkörper oder mehrere schichtgebundene Zuflüsse vor, ist im Einzelfall ein **tiefendifferenzierter Ausbau** oder jeweils getrennte Meßstellen vorzusehen (Methode C2).

Insbesondere bei tiefen Grundwassermeßstellen kann zur Funktionskontrolle eine **Überprüfung des Ausbaues** nach Fertigstellung durch eine Kamerabefahrung oder bohrlochgeophysikalische Untersuchungen zweckmäßig sein. Durch das Gamma-Ray- und das Elektrik-Log können in günstigen Fällen Tonabdichtungen und Filterkies bzw. Filter- und Vollrohrstrecken unterschieden werden. Durch das Flowmeter, das Salinometer- und das Temperatur-Log können Wasserzutritte in der Meßstelle ermittelt werden.

Bei **gespannten Grundwasserverhältnissen** bleibt die Filterstrecke auf den Bereich des Grundwasserleiters beschränkt. Ansonsten sollte die Filterstrecke 1 - 2 m über den höchsten zu erwartenden Grundwasserstand vorgesehen werden (Methode B5).

Eine Durchführung von Bohrlochgeophysik und/oder Kamerabefahrung sind zur Eignungsprüfung von bestehenden Meßstellen mit **unbekanntem Ausbau** unerlässlich.

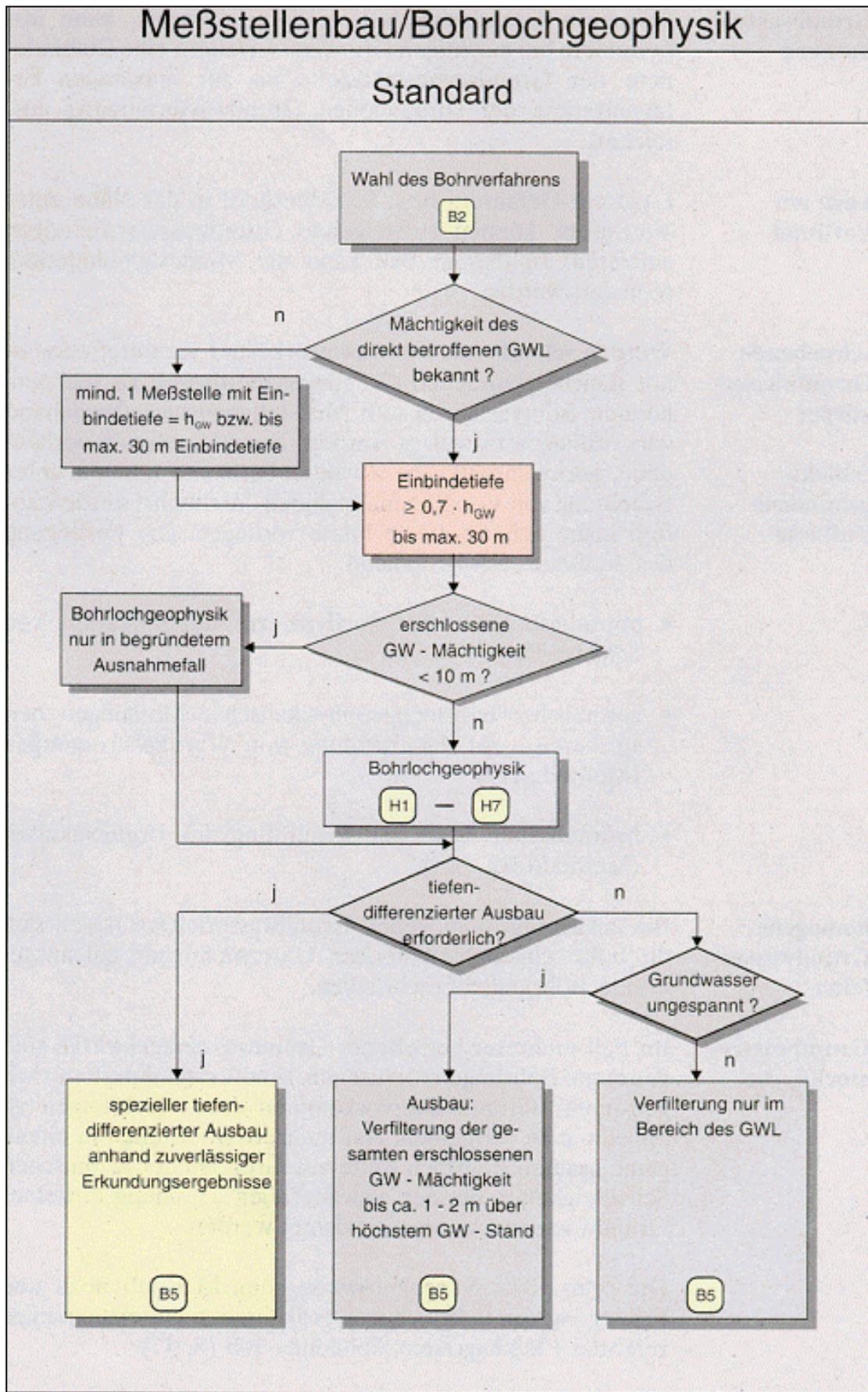
Zu einzelnen Handlungsanweisungen im Standard (Abb. 10b, S. 39) können für bestimmte einzelfallspezifische Besonderheiten nachfolgende **Alternativen** (Abb. 10a, S. 38) angewendet werden.

Liegen **Schadstoffe in Phase** vor, ist deren spezifisches Gewicht ausschlaggebend für die Mindesteinbindetiefe. Sie kann bei Schadstoffphasen spezifisch leichter als Wasser auf $0,5 \cdot h_{GW}$ reduziert werden. Bei Schadstoffphasen spezifisch schwerer als Wasser ist die Mindesteinbindetiefe der Grundwassermächtigkeit gleichzusetzen.

Meßstellenbau/Bohrlochgeophysik		
Alternative		
Einzelfallspezifische Besonderheit	Abweichungen/Alternativen zum Standard	Methodenbeschreibung
Schadstoffe in Phase	<ul style="list-style-type: none"> - Änderung der Mindesteinbindetiefe - Dichte > 1 ⇒ Einbindetiefe = h_{GW} - Dichte < 1 ⇒ Einbindetiefe = $0,5 h_{GW}$ 	
GW - Nutzung	- Anpassung der Mindesteinbindetiefe an die GW - Fassung	
Lage am Vorfluter bei aufsteigender GW - Strömung	- Reduzierung der Einbindetiefe möglich	
oberhalb Karstgrundwasserspiegel schwebender Grundwasserkörper vermutet	<ul style="list-style-type: none"> - bohrungsbegleitende Analytik - hydraulische Tests - zusätzliche bohrlochgeophysikalische Messungen 	<div style="display: flex; flex-wrap: wrap; gap: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 5px; padding: 2px;">E2</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 5px; padding: 2px;">E5</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 5px; padding: 2px;">H1</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 5px; padding: 2px;">H7</div> </div>
schichtgebundene Grundwasserzuflüsse ins Bohrloch vermutet oder kleinräumige wirksame Zwischenschichten	<ul style="list-style-type: none"> - bohrungsbegleitende Analytik - hydraulische Tests - zusätzliche bohrlochgeophysikalische Messungen - Fluid - Logging 	<div style="display: flex; flex-wrap: wrap; gap: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 5px; padding: 2px;">E2</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 5px; padding: 2px;">E5</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 5px; padding: 2px;">H1</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 5px; padding: 2px;">H7</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 5px; padding: 2px;">E7</div> </div>
Grundwasserleiter ausgeprägt homogen	- Messungen nur an ausgewählten Bohrungen	
mehrere GW - Stockwerke sind zu erschließen	- getrennte Meßstellen je Stockwerk	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 5px; padding: 2px; display: inline-block;">B5</div>

Abb. 10: Vorgehensweise bei Meßstellenbau und Festlegung von bohrlochgeophysikalischen Untersuchungen.

a: Alternative



b: Standard

Existieren Grundwasserfassungen im Abstrom, kann insbesondere bei mächtigen Grundwasserleitern eine Einbindetiefe der Grundwassermeßstelle bis zur maximalen Erfassungstiefe der vorhandenen **Grundwassernutzung** ausreichen.

Liegt ein Gefahren- bzw. Schadensherd in der Nähe eines **Vorfluters**, können aufsteigende Grundwasserströmungen auftreten. In diesem Fall kann die Mindesteinbindetiefe reduziert werden.

Werden **schwebende Grundwasserkörper** vermutet oder ist mit **schichtgebundenen Grundwasserzuflüssen** zu rechnen, können Bohrverfahren und Meßstellenausbau abweichend vom Standard festgelegt werden. Nur kleinräumig vorhandene, geringdurchlässige Zwischenhorizonte können unter Beachtung von Vorsichtsmaßnahmen durchbohrt werden, sofern keine Schadstoffe in Phase vorliegen. Die Festlegung des Ausbaues erfolgt anhand

- bohrungsbegleitender Analytik zur Identifikation von Schadstoffen
- zusätzlicher bohrlochgeophysikalischer Messungen beispielsweise zur Überprüfung von Vertikalströmungen (Methode H7)
- hydraulischer Tests zur Ermittlung der Ergiebigkeiten (Methode E2 - E5).

Bei ausgeprägt **homogenen Grundwasserleitern** lassen sich die bohrlochgeophysikalischen Untersuchungen auf ausgewählte Bohrungen beschränken.

Im Fall mehrerer betroffener **Grundwasserstockwerke** sind getrennte Bohrungen vorzusehen. Eine Verbindung natürlich getrennter Grundwasservorkommen durch Bohrungen ist unbedingt zu vermeiden. Auf mehrere Meßstellen in einem gemeinsamen Bohrloch sollte aus Gründen der technischen Schwierigkeiten bei der einwandfreien Trennung einzelner Grundwasserstockwerke verzichtet werden.

Die prinzipielle Vorgehensweise beim Meßstellenbau und Festlegung von bohrlochgeophysikalischen Untersuchungen zeigt das Flußdiagramm Abbildung 10b (S. 39).

4.6 Hydraulische Kennwerte

Zur Fortschreibung des Arbeitsmodelles und Ermittlung der Größen c , Q und E auf Beweisniveau BN 2 und Beweisniveau BN 3 sind die **hydraulischen Kennwerte** durch geeignete Tests und Versuche zu bestimmen.

Durch Versuche an mehreren Meßstellen kann eine **Bandbreite** der Werte für verschiedene Parameter (z. B. Transmissivität, Speicherkoeffizient) an einem Standort ermittelt werden.

Aufgrund ihrer Aussagekraft sind generell **Pumpversuche** (Methode E1) vorrangig vor anderen hydraulischen Tests durchzuführen.

- hydraulischer Pumpversuch:
Entnahme von Grundwasser über einen Zeitraum t_{PV} mit einer Entnahmerate Q_{PV} . Ziel des Versuches ist die Ermittlung hydraulischer Parameter.
- Pumpversuch zur Probennahme:
Entnahme von Grundwasser mit einer Entnahmerate Q_{PV} , so daß nach einem Zeitraum t_{PV} , Wasser aus der Entfernung $a/2$ die Meßstelle erreicht hat. Ziel dieses Versuches ist

Ausreichend lange Meßreihen an Quellen mit Erfassung ausgewählter hydrochemischer Parameter lassen Rückschlüsse auf die hydrogeologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet zu. Markierungsversuche eignen sich zur Ermittlung von Fließgeschwindigkeit und nutzbarem Hohlraumanteil. Zur Abschätzung können auch regionale Erfahrungswerte herangezogen werden.

In Bereichen sehr **hoher Transmissivität** können mit Pumpversuchen zur Auswertung ausreichende Absenkbeträge nur mit hohem technischen Aufwand erreicht werden. Trotzdem sind auch hier Pumpversuche als Methode zur Bestimmung hydraulischer Kennwerte heranzuziehen. Sie werden mit dem erforderlichen Aufwand allerdings nur an ausgewählten Meßstellen durchgeführt.

Ist eine **Stockwerkstrennung** nachgewiesen, muß die Bestimmung der hydraulischen Kennwerte für jedes Stockwerk getrennt erfolgen. Besteht die Möglichkeit einer hydraulischen Verbindung zwischen den Stockwerken, sind bei Pumpversuchen die Wasserstände aller durch Meßstellen erschlossenen Stockwerke mit zu beobachten. In Einzelfällen kann diese Frage auch durch einen Markierungsversuch unter Beobachtung der verschiedenen Stockwerke geklärt werden.

Sollte es notwendig sein, die **vertikale Verteilung** hydrogeologischer Kennwerte zu ermitteln, werden hydraulische Tests an einzelnen Bohrlochabschnitten durchgeführt (Abb. 11, S. 41).

Bei **homogenen Verhältnissen** können hydraulische Tests mit geringer Reichweite die als Standard definierten Pumpversuche ersetzen bzw. werden Pumpversuche nur an ausgewählten Meßstellen durchgeführt.

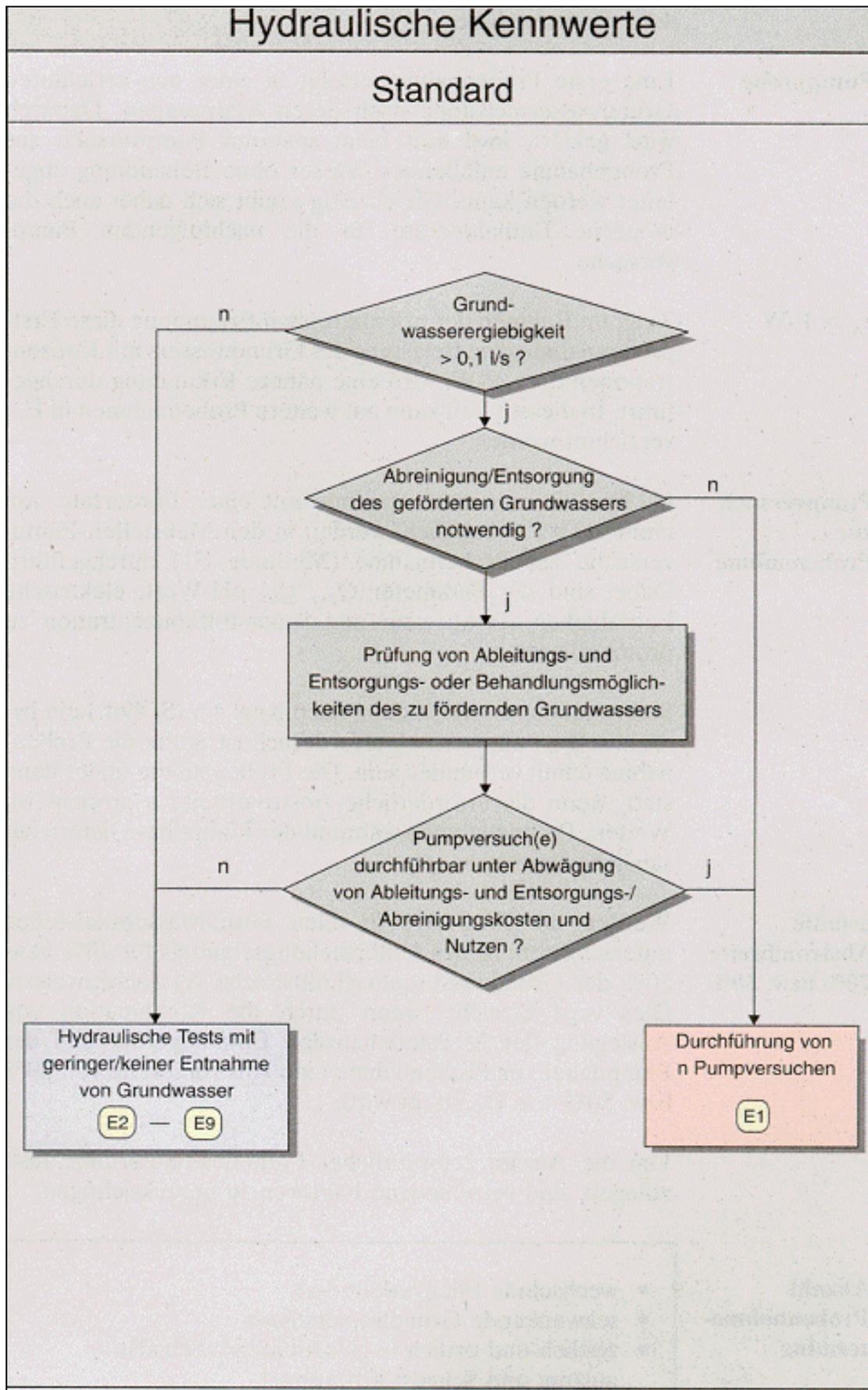
Besteht eine **sehr gute Datengrundlage** kann in Einzelfällen auf hydraulische Versuche bei der orientierenden Erkundung verzichtet werden. Dies trifft beispielsweise zu, wenn eine hydrogeologische Karte vom Standort vorliegt.

Ist bereits im Vorfeld der Versuche zu vermuten, daß die hydrogeologischen Verhältnisse am Standort eine sinnvolle Auswertung der in Frage kommenden hydraulischen Tests und Pumpversuche nicht zulassen, kann bei Kernbohrungen im Lockergestein ersatzweise eine Laborbestimmung an ungestörten Proben vorgenommen werden (Methode E11) bzw. die Kornverteilung an gestörten Proben ermittelt werden (Methode E10).

Hydraulische Kennwerte		
Alternative		
Einzelfallspezifische Besonderheiten	Abweichungen/Alternativen zum Standard	Methodenbeschreibung
Karstgrundwasserleiter: Pumpversuche sind an der Meßstelle nur eingeschränkt auswertbar	- hydraulische Tests - Meßreihen an Quellen - Markierungsversuch	E2 – E8 E9
Bereich hoher Transmissivität: Pumpversuche nur eingeschränkt geeignet	- Pumpversuche mit definierter Erfassungsbreite nur an ausgewählten Meßstellen	
hydraulische Wirksamkeit einer Stockwerkstrennung ist zu erkunden	- Pumpversuche mit Beobachtung aller Stockwerke - Markierungsversuch	E1 E9
vertikale Kennwertverteilung ist zu erkunden	- hydraulische Tests an Bohrlochabschnitten	E2 – E5
Grundwasserleiter ausgeprägt homogen	- Vorgehensweise nach Standard nur an ausgewählten Meßstellen - hydraulische Tests	E2 – E5
sehr gute Datengrundlage vorhanden (z. B. hydrogeologische Karte)	- Verzicht auf hydraulische Tests und Pumpversuche in E _{1,2}	
weder Pumpversuche noch hydraulische Tests sind auswertbar	Laborversuche: - Permeameterversuch an ungestörten Proben - Korngrößenanalyse	E11 E10

Abb. 12: Vorgehensweise zur Bestimmung hydraulischer Kennwerte

a: Alternative



b: Standard

4.7 Probennahme

Pumpprobe

Eine erste **Probennahme** erfolgt in einer neu errichteten Grundwassermeßstelle nach deren Klarpumpen. Dadurch wird geklärt, inwieweit beim späteren Pumpversuch zur Probennahme anfallendes Wasser ohne Behandlung abgeleitet werden kann. Gleichzeitig ergibt sich dabei auch die mögliche Entnahmerate für die nachfolgenden Pumpversuche.

Zeigt im Rahmen der orientierenden Erkundung diese Erstprobennahme eine Belastung des Grundwassers mit Konzentrationen $c_A > P-W$, wird eine nähere Erkundung durchgeführt. In diesem Fall kann auf weitere Probennahmen in E₁₋₂ verzichtet werden.

Ist eine Grundwasserentnahme mit einer Förderrate von mehr als 0,1 l/s möglich, werden in den Meßstellen **Pumpversuche zur Probennahme** (Methode E1) durchgeführt. Dabei sind die Parameter Q_{PV} , t_{PV} , pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Temperatur und Sauerstoffkonzentration zu protokollieren.

Sofern an diesen Meßstellen nach Kap. 4.6 (S. 40ff.) ein hydraulischer Pumpversuch erforderlich ist, sollte die Probennahme damit verbunden sein. Die Probennahme findet dann statt, wenn die erforderliche Abstrombreite a erreicht ist. Weitere Probennahmen während der Pumpphase liefern zusätzliche Informationen.

Werden die Prüfwerte in allen Grundwassermeßstellen unterschritten, ist das Untersuchungsergebnis für 20% bzw. 50% der Grundwasserquerschnittsfläche A_A nachzuweisen. Dies wird erreicht, wenn durch die Kombination von Auslegung der Meßstellenanzahl, Entnahmerate und der Pumpdauer vor Probennahme eine **Abstrombreite von 20% bzw. 50%** von B_A erfaßt wird.

Um die **Anzahl erforderlicher Probennahmeterminen** festzulegen, sind verschiedene Faktoren zu berücksichtigen.

- wechselnde Fließverhältnisse
- schwankende Grundwasserstände
- zeitlich und örtlich ungleichmäßiger Schadstoffaustrag und Schadstofftransport

Einzelfallspezifisch muß abgewogen werden, ob einer oder mehrere Probennahmeterminen erforderlich sind. Für jeden Probennahmetermin ist die Erfüllung des 20%/50%-Kriteriums nachzuweisen.

Bei **Grundwasserentnahmeraten von $< 0,1$ l/s** ist die Durchführung von Pumpversuchen zur Probennahme nicht möglich. Hier ist die Pumpdauer zur Entnahme von Proben den jeweiligen Gegebenheiten anzupassen. In Extremfällen (tiefe Meßstelle, tiefer Wasserstand) können auch Schöpfproben genommen werden.

Bei einem Pumpversuch zur Probennahme tragen alle angeregten Zuflüsse zur Förderrate bei. Dadurch ergeben sich **tiefengemittelte Proben** (Methode C1).

Die vertikale Schadstoffverteilung sollte beispielsweise dann erfaßt werden, wenn eine horizontierte Nutzung des Grundwassers im Abstrom des Gefahren- bzw. Schadensherdes durch einen flachen Gartenbrunnen vorliegt. In solchen Fällen ist eine **horizontierte Probennahme** (Methode C2) erforderlich.

Zu einzelnen Handlungsanweisungen im Standard (Abb. 13b, S. 48) können für bestimmte einzelfallspezifische Besonderheiten nachfolgende **Alternativen** (Abb. 13a, S. 47) angewendet werden.

Vorhandene Quellen und Brunnen im Abstrom eignen sich als Grundwasseraufschlüsse zur Probennahme. Meßreihen hydrochemischer Parameter in Verbindung mit Abflußmessungen (Methode D2) können Hinweise für die Emissionsermittlung geben.

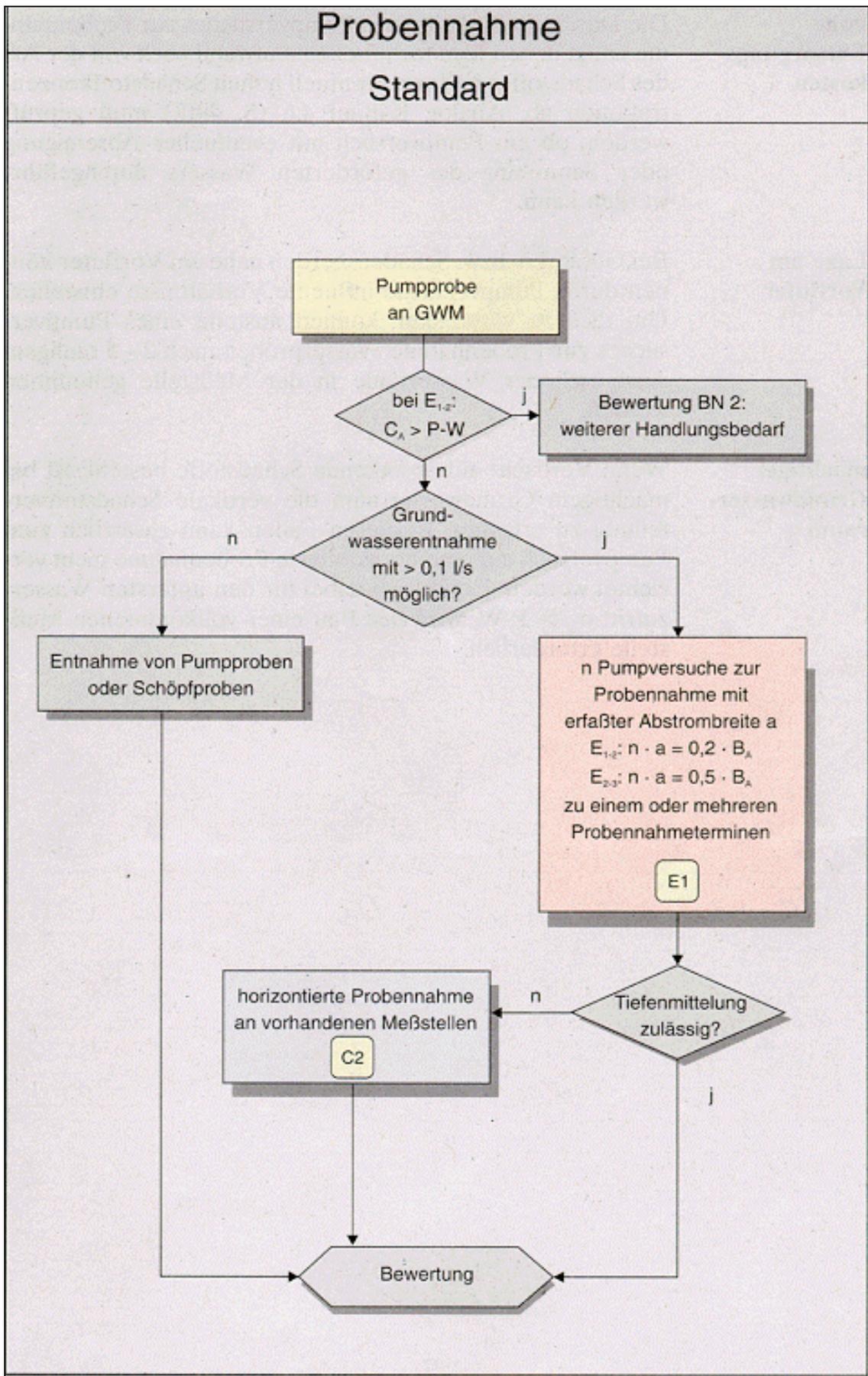
guter hydraulischer Anschluß

Bei sehr **großen Entnahmeraten** ($> 5 - 10 \text{ l/s}$), können Probleme bei der Ableitung des geförderten Wassers auftreten. Auch gelingt es in solchen Fällen zumeist nicht, mit vertretbarem Aufwand ausreichend große Abstrombreiten zu erfassen. Unter diesen Umständen kann auch auf Pumpproben (Methode C1) nach 2 - 5 maligem Austausch der Wassersäule in den Meßstellen zurückgegriffen werden. Bei einer derartigen Probennahme muß die Meßwertkonstanz der Parameter pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Temperatur und Sauerstoffkonzentration erreicht werden.

Probennahme		
Alternative		
Einzelfallspezifische Besonderheit	Abweichungen/Alternativen zum Standard	Methodenbeschreibung
Probennahmemöglichkeiten im Abstrom des Standorts vorhanden	<ul style="list-style-type: none"> - Beprobung von Brunnen (Betriebsbrunnen, Trinkwasserbrunnen) - Beprobung von Quellen - Langzeitbeobachtung an Quellen 	D2
hydraulischer Anschluß der Meßstelle sehr gut (> 5 - 10 l/s)	- Pumpprobe nach 2 - 5 maligem Austausch der Wassersäule in der Meßstelle	C1
Pumpversuche verursachen hohe Entsorgungskosten	- Pumpprobe nach 2 - 5 maligem Austausch der Wassersäule in der Meßstelle	C1
Lage am Vorfluter: durch Pumpversuch entstehen influente Verhältnisse	- Pumpprobe nach 2 - 5 maligem Austausch der Wassersäule in der Meßstelle	C1
<p>Mächtiger Grundwasserraum > 30m:</p> <p>$c_A > P - W$ bei Wasserzutritt im unteren Bereich der Meßstelle</p>	- Bau einer vollkommenen Meßstelle und horizontierte Probennahme	<p>B5</p> <p>C2</p>

Abb. 13: Vorgehensweise zur Probennahme

a: Alternative



b: Standard

Hohe Entsorgungskosten

Die Durchführbarkeit eines Pumpversuches zur Probennahme hängt neben dem technischen Aufwand auch von der Art des Schadstoffes und von eventuell hohen Schadstoffkonzentrationen ab. Analog Kapitel 4.6 (S. 40ff.) muß geprüft werden, ob ein Pumpversuch mit eventueller Abreinigung oder Sammlung des geförderten Wassers durchgeführt werden kann.

Lage am Vorfluter

Bei Gefahren- bzw. Schadensherden nahe am Vorfluter können durch Pumpversuche influente Verhältnisse entstehen. Um dies zu vermeiden, können anstelle eines Pumpversuches zur Probennahme Wasserproben nach 2 - 5 maligem Austausch der Wassersäule in der Meßstelle genommen werden.

Wenn Verdacht auf **absinkende Schadstoffe** besteht, ist bei **mächtigen Grundwasserraum** die vertikale Schadstoffverteilung zu erfassen. In diesen Fällen kann zusätzlich zum Pumpversuch auf eine horizontierte Probennahme nicht verzichtet werden. Ergibt sich dabei für den untersten Wasserzutritt $c_A > P-W$, wird der Bau einer vollkommenen Meßstelle erforderlich.

4.8 Parameterumfang

Ein auszuwählender **Parameterumfang** besteht i. d. R. aus einer Kombination sich ergänzender **Parameter**.

- **Erkundungsparameter** z. B. elektrische Leitfähigkeit, DOC, CKW/BTX-Aromaten aus Bodenluft
- **Regelungsparameter**: Parameter, für die P-W-Werte existieren

Die Auswertung bereits vorhandener Daten und Erkundungsergebnisse ergibt oft einen bekannten oder zumindest eingrenzenden Schadstoffinhalt.

Für Gewerbe- und Industriestandorte existieren in der Literatur **Parameterlisten**, anhand derer eine sinnvolle Auswahl an Untersuchungsparameter zusammengestellt werden kann. Der Branchenkatalog der Landesanstalt für Umweltschutz gibt Hinweise zu den eingesetzten Stoffen im Produktions- und Verfahrensablauf¹⁵.

Für die Erkundung von Altablagerungen ist auf Basis der historischen Erkundung (unbekannte Abfallzusammensetzung) häufig noch keine Eingrenzung des Parameterumfangs möglich. Durch die **Parameterstufen 1 + 2** des ALHB (Abb. 14a, S. 51) werden Erkundungs- und Regelungsparameter abgedeckt, die einen Überblick über die wichtigsten altlastentypischen Substanzen erlauben. Darauf aufbauend ist die Festlegung der einzelfallspezifisch relevanten Parameter möglich. In Einzelfällen können hier auch Parameter der Stufe 3 nach ALHB hinzukommen.

Für umfangreiche Untersuchungsreihen lohnt der Versuch, statistische Leitparameter (z. B. durch Zeitreihen- und Korrelationsanalysen) abzuleiten. Inwieweit daraus Reduzierungen des Parameterumfangs resultieren können, muß standort- und schadstoffspezifisch festgelegt werden.

¹⁵ LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG: Branchenkatalog zur historischen Erhebung von Altstandorten. - Materialien zur Altlastenbearbeitung, Band 3, 2. erw. Aufl., 103 S., 2 Disketten. Karlsruhe 1993.

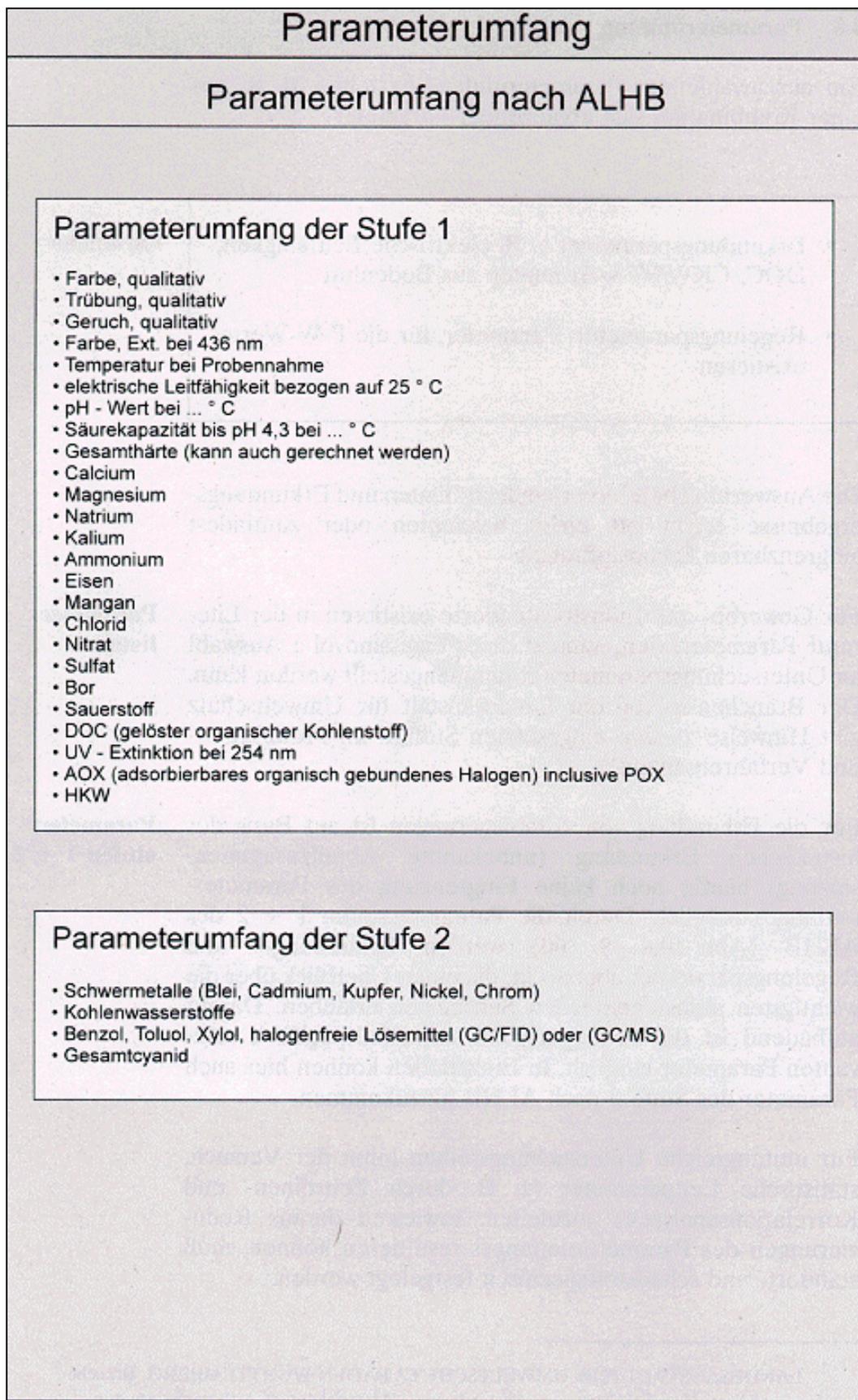
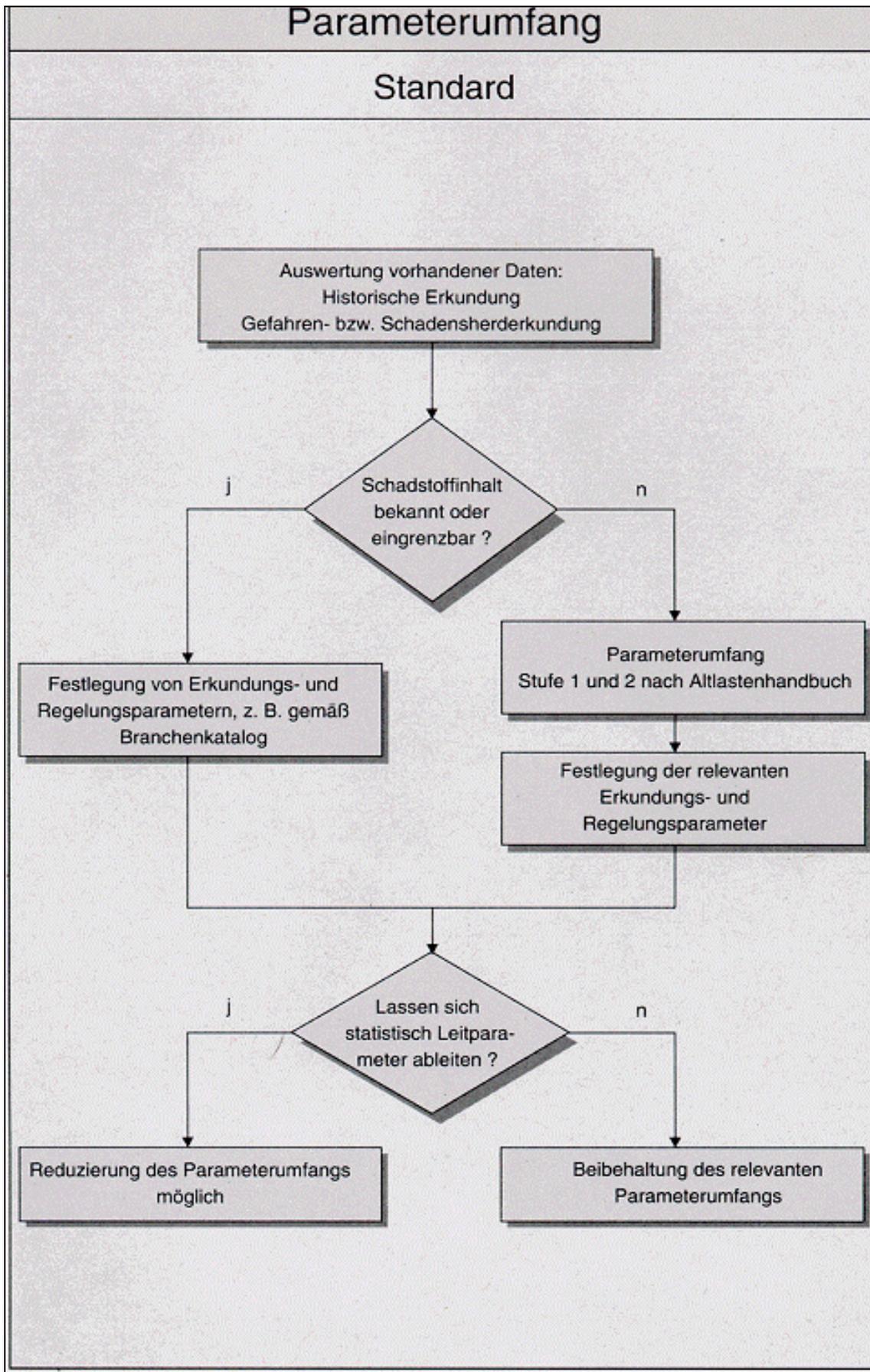


Abb. 14: Vorgehensweise zur Festlegung des Parameterumfangs

a: Parameterumfang nach ALHB



b: Standard

5 Indirekte Emissionsermittlung

5.1 Emissionsermittlung über Grundwassererkundung

Aus der im Grundwasser ermittelten Schadstoffkonzentration c_A und c_Z sowie den Volumenströmen Q_A und Q_{ZT} kann die Emission aus dem Gefahren- bzw. Schadensherd durch Rückrechnung indirekt ermittelt werden.

$E(A)$ = Emission von Schadstoffen aus dem Gefahren- bzw. Schadensherd in das Grundwasser berechnet aus

$$E(A) = Q_A * c_A - Q_{ZT} * c_Z$$

Zur Ermittlung von Q_A werden durch die Grundwassererkundung bestimmt:

- Grundwasserquerschnittsfläche A_A
- Durchlässigkeitsbeiwert k_f
- Grundwassergefälle I

Q_A errechnet sich nach DARCY: $Q_A = k_f * I * A_A$

Q_{ZT} wird ermittelt aus (Abb. 3, S. 10):

$$Q_{ZT} = Q_A - Q_{SH} \text{ bzw. } Q_{ZT} = Q_Z$$

Liegt keine einheitliche Belastung über die Fläche A_A vor, so kann eine vertikale und/oder horizontale Aufteilung in unterschiedliche Teilströme bzw. Teilflächen von A_A durchgeführt werden. Die Emissionsermittlung erfolgt dann durch Addition der einzelnen Emissionen $E(A)$ je Teilstrom bzw. Teilfläche.

Die aus dem Grundwasser zurückgerechnete Emission $E(A)$ ist aufgrund von Retardation, Schadstoffabbau, Metabolisierung etc. **nahezu immer kleiner** als die Emission $E(SH)$.

Chemische Meßwerte und insbesondere hydraulische Parameter können räumlich und zeitlich stark variieren. Da auf dem Niveau der **orientierenden Erkundung** diese Variationsbreiten nur anhand weniger Einzelwerte abgeschätzt werden können, läßt sich die tatsächliche Emission am Standort nur näherungsweise ermitteln

Im Rahmen einer Emissionsermittlung sind mindestens 3 Szenarien anhand plausibler Variationsbreiten für o.g. Eingangsparameter

3 Szenarien

- minimale Emission
- mittlere Emission
- maximale Emission

durchzurechnen (s. Abb. 6b, 23). Die Schwankungsbreite der in die Berechnung einfließenden Meßgrößen ist anzugeben. Vorliegende regionale geologische und hydraulische Parameter können hierzu übernommen werden.

Durch die Verdichtung der Datengrundlage in der **näheren Erkundung**, liegen für eine Berechnung der Emission weitgehend abgesicherte Werte vor.

Die Emissionsermittlung baut also nicht wie in der vorausgegangenen Erkundungsstufe auf Einzelwerte auf, sondern basiert auf mehreren Werten aller Meßgrößen.

Sofern es möglich ist, soll anhand einer Aufteilung in unterschiedliche Teilströme versucht werden, eine Emissionsberechnung durchzuführen.

Über eine Min-Max-Betrachtung hinaus sollten **plausible Szenarien** dargestellt werden.

5.2 Rückrechnung auf Schadstoffkonzentration im Gefahren- bzw. Schadensherd

Ist eine direkte Emissionserkundung nicht möglich, so muß zur Bewertung des Gefahren- bzw. Schadensherdes versucht werden, aus den Untersuchungsergebnissen des **Grundwasserabstromes** auf die Schadstoffkonzentration c_{SH} zu schließen. Die Kenntnis von c_{SH} besitzt für die Bewertung erste Priorität.

Nach der Ermittlung von $E(A)$ kann über die Annahme eines **plausiblen Sickerwasser- bzw. Kontaktgrundwasservolumenstromes** Q_{SH} die gesuchte Konzentration c_{SH} ermittelt werden:

$$c_{SH} = E(A) / Q_{SH}$$

Im einfachsten Fall ergibt sich der Sickerwasservolumenstrom ($Q_{SH} = Q_{SiWa}$) aus der Grundwasserneubildung über die Fläche des Gefahren- bzw. Schadensherdes. Eine Teilversiegelung dieser Fläche oder eine bestehende Sickerwasserfassung reduzieren Q_{SiWa} entsprechend. Durch Schichtwasserzutritte in den Gefahren- bzw. Schadensherd ergibt sich dagegen eine Erhöhung von Q_{SiWa} .

Die zur Ermittlung des Kontaktgrundwasservolumenstromes ($Q_{SH} = Q_{KGW}$) erforderlichen hydraulischen Kennwerte werden gemäß Kapitel 4.6 (S. 40ff.) bestimmt.

Auf dem Weg vom Gefahren- bzw. Schadensherd zum Grundwasser werden unter Umständen nur schwer quantifizierbare Mengen des Schadstoffes zurückgehalten. Deshalb ist das Verhältnis von $E(A)$ zu $E(SH)$ nicht immer zuverlässig abzuschätzen. Beispielsweise kann es durch hohe **Schadstoffretardation** in der ungesättigten Zone vorkommen, daß zum Zeitpunkt der Erkundung $E(A)$ deutlich unter $E(SH)$ liegt und dieser Zustand noch nicht stationär ist.

Eine Rückrechnung ist jedoch nur dann möglich, wenn **stationäre Verhältnisse** vorliegen bzw. wenn die Auswirkungen der instationären Verhältnisse quantitativ berücksichtigt werden können. Im Falle einer retardierten Schadstoffausbreitung ist eine Rückrechnung daher in der Regel nicht möglich.

5.3 Plausibilitätskontrolle

Wurden aus einer direkten Emissionserkundung und einer Grundwassererkundung die Emissionen $E(\text{SH})$ und $E(\text{A})$ ermittelt, muß zur Erhöhung der Entscheidungssicherheit bei der Bewertung eine Plausibilitätskontrolle durchgeführt werden. Das Ergebnis ist die Ableitung einer den Standort kennzeichnenden Emission E .

maßgebliche Emission E

Gemäß Kapitel 5.1 (S. 53f.) ist zu erwarten, daß die Werte für $E(\text{A})$ für die einzelnen Schadstoffe kleiner oder gleich groß wie $E(\text{SH})$ sind.

Wenn $E(\text{A})$ **wesentlich kleiner als $E(\text{SH})$** ist, muß geprüft werden, ob dieser Effekt in der Variabilität der Eingangsgrößen zur Ermittlung von $E(\text{A})$ begründet ist und/oder ob das Schadstoffrückhaltevermögen der ungesättigten Zone und des Grundwasserraumes diese Diskrepanz plausibel erklären lassen.

Ist $E(\text{A})$ **größer als $E(\text{SH})$** , so können die Gründe hierfür beispielsweise in weiteren Emitenten im Grundwasserzustrom zu suchen sein. Trifft dies jedoch nicht zu, kann auf Beweisebene BN 2 $E(\text{A})$ für den Standort als die maßgebliche Emission betrachtet werden.

Eine Gegenüberstellung der durch **Min-Max-Betrachtung** ermittelten Emissionen kann festgestellte Diskrepanzen verstärken oder abschwächen. Im Rahmen der orientierenden Erkundung sind Unterschiede zwischen $E(\text{A})$ und $E(\text{SH})$ zu tolerieren. Auf Beweisebene BN 3 sollten Unterschiede plausibel erklärt werden können. Gegebenenfalls sind Nachuntersuchungen erforderlich.

Anstelle von Nachuntersuchungen kann aufgrund wirtschaftlicher Abwägungen auch unter der Annahme ungünstiger Verhältnisse (Kap. 3.3, S. 15ff.) bewertet werden.

Teil II: Fallbeispiele

Allgemeines

Anhand von **Fallbeispielen** soll dem Leser für die Planung und Durchführung einer Grundwassererkundung die praktische Anwendung des Leitfadens „Erkundungsstrategie Grundwasser“ verdeutlicht werden. Dargestellt wird die Umsetzung der Standardvorgehensweise sowie die Anwendung alternativer Erkundungsmöglichkeiten.

Die Auswahl der Fälle orientierte sich an den regionalgeologischen Verhältnissen Baden-Württembergs.

Fallbeispiel	Grundwasserleiter-Typ	Geologie
Fallbeispiel 1	Porengrundwasserleiter, homogen	quartäre Kiese und Sande des Oberrheingrabens
Fallbeispiel 2	Karst-/Kluftgrundwasserleiter	verkarstete Kalksteine des Oberen Muschelkalkes
Fallbeispiel 3	Porengrundwasserleiter, heterogen	quartäre, rißzeitliche Vorstoßschotter
Fallbeispiel 4	schichtig gegliederter Grundwasserleiter	Ton-/Mergelsteine des Gipskeupers
Fallbeispiel 5	Kluftgrundwasserleiter	Sandsteine des Mittleren Buntsandsteins
Fallbeispiel 6	Poren-/Kluftgrundwasserleiter	quartäre Kiese und Sande über Kalksteinen des Oberen Muschelkalkes

Soweit zum Verständnis nicht erforderlich, wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit auf die ausführliche Darstellung technischer Erkundungsmaßnahmen und den resultierenden Ergebnissen verzichtet. Hieraus ergibt sich ein in den Fallbeispielen vereinfacht wiedergegebener Erkundungs- und Bewertungsablauf.

Der Fall einer Vorbelastung des Zustromes ist in den gewählten Fallbeispielen nicht gegeben.

Allen Fällen ging eine Gefahren- bzw. Schadensherderkundung voraus. Mit den folgenden Daten bildet sie die Basis für eine Grundwassererkundung:

Parameter Gefahrenherd- bzw. Schadenserkundung

- Breite der Grundwasserquerschnittsfläche A_A (B_A)
- Grundfläche des Gefahren-/Schadensherdes, die der Sickerwasservolumenstrom durchsickert (A_{SiWa})
- Kontaktgrundwassermächtigkeit (h_{KGW})
- Grundwasserquerschnittsfläche, die der Kontaktgrundwasservolumenstrom durchfließt (A_{KGW})
- Sickerwasservolumenstrom, der dem Grundwasser nach Durchsickerung von kontaminiertem Material des Gefahren- bzw. Schadensherdes zuströmt (Q_{SiWa})
- Kontaktgrundwasserstrom (Q_{KGW})
- Schadstoffkonzentration c_{SiWa} bzw. c_{KGW}
- Emission von Schadstoffen aus dem Gefahren-/Schadensherd in das Grundwasser ($E(SH)$)
- Parameterumfang

Zur einfacheren Handhabung wurde der inhaltliche Aufbau der Fallbeispiele analog zur Gliederung in den Kapiteln 4 und 5 des Leitfadens gewählt.

Um die einzelnen Entscheidungen zur Vorgehensweise besser nachvollziehen zu können, wurden die zugehörigen Ablaufdiagramme dem jeweiligen Erkundungsschritt vorangestellt.

Die durchgeführten Erkundungsmaßnahmen und Bewertungen wurden getrennt für die orientierende Erkundung E_{1-2} und nähere Erkundung E_{2-3} dargestellt. Für den Fall, daß sich keine Unterschiede in der Vorgehensweise auf den jeweiligen Erkundungsstufen ergaben, wurde das zugehörige Ablaufdiagramm nur einmal abgebildet.

Sämtliche geometrischen, hydraulischen und analytischen Parameter, die zur Berechnung der Fallbeispiele verwendet wurden, sind zur besseren Übersicht in einer Tabelle am Ende des jeweiligen Fallbeispiels zusammengestellt.

Aufbau der Fallbeispiele:

1. Standortbeschreibung
2. Hydrogeologisches Arbeitsmodell
3. Anzahl GWM
4. Positionierung GWM
5. Meßstellenbau/Bohrlochgeophysik
6. Hydraulische Kennwerte
7. Probennahme
8. Parameterumfang
9. Emissionsermittlung über Grundwassererkundung und Plausibilitätskontrolle
10. Bewertung
11. Tabelle „Hydrogeologische Parameter“

Fallbeispiel 1: Porengrundwasserleiter, homogen

Quartäre Kiese und Sande des Oberrheingrabens

1. Standortbeschreibung

Im Fallbeispiel wird eine ehemalige Hausmülldeponie einer Stadt mit ca. 50.000 EW erkundet.

Aus der vorausgegangenen historischen Erkundung E_{0-1} und einer direkten Emissionserkundung E_{1-2} sind folgende Eckdaten bekannt:

Ablagerungsgut:

Überwiegend Hausmüll und hausmüllähnliche Stoffe, untergeordnet Industrie- (öhlhaltige Schlämme) und Gewerbemüll, Bauschutt, Erdaushub.

Ablagerungsart:

Verfüllung einer ca. 15 m tiefen ehemaligen Kiesgrube (Naßbaggerung) durch Abkippen des Abfalls direkt in das Grundwasser.

Fläche: 50.000 m²

Volumen: 430.000 m³

Betriebszeitraum: 1965 - 1976

Ehemalige Nutzung: Kiesgrube

Geologie:

Unter quartären, bindigen Deckschichten folgen mit einer Gesamtmächtigkeit von 70 - 75 m die Kiese und Sande des Oberen - und Mittleren Kieslagers (OKL + MKL) des Oberrheingrabens. Der die Einheit lithologisch trennende Obere Zwischenhorizont (OZH) ist lokal nur lückenhaft bis nicht vorhanden. Eine hydraulische Trennung von OKL und MKL ist deshalb nicht gegeben.

Nutzungswürdigkeit des Grundwassers:

Das Grundwasser wird im weiteren Abstrom als Trinkwasser genutzt. Die Altablagerung liegt nicht im Trinkwasserschutzgebiet.

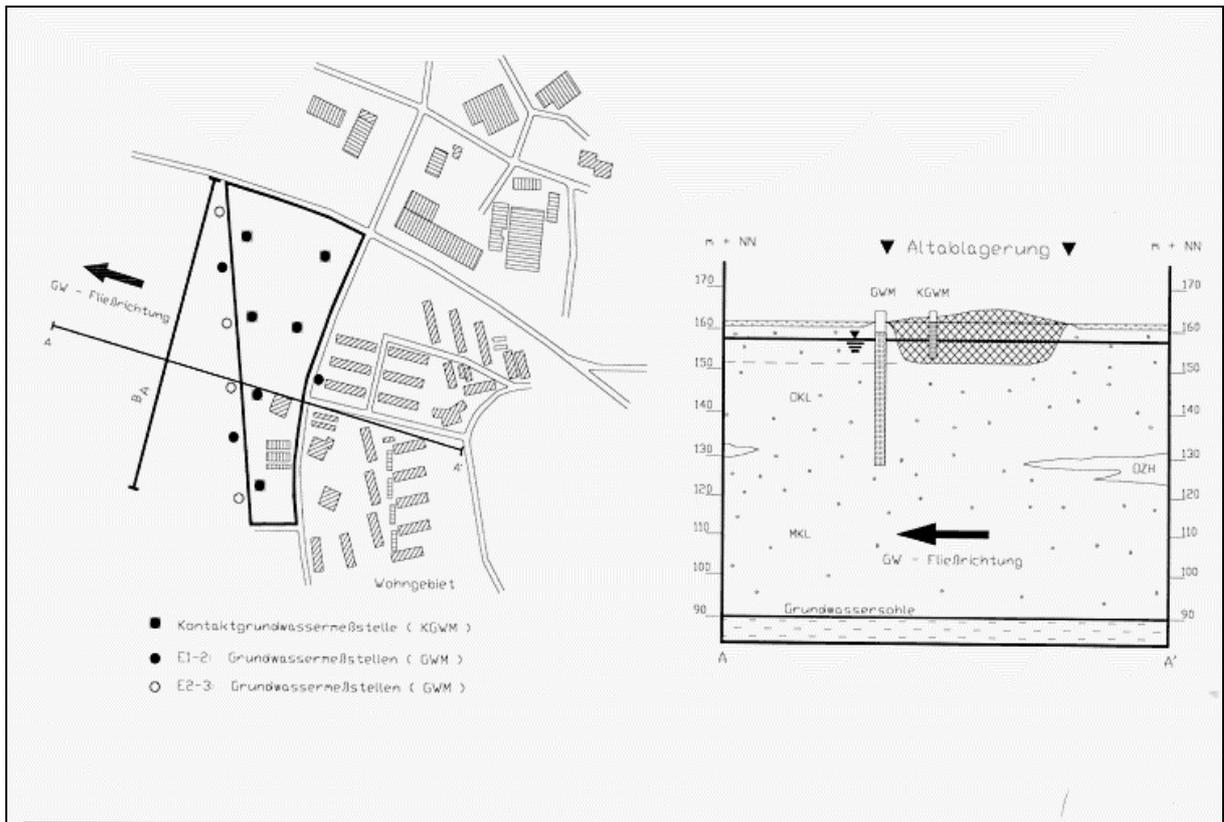
Gefahren-/Schadensherderkundung:

Multitemporale Luftbilddauswertung, Geoelektrik, Gaspfad, Kontaktgrundwasser

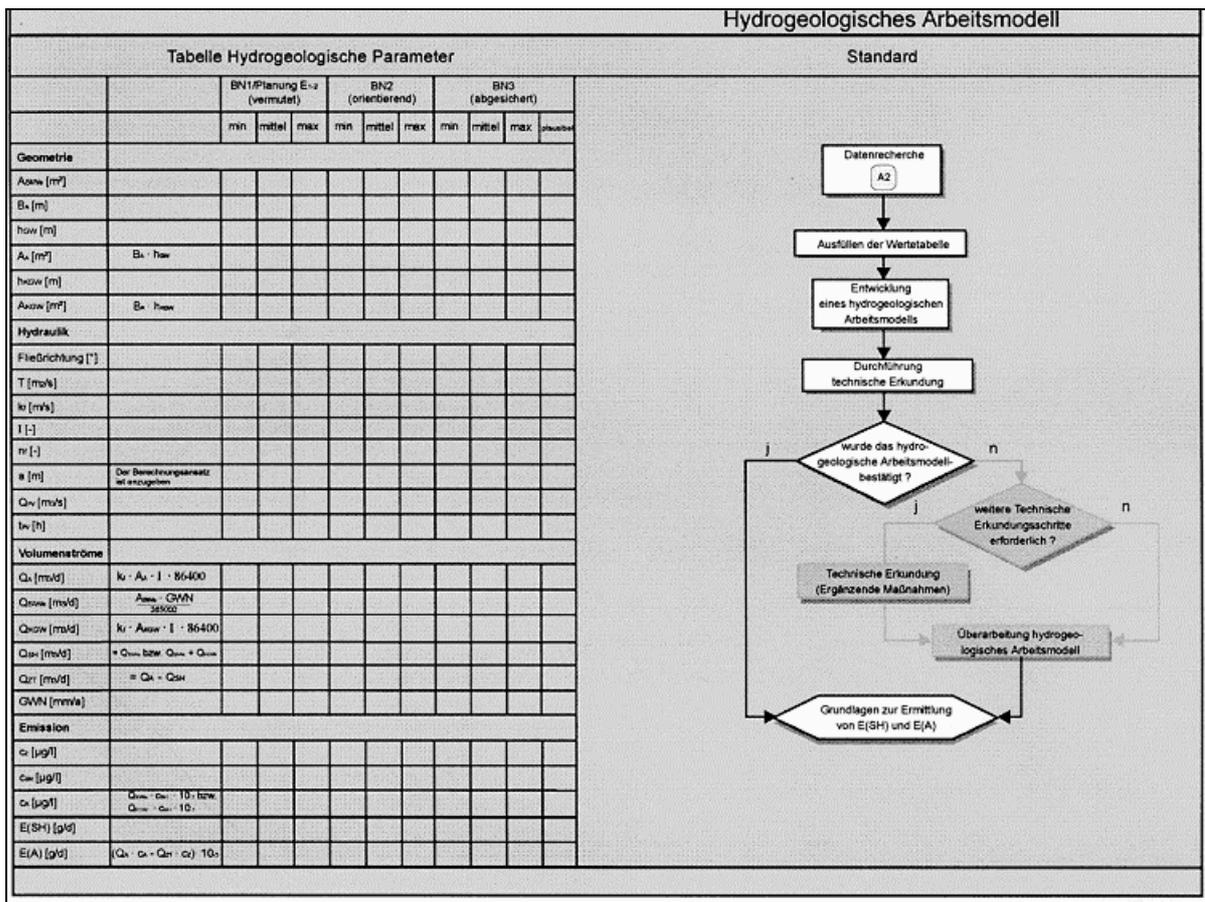
Schadstoffe:

Flächige Belastung ohne Belastungsschwerpunkte durch KW (H18): Kohlenwasserstoffe, Mineralöl.

- Kontaktgrundwasser max. $c_{SH} = 1.138 \mu\text{g/l}$
- Grundwasser max. $c_A = 625 \mu\text{g/l}$



2. Hydrogeologisches Arbeitsmodell



Diagramm

Orientierende Erkundung

Zur Erarbeitung eines hydrogeologischen Arbeitsmodellles wurden die geologische Karte GK 25 und die hydrogeologische Kartierung HGK ausgewertet. Durch letztere sind die hydrogeologischen Verhältnisse sehr gut bekannt.

Hydrogeologisches Arbeitsmodell:

Die Kiese und Sande des Oberen - und Mittleren Kieslagers stellen einen 70 m mächtigen, homogenen Grundwasserraum dar. Der Obere Zwischenhorizont wirkt im vorliegenden Falle nicht als hydraulisch trennende Schicht für die beiden Kieslager. Der Flurabstand beträgt 3 - 4 m.

Der Austrag von Schadstoffen erfolgt im wesentlichen über einen 10 m mächtigen Kontaktgrundwasserstrom. Hieraus ergibt sich eine vermutete vertikale Aufteilung des betroffenen Grundwasserraumes in zwei voraussichtlich unterschiedlich beeinträchtigte Grundwasserteilströme:

- Teilstrom I (Q_{KGW}): 3 - 13 m u. GOK
- Teilstrom II (Q_{ZT}): 13 - 73 m u. GOK

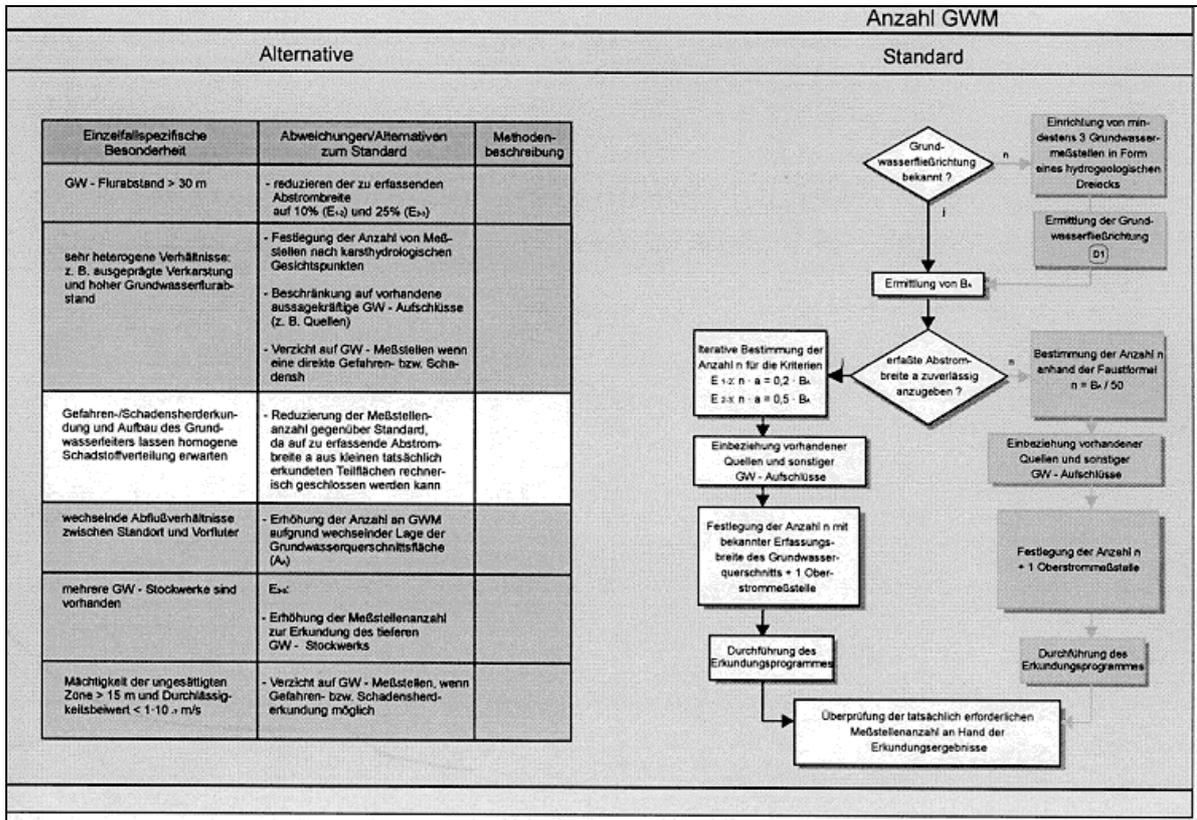
Der homogene Aufbau des Grundwasserleiters und die Erfahrung aus der Bearbeitung vergleichbarer Fälle zeigen, daß eine Übertragung punktueller hydraulischer und chemischer Werte auf einen großen Gültigkeitsbereich zulässig ist (Regionalisierung).

Nähere Erkundung

Die Ergebnisse der orientierenden Erkundung bestätigten das bestehende Arbeitsmodell.

Die Tabelle "11. Hydrogeologische Parameter" (am Ende des Fallbeispiels) wurde um die Werte für c_Z , c_{SH} , c_A , $E(SH)$ und $E(A)$ erweitert.

3. Anzahl GWM



Diagramm

Orientierende Erkundung

Die Grundwasserfließrichtung ist aus der hydrogeologischen Kartierung bekannt. Die Größe B_A ergibt sich aus den Ergebnissen der direkten Emissionserkundung und geometrischen Überlegungen zu $B_A = 300 \text{ m}$ (= Gesamtbreite der Deponie senkrecht zur Grundwasserfließrichtung). Die für E_{1-2} geforderte Erfassungsbreite von $0,2 B_A$ beträgt somit 60 m .

Mit einer hydrogeologisch sinnvollen Pumprate $Q_{PV} = 0,01 \text{ m}^3/\text{s}$, einer Erfassungsbreite der Einzelmeßstelle von $a = 15 \text{ m}$ ($a \leq 20 \text{ m}$) und einer Einbindetiefe von 30 m (vgl. Kap. 5 + 9), ergibt sich anhand der Zylinderformel eine Pumpdauer je Meßstelle von

$$t_{PV} = \frac{225 \text{ m}^3 \cdot 0,2 \cdot 30 \text{ m} \cdot \pi}{14400 \cdot 0,01 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}} \approx 29 \text{ h}$$

Für die 20 %-ige Erfassung wären damit vier Grundwassermeßstellen erforderlich plus eine Meßstelle im Zustrom zur Ermittlung der Hintergrundbelastung:

$$n = \frac{0,2 B_A}{a} = \frac{60 \text{ m}}{15 \text{ m}} = 4$$

Unter Berücksichtigung des Aspektes "Regionalisierung" wird die notwendige Meßstellenanzahl zur Kostenminimierung zunächst um 50 % (empirischer Ansatz) von vier auf zwei reduziert (vgl. 2. Hydrogeologisches Arbeitsmodell).

Nähere Erkundung

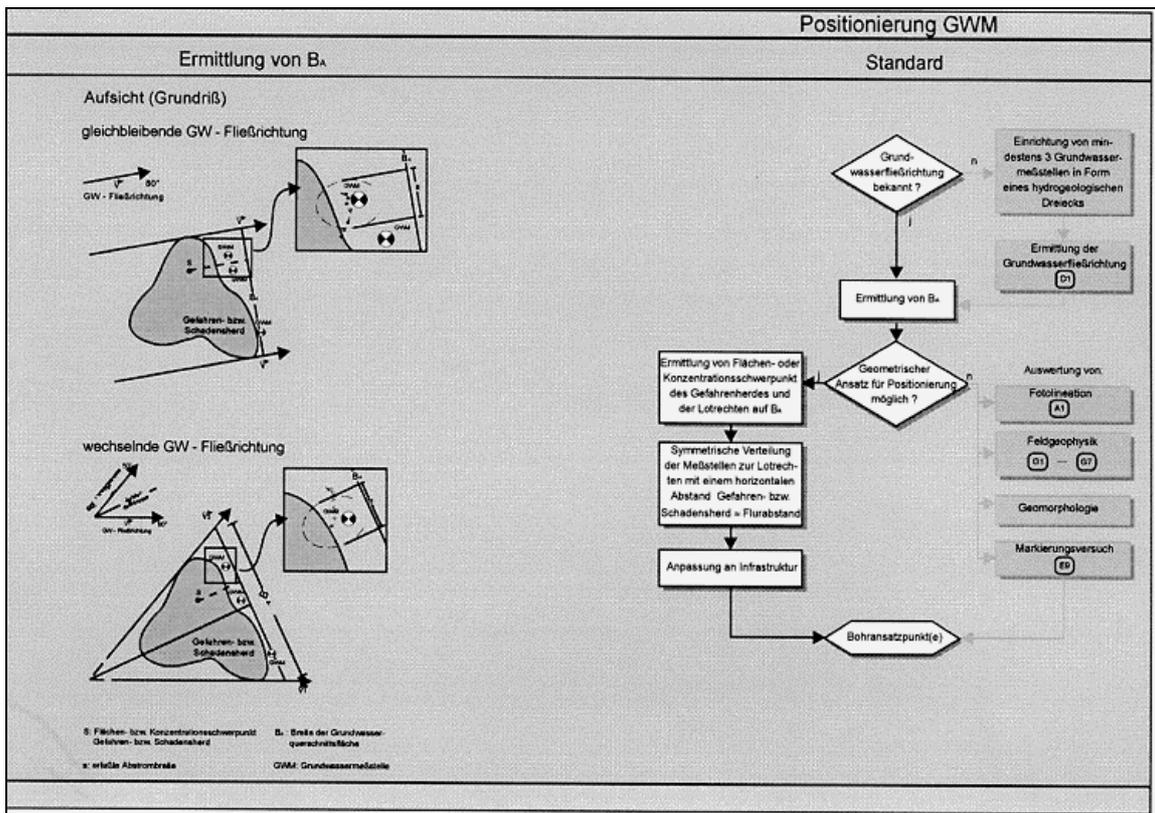
Durch die Auslegung der Meßstellenanzahl auf eine mögliche Erfassung des Abstromes mit $0,5 B_A$ werden, unabhängig von der möglichen Regionalisierbarkeit von Meßwerten, zusätzliche GWM erforderlich. Die gesamte Erfassungsbreite beträgt damit 150 m . Bei gleichem Ansatz wie in der orientierenden Erkundung mit $a = 15 \text{ m}$ bedeutet dies, daß zur Erfassung insgesamt zehn GWM erforderlich wären:

$$n = \frac{0,5 B_A}{a} = \frac{150 \text{ m}}{15 \text{ m}} = 10$$

Da bereits zwei GWM aus der vorausgegangenen Erkundungsstufe vorhanden waren, wären nur noch acht GWM neu zu erstellen.

Durch die Möglichkeit der Regionalisierung und damit einer erheblichen Kostenersparnis erfolgt auch hier eine Reduzierung auf 50 %. Um die durch die Reduzierung in der orientierenden Erkundung entstandene Unsicherheit nicht zu vergrößern, bezieht sich die Reduzierung in der näheren Erkundung auf die zusätzlich benötigten acht GWM und nicht auf die Gesamtzahl von zehn. In der näheren Erkundung werden deshalb vier neue GWM eingerichtet.

4. Positionierung GWM



Diagramm

Orientierende Erkundung

Durch die Gefahren- bzw. Schadensherderkundung konnten keine Belastungsschwerpunkte lokalisiert werden. Aus diesem Grund wurde für die Positionierung der geplanten Grundwassermessstellen ein rein geometrischer Ansatz gewählt. Die Einrichtung erfolgte symmetrisch über die Abstrombreite B_A im unmittelbaren Abstrom.

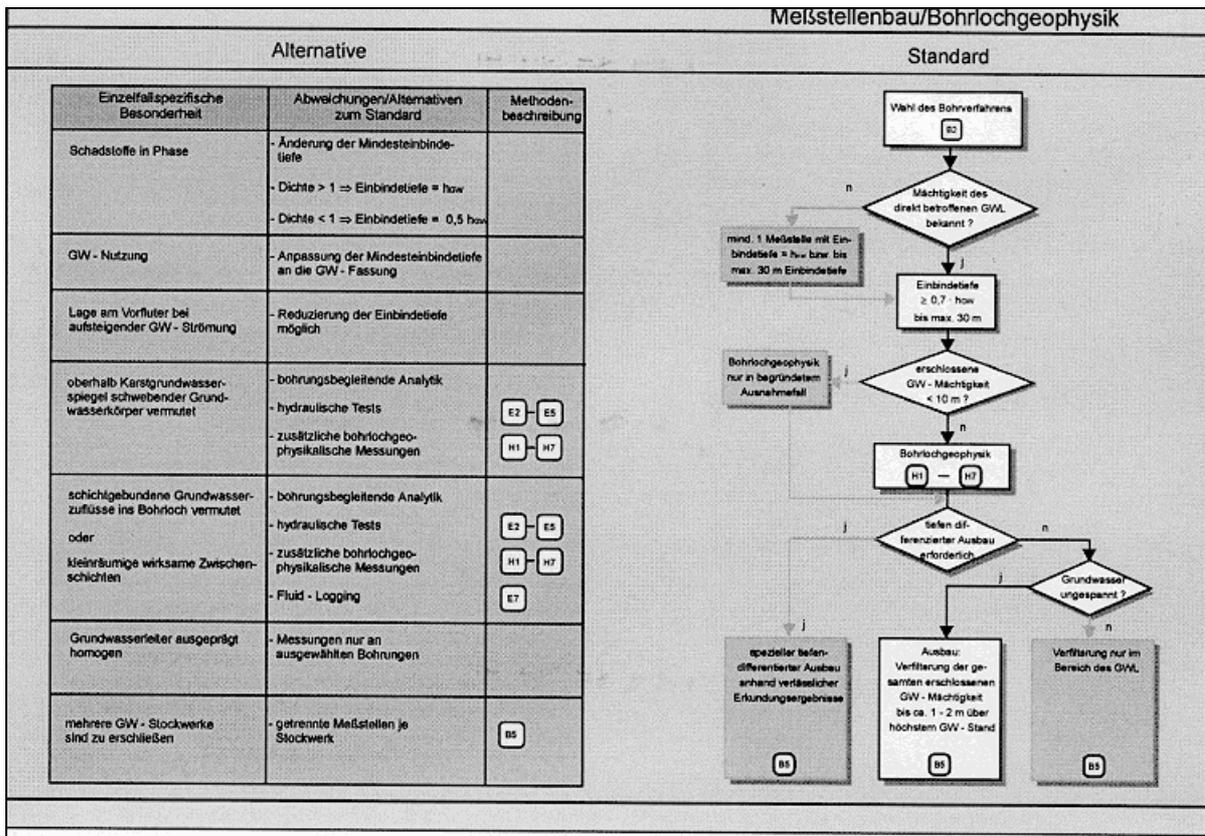
Da eine anthropogene Vorbelastung des Grundwassers nicht auszuschließen war, wurde zusätzlich eine GWM im zentralen Zustrom eingerichtet. Gleichzeitig ergibt sich hierdurch die Möglichkeit, anhand eines hydrogeologischen Dreiecks die genaue Grundwasserfließrichtung zu bestimmen.

Nähere Erkundung

Vor der Positionierung der neuen Meßstellen wurden an den vorhandenen Meßstellen zwei Stichtagsmessungen zur Überprüfung der aus der HGK bekannten Grundwasserfließrichtung durchgeführt.

Aufgrund des nachweislich homogenen Aufbaus (Bohrprofile, Bohrlochgeophysik) des Grundwasserleiters und einer durch die vorausgegangene Grundwassererkundung festgestellten Emission des Schadstoffes über die gesamte Breite der Altablagerung, erfolgt die Positionierung anhand eines rein geometrischen Ansatzes.

5. Meßstellenbau/Bohrlochgeophysik



Diagramm

Orientierende Erkundung

Das Grundwasservorkommen ist durch die aus der hydrogeologischen Kartierung (HGK) bekannte Mächtigkeit von 70 m als sehr mächtig einzustufen. Die Einbindetiefe der Meßstellen wurde unter Berücksichtigung der Empfehlungen zur Tiefen-mittelung gemäß VwV auf 30 m begrenzt.

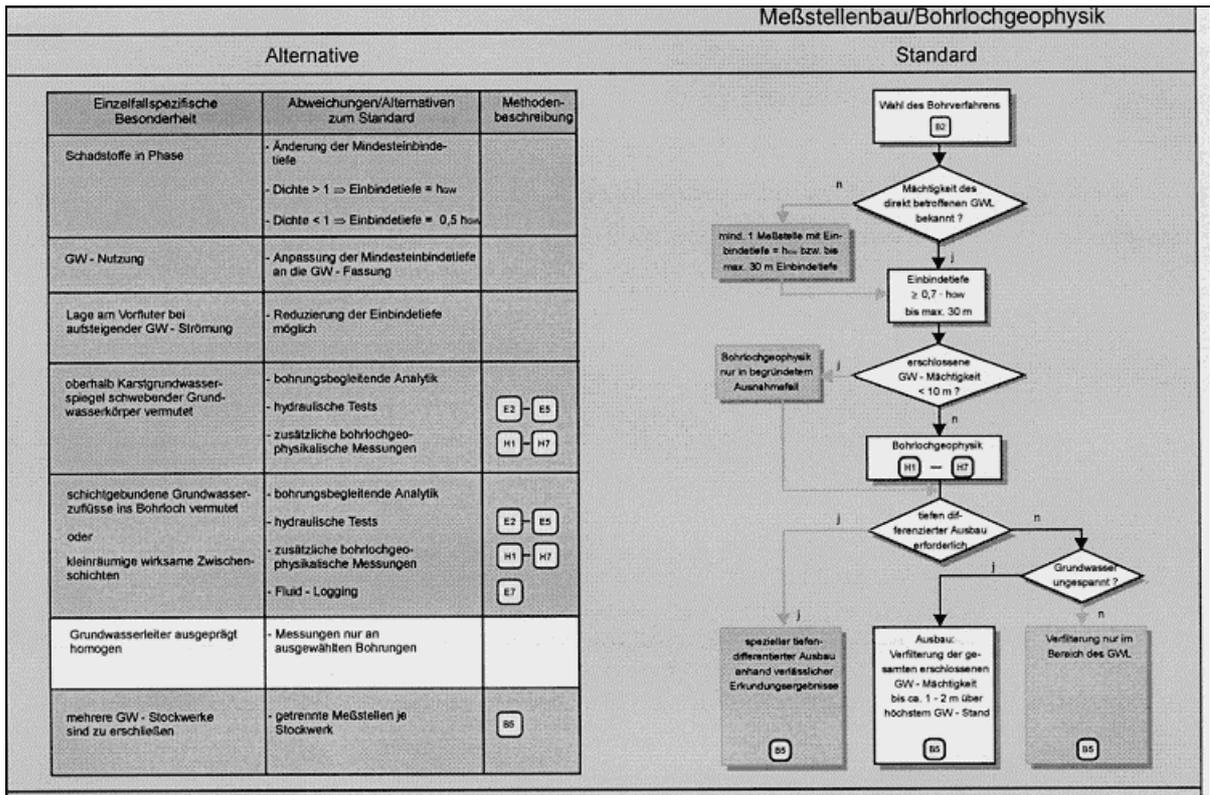
Zudem ist durch die in der direkten Emissionserkundung erkannte Schadstoffgruppe KW (H18) und deren Konzentrationen im KGW, nicht von einer Beeinträchtigung über die gesamte Mächtigkeit des Grundwasserleiters auszugehen.

Die Bohrungen wurden als Rammkernbohrungen niedergebracht und mit einer 5"-PVC-Verrohrung ausgebaut.

Aufgrund der ungespannten Grundwasserverhältnisse und dem Ziel einer Gewinnung tiefengemittelter Grundwasserproben, wurden die Bohrungen bis 1 m über den höchsten Grundwasserstand durchgängig verfiltrert.

Zur Kontrolle einer möglichen Vertikalgliederung des Grundwasserleiters wurden nach Fertigstellung jeder Bohrung bohrlochgeophysikalische Messungen durchgeführt.

Durch die Homogenität des Grundwasserleiters ist kein tiefendifferenzierter Ausbau notwendig.



Diagramm

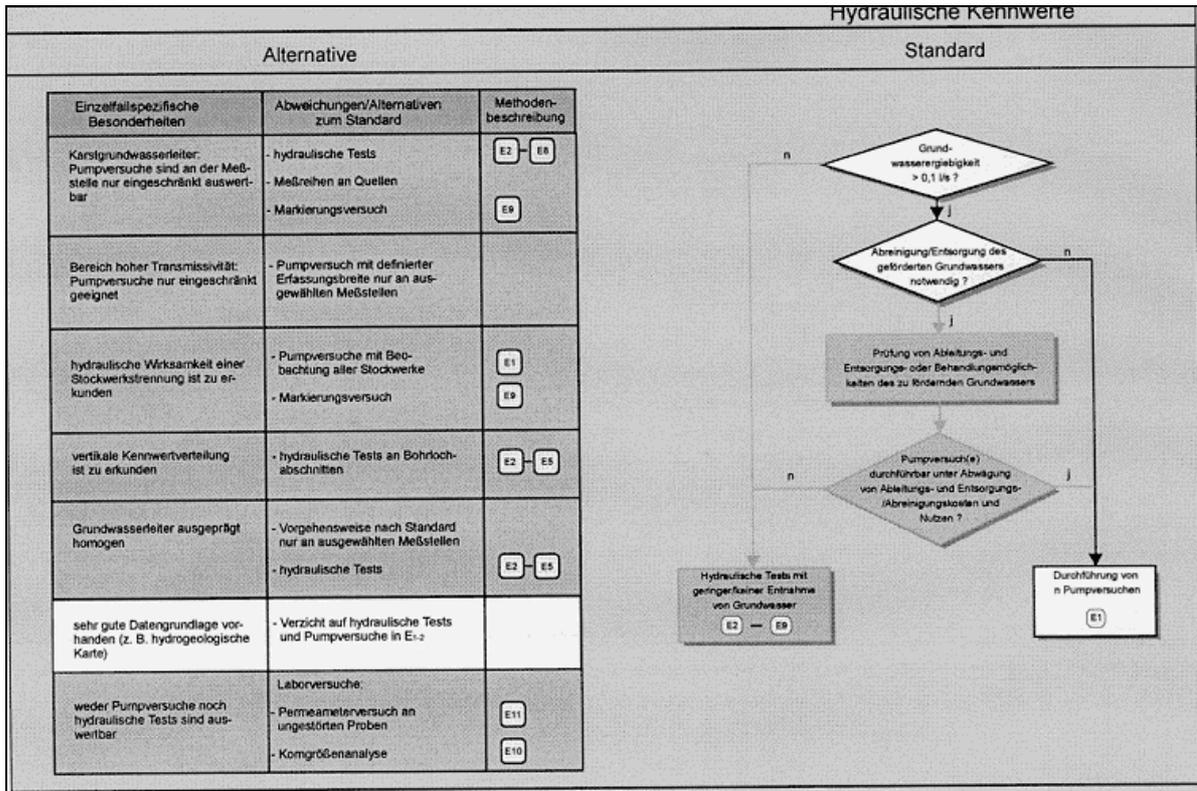
Nähere Erkundung

Vor dem Bau der vier neuen Meßstellen wurde anhand einer horizontalen Probennahme an den vorhandenen zwei Meßstellen der Nachweis erbracht, daß mit der gewählten Einbindetiefe von 30 m der kontaminierte Grundwasserteilstrom nahezu voll-ständig erfasst wird (vgl. 7. Probennahme).

Der Meßstellenbau erfolgte analog zur orientierenden Erkundung mit 30 m Einbindetiefe.

Auf weitere geophysikalische Bohrlochmessungen wurde aufgrund der Homogenität des Untergrundes verzichtet.

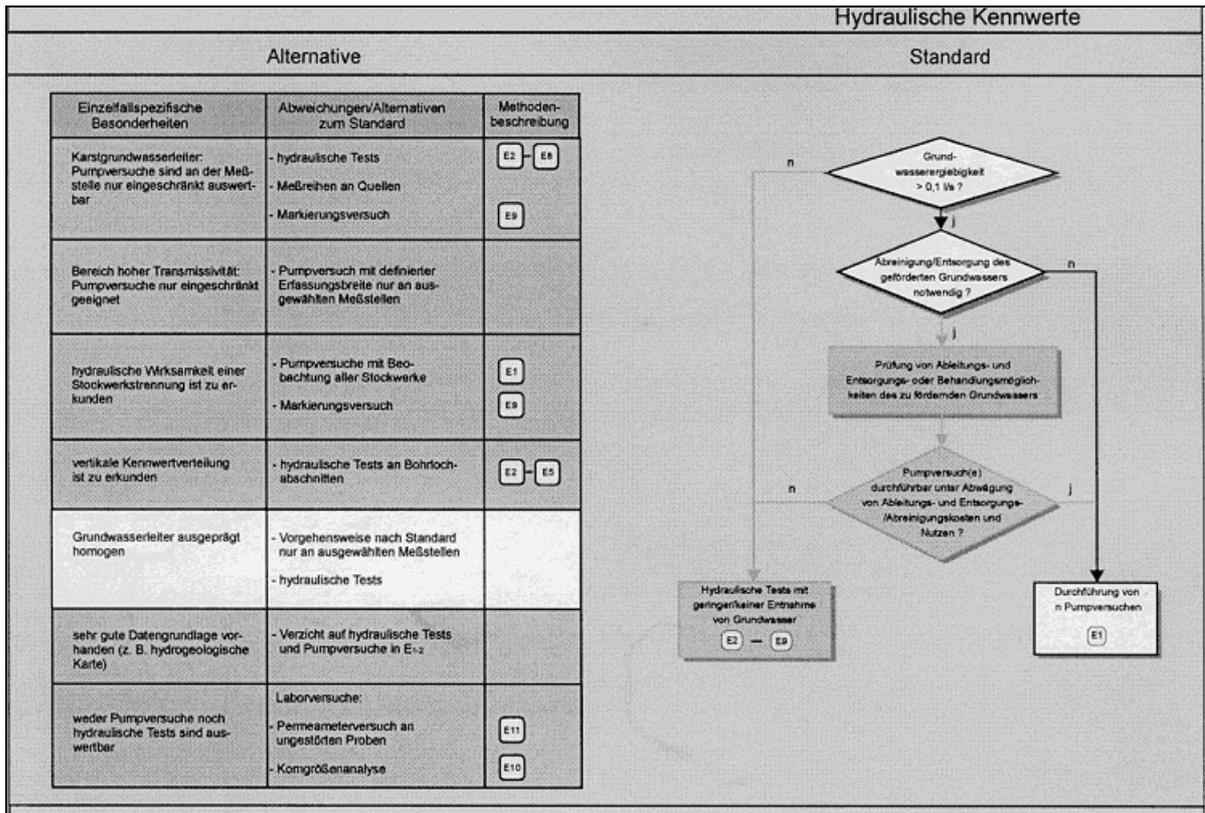
6. Hydraulische Kennwerte



Diagramm

Orientierende Erkundung

Durch die sehr gute Datengrundlage aus der hydrogeologischen Kartierung (HGK) waren zunächst keine Versuche zur Ermittlung hydraulischer Kennwerte vorgesehen.



Diagramm

Nähere Erkundung

Zur Verifizierung der Transmissivität wurden an zwei Meßstellen im Abstrom Kurzpumpversuche (3h - Absenkung, 1h - Wiederanstieg) durchgeführt.

Die Auswertung erfolgte nach dem Wiederanstiegsverfahren von THEIS.

Der aus der HGK bekannte T-Wert konnte in der Größenordnung bestätigt werden.

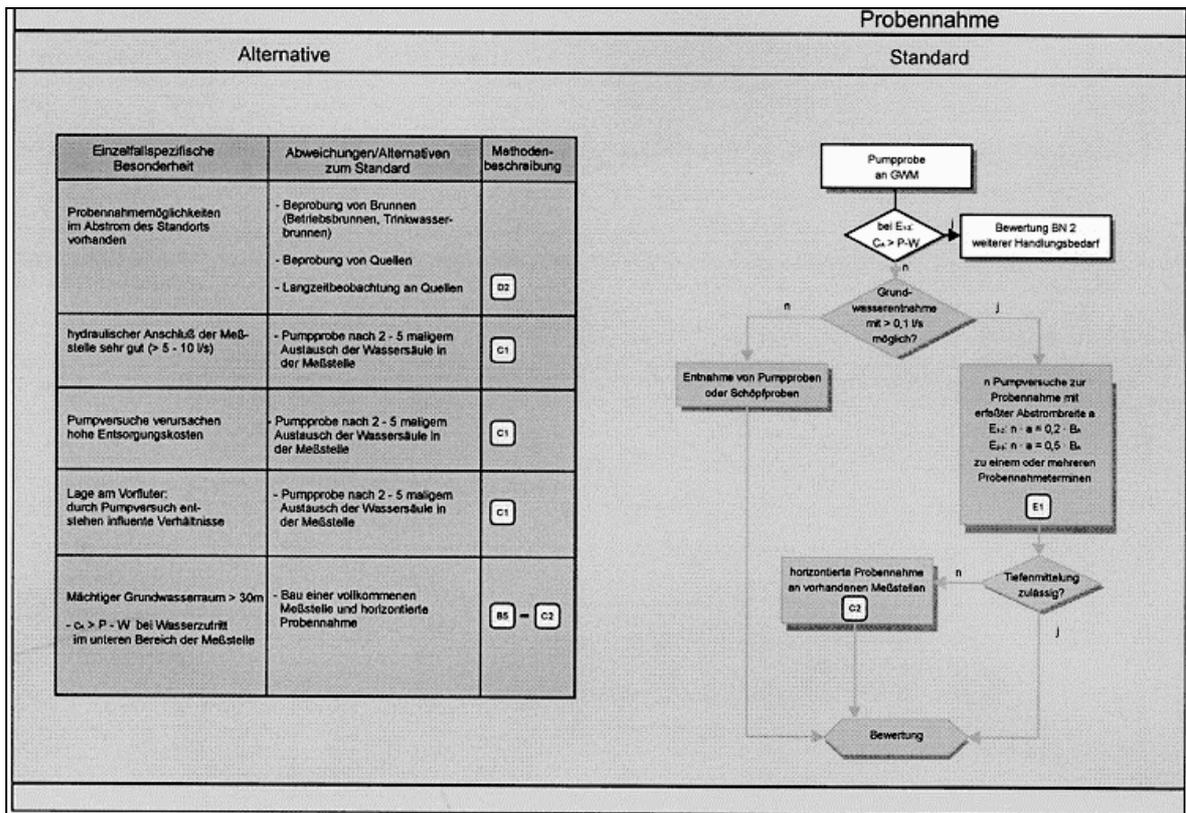
Transmissivitäten

HGK $5,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$

Meßstelle 2 $8,2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$

Meßstelle 3 $6,3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$

7. Probennahme



Diagramm

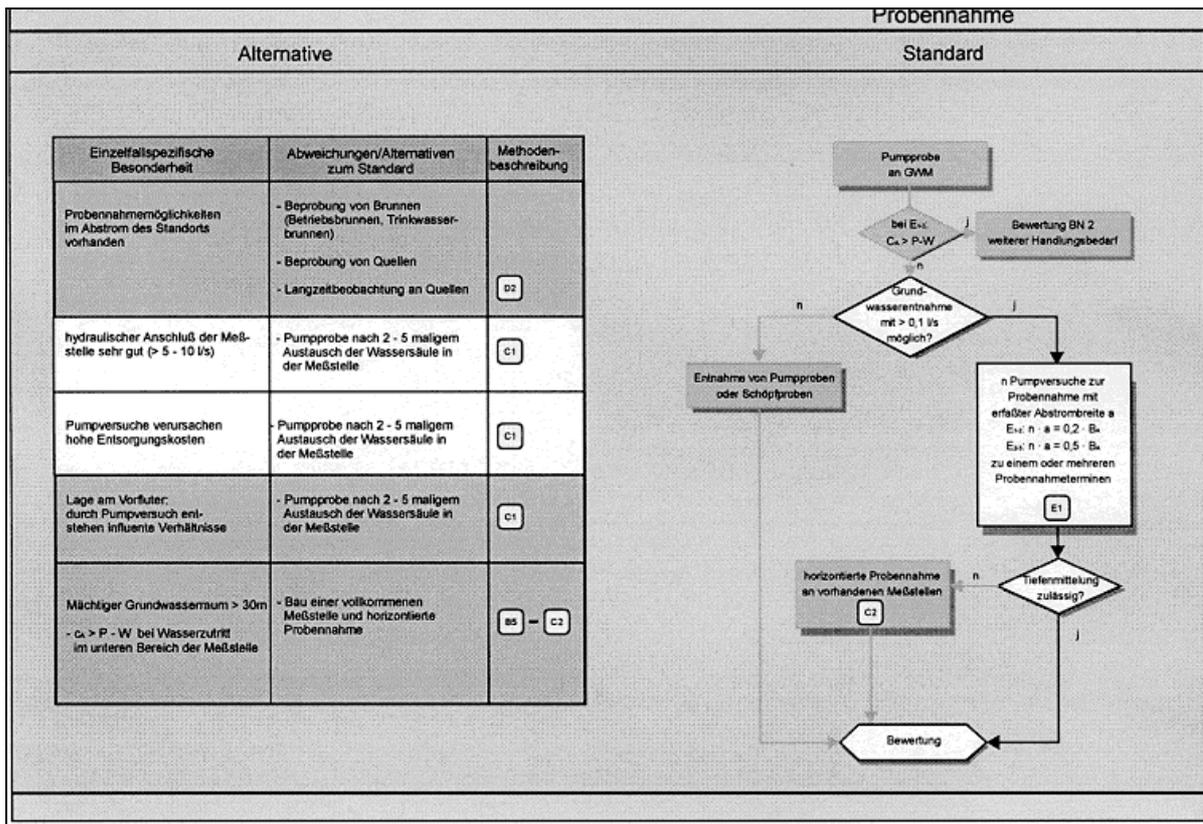
Orientierende Erkundung

Aus den Grundwassermeßstellen wurden mittels Einsatz einer U-Pumpe die Proben als tiefengemittelte Grundwasserproben entnommen und gleichzeitig eine Stichtagsmessung durchgeführt.

Die Probennahme erfolgte bei Erreichen der Meßwertkonstanz der vor Ort gemessenen Parameter (ca. 1 h Pumpdauer).

Aufgrund der nachgewiesenen Überschreitung des P-W-Wertes im Grundwasser wurde auf die Durchführung von Pumpversuchen zur Probennahme mit einer Erfassung von $0,2 B_A$ verzichtet.

Aus der Überschreitung des Prüfwerts P-W leitet sich ein weiterer Handlungsbedarf für eine nähere Erkundung E_{2-3} ab.



Diagramm

Nähere Erkundung

Zur Klärung der Frage, ob die gewählte Einbindetiefe im vorliegenden Fall ausreicht, wurde in den aus der orientierenden Erkundung vorhandenen Bohrungen (Meßstelle 2 + 3) vor Einrichtung der neuen Meßstellen jeweils eine horizontierte Probennahme mit je vier Tiefenstufen durchgeführt.

Tiefenstufe 1: 14 m u. GOK

Tiefenstufe 2: 20 m u. GOK

Tiefenstufe 3: 26 m u. GOK

Tiefenstufe 4: 32 m u. GOK

Die Proben wurden mittels eines 2-Pumpensystemes entnommen. Hieraus ergaben sich pro Meßstelle vier Proben.

Nach Erweiterung des Meßnetzes wurden sämtliche Meßstellen an einem Stichtag beprobt.

Die tiefengemittelten Proben wurden mittels U-Pumpe nach ca. 1-stündiger Pumpdauer und Meßwertkonstanz der gemessenen Vor-Ort-Parameter entnommen.

Unter den Aspekten

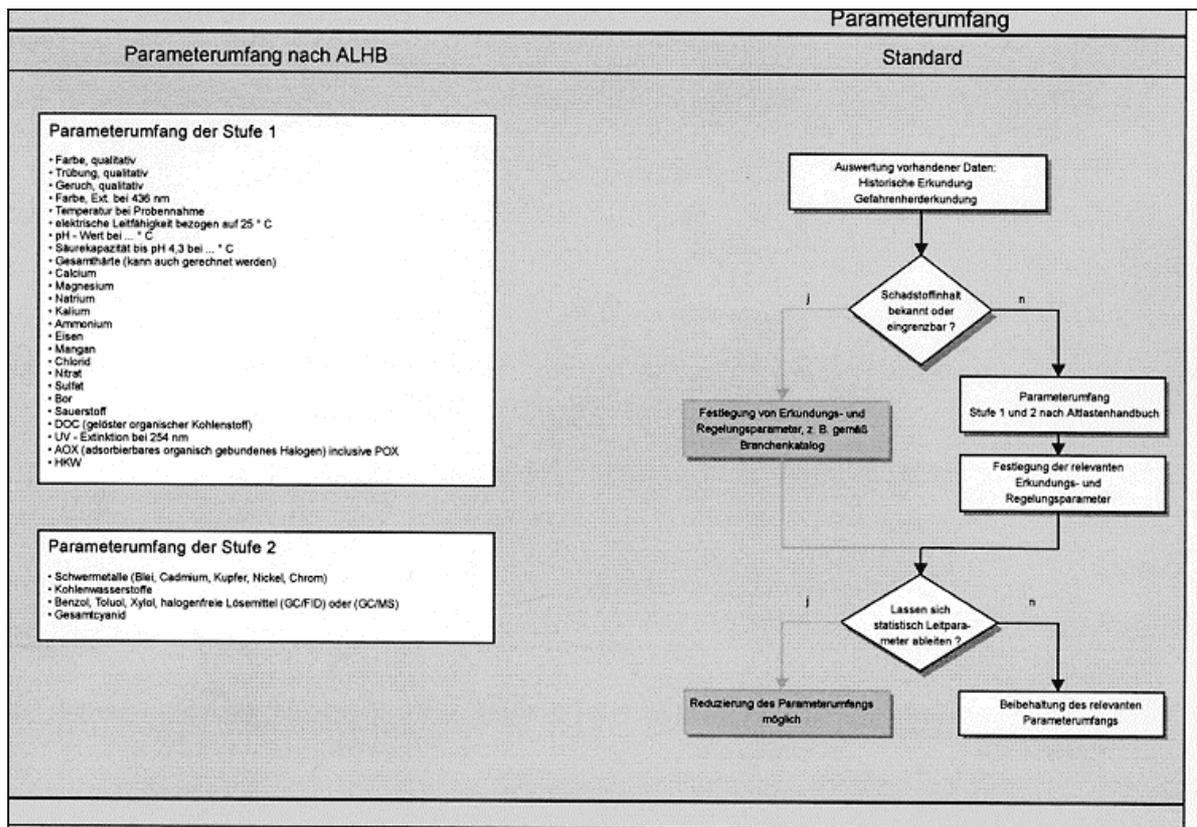
- guter hydraulischer Anschluß der GWM
- hohe Entsorgungskosten durch Pumpversuche

- Regionalisierung von Meßwerten

wurde zur Minimierung der Erkundungskosten auf umfangreiche Pumpversuche zur Probenahme verzichtet.

Aus der P-W-Wert-Überschreitung ergab sich ein weiterer Handlungsbedarf E_{3-4} .

8. Parameterumfang



Diagramm

Orientierende Erkundung

Durch die Ergebnisse der vorausgegangenen historischen Erkundung und Schadensherderkung mit einer Untersuchung von Bodenluft und Kontaktgrundwasser konnte das Schadstoffspektrum auf den Summenparameter KW (H18) eingengt werden.

Im Hinblick auf das durch das Ablagerungsgut mögliche Schadstoffspektrum und dem punktförmigen Charakter der Schadensherderkung wurden zur Erhöhung der Entscheidungssicherheit in der orientierenden Erkundungsstufe chemische Übersichtsanalysen durchgeführt.

Untersucht wurden die Parameter der Parameterstufen 1 + 2 gemäß ALHB.

Die Grundwasseranalytik bestätigte das Ergebnis der direkten Emissionserkundung. Als relevanter Schadstoff wurde, wie in der direkten Emissionserkundung, der Summenparameter KW (H18) erkannt.

Tiefengemittelte Probennahme c_A :

KW (H18) P-W: 50 µg/l

Meßstelle 1 (Zustrom)	< Nachweisgrenze
Meßstelle 2	625 µg/l
Meßstelle 3	150 µg/l

Nähere Erkundung

Durch die direkte Emissionserkundung und Grundwassererkundung im Rahmen von E₁₋₂ konnte das Schadstoffspektrum auf den Summenparameter KW (H18) eingengt werden.

Die horizontal und tiefengemittelt entnommenen Proben wurden deshalb nur auf die folgenden Parameter untersucht:

- pH-Wert,
- el. Leitfähigkeit,
- Temperatur,
- KW (H18) Kohlenwasserstoffe

Die Grundwasseranalytik der näheren Erkundung bestätigte das Ergebnis der direkten Emissionserkundung und der vorausgegangenen Grundwassererkundung. Als relevanter Schadstoff wurde der Summenparameter KW (H18) erkannt.

Horizontierte Probennahme:**KW (H18) P-W: 50 µg/l**

Tiefenstufe	Meßstelle 2	Meßstelle 3
14 m u. GOK	730 µg/l	561 µg/l
20 m u. GOK	222 µg/l	169 µg/l
26 m u. GOK	105 µg/l	87 µg/l
32 m u. GOK	32 µg/l	27 µg/l

Die Ergebnisse zeigen, daß im Tiefenbereich 26 - 32 m u. GOK die Schadstoffgehalte auf Werte < P-W zurückgehen. Mit einer Einbindetiefe der GWM von 30 m wird der kontaminierte Grundwasserteilstrom zur Tiefe hin vollständig erfaßt.

Tiefengemittelte Probennahme c_A:**KW (H18) P-W: 50 µg/l**

Meßstelle 1 (Zustrom)	< Nachweisgrenze
Meßstelle 2	471 µg/l
Meßstelle 3	201 µg/l
Meßstelle 4	139 µg/l
Meßstelle 5	234 µg/l
Meßstelle 6	87 µg/l
Meßstelle 7	225 µg/l

9. Emissionsermittlung über Grundwassererkundung und Plausibilitätskontrolle

Orientierende Erkundung

Die Ergebnisse der direkten Emissionserkundung und der Grundwassererkundung belegen eine Schadstoffemission über die gesamte Breite B_A . Die Tiefenverteilung des Schadstoffes über die Mächtigkeit des Grundwasserleiters ist noch unbekannt.

Emissionsermittlung:

Die Berechnung der E(A)-Werte für die Szenarien min/mittel/max erfolgt anhand der Werte aus der Tabelle "11. Hydrogeologische Parameter".

Emissionen E(A):

KW (H18) E_{\max} -W: 100 g/d

min	mittel	max
198 g/d	513 g/d	826 g/d

Der zur Berechnung von E(SH) verwendete Volumenstrom Q_{SH} ergibt sich aus der Summe der Teilströme $Q_{SiWa} = 21 \text{ m}^3/\text{d}$ und $Q_{KGW} = 441 \text{ m}^3/\text{d}$.

Aufgrund der geringen Pumprate während der Probennahme und des dadurch vernachlässigbaren Anteils an Grundwasser aus Schichten unterhalb der Brunnenunterkante wurde zur Berechnung der Fläche A_A nur die Einbindetiefe der Meßstelle und nicht die volle Mächtigkeit des Grundwasserleiters angesetzt.

Plausibilitätskontrolle:

Ein Vergleich der Emissionen ermittelt aus direkter Emissionserkundung $E(\text{SH})$ und Grundwassererkundung $E(\text{A})$ zeigt keine gravierenden Unterschiede.

Berücksichtigt man die hohe Variabilität der Eingangsparameter zur Berechnung der Emission, ergibt sich im vorliegenden Fall eine vergleichsweise gute Übereinstimmung.

Aufgrund der höheren Vertrauenswürdigkeit der integralen Grundwasserwerte in einem homogenen Grundwasserraum gegenüber den punktuellen Kontaktgrundwasserwerten in einem heterogenen Müllkörper, ist für die Bewertung des Standortes von einer Emission im Bereich von $E = \text{ca. } 500 \text{ g/d}$ auszugehen.

Nähere Erkundung

Emissionsermittlung:

Die Ergebnisse der direkten Emissionserkundung und der Grundwassererkundung belegen eine Schadstoffemission über die gesamte Breite B_A .

Durch die horizontierte Probennahme konnte der Tiefgang der Verunreinigung festgestellt werden. Die Bohrungen mit 30 m Einbindetiefe erschließen die komplette Mächtigkeit der Schadstofffahne.

Die Berechnung der $E(\text{A})$ -Werte für die Szenarien min/mittel/max/plausibel erfolgt anhand der Werte aus der Tabelle "11. Hydrogeologische Parameter".

Emissionen $E(\text{A})$:

KW (H18) $E_{\text{max}}\text{-W: } 100 \text{ g/d}$

min	mittel	max	plausibel
142 g/d	422 g/d	989 g/d	373-560 g/d

Der zur Berechnung von $E(\text{SH})$ verwendete Volumenstrom Q_{SH} ergibt sich aus der Summe der Teilströme Q_{SiWa} und Q_{KGW} .

Für die Ermittlung der plausiblen Emissionen wurden mittlere hydraulische und geometrische Werte und für c_A eine Schwankungsbreite von $c_A = 200 - 300 \mu\text{g/l}$ angenommen.

Plausibilitätskontrolle:

Die Ergebnisse der direkten Emissionserkundung und der Grundwassererkundung zeigen eine weitgehende Übereinstimmung.

Berücksichtigt man die große Variabilität der Eingangsparameter, so liegen die Unterschiede im Bereich der erzielbaren Genauigkeiten zur Ermittlung der Emission.

Für die den Standort kennzeichnende Emission kann aufgrund der Ergebnisse beider Erkundungsstufen ein Bereich zwischen 373 - 560 g/d angegeben werden.

10. Bewertung

Orientierende Erkundung

Aus der Schadstoffkonzentration c_{SH} , die mit Gehalten zwischen 581 - 1.138 $\mu\text{g/l}$ deutlich über dem Prüfwert von 50 $\mu\text{g/l}$ liegt, leitet sich der weitere Handlungsbedarf für eine nähere Erkundung $E_{2,3}$ ab.

Für die nächste Erkundungsphase ist ein stufenweises Vorgehen für die Grundwassererkundung geplant.

1. Stufe

In den bereits bestehenden Bohrungen soll eine horizontierte Probennahme durchgeführt werden.

Ziel: Erkundung der Tiefenverteilung der Schadstoffbelastung zur Festlegung der Ausbautiefen für die neu zu bohrenden Grundwassermeßstellen.

2. Stufe

Erstellung von weiteren Bohrungen im Abstrom mit einer Entnahme von tiefengemittelten Proben. Durch die Meßnetzverdichtung soll eine Absicherung der Meßwerte erfolgen.

Nähere Erkundung

Aus der Prüfwertüberschreitung der abgesicherten Schadstoffkonzentrationen c_{SH} ergibt sich zusammen mit einer abgesicherten Emission der weitere Handlungsbedarf für eine nähere Erkundung $E_{3,4}$.

Weitere technische Erkundungsmaßnahmen sind nicht vorgesehen.

11. Hydrogeologische Parameter

	BN1 / Planung E _{1,2} (vermutet)			BN2 (orientierend)			BN3 (abgesichert)			
	min	mittel	max	min	mittel	max	min	mittel	max	plausibel
Geometrie										
A _{SiWa} [m ²]		50.000			50.000			50.000		50.000
B _A [m]		300			300			300		300
h _{GW} [m]		70			70			70		70
A _A [m ²]	B _A · 30 m	9.000			9.000			9.000		9.000
h _{KGW} [m]		10			10			10		10
A _{KGW} [m ²]	B _A · h _{KGW}	3.000			3.000			3.000		3.000
Hydraulik										
Fließrichtung [°]		300	310	320	300	310	320	300	310	320
T [m ² /s]		5,0 · 10 ⁻²			5,0 · 10 ⁻²			6,3 · 10 ⁻²	7,3 · 10 ⁻²	8,2 · 10 ⁻²
k _f [m/s]		1,7 · 10 ⁻³			1,7 · 10 ⁻³			2,1 · 10 ⁻³	2,4 · 10 ⁻³	2,7 · 10 ⁻³
I [-]		0,001			0,001			0,001		0,001
n _f [-]		0,2			0,2			0,2		0,2
a [m]	Zylinderformel	15								
Q _{PV} [m ³ /s]		0,01								
t _{PV} [h]		29								
Volumenströme										
Q _A [m ³ /d]	k _f · A _A · I · 86400	1.322			1.322			1.633	1.866	2.100
Q _{SiWa} [m ³ /d]	$\frac{A_{SiWa} \cdot GWN}{365000}$	21			21			21		21
Q _{KGW} [m ³ /d]	k _f · A _{KGW} · I · 86400	441			441			544	622	700
Q _{SH} [m ³ /d]	= Q _{KGW} + Q _{SiWa}	462			462			565	643	721
Q _{ZT} [m ³ /d]	= Q _A - Q _{SH}	860			860			1.068	1.223	1.380
GWN [mm/a]		150			150			150		150
Emission										
c _Z [µg/l]					nn			nn		nn
c _{SH} [µg/l]				581	860	1.138	322	497	1.201	497
c _A [µg/l]				150	388	625	87	226	471	200 - 300
E(SH) [g/d]	Q _{SH} · c _{SH} · 10 ⁻³			268	397	526	182	319	865	319
E(A) [g/d]	(Q _A · c _A - Q _{ZT} · c _Z) · 10 ⁻³			198	513	826	142	422	989	373 - 560

Fallbeispiel 2: Karst-/Kluftgrundwasserleiter

Verkarstete Kalksteine des Oberen Muschelkalkes

1. Standortbeschreibung

Im Fallbeispiel wurde ein Altstandort des metallverarbeitenden Gewerbes erkundet.

Aus der vorausgegangenen historischen Erkundung $E_{0,1}$ sowie der direkten Emissionserkundung $E_{1,2}$ sind folgende Eckdaten des Altstandortes bekannt:

Produktion:

Metallverarbeitender Industriebetrieb (Schneiden, Pressen, Galvanisieren, Entfetten, Emaillieren, Spritzen, Härten).

Fläche:

Gesamtfläche rund 10.000 m², kontaminierter Teilbereich rund 2.000 m² (unversiegelt).

Produktionszeitraum: 1900 - 1980

Geologie:

Unter einer 1 - 3 m mächtigen anthropogenen Auffüllung folgen bis zu 6 m mächtige tonige Schluffe mit sand- und kiesführenden Lagen.

Das Liegende bilden die verkarsteten, im obersten Bereich stark verwitterten Kalksteine des Oberen Muschelkalkes. Neben einem großen Grundwasserdargebot werden im Karst sehr hohe Fließgeschwindigkeiten von mehreren 10-er Metern pro Stunde erreicht.

Nutzungswürdigkeit des Grundwassers:

Der Standort liegt innerhalb der Trinkwasserschutzzone III B.

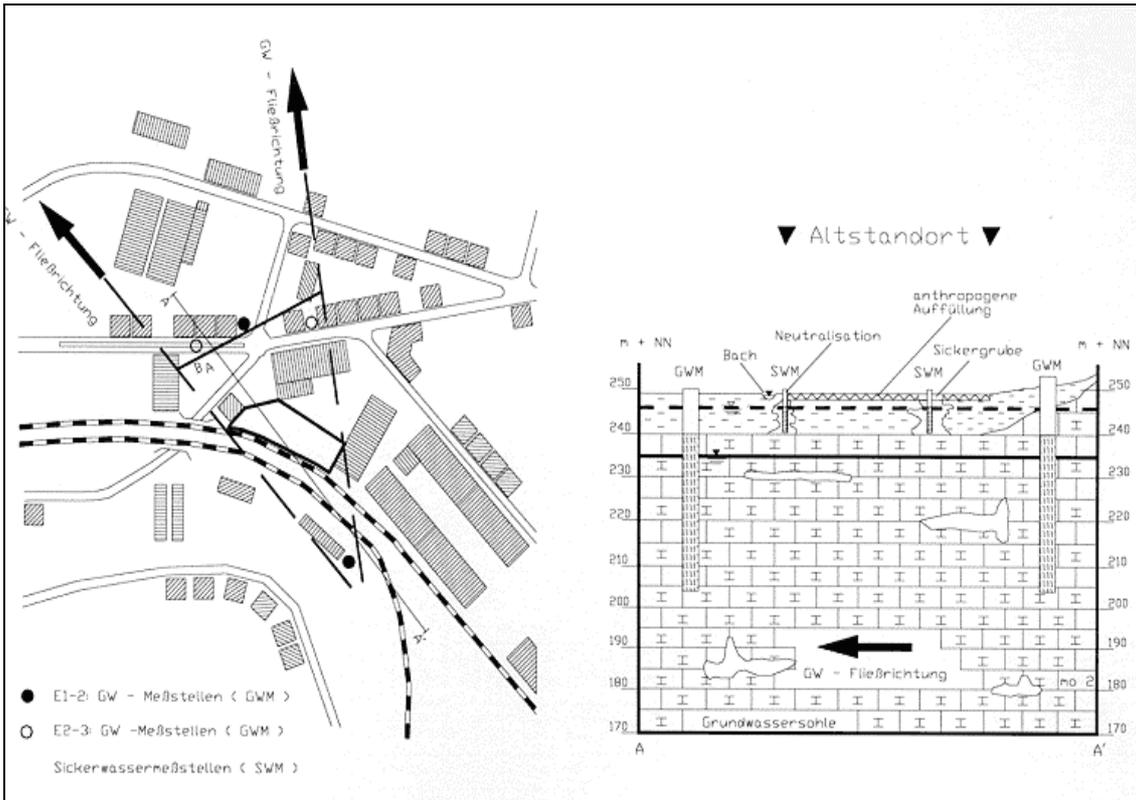
Gefahren-/Schadensherderkundung:

Bodenluft, Boden, Laboreluat, Sickerwasser

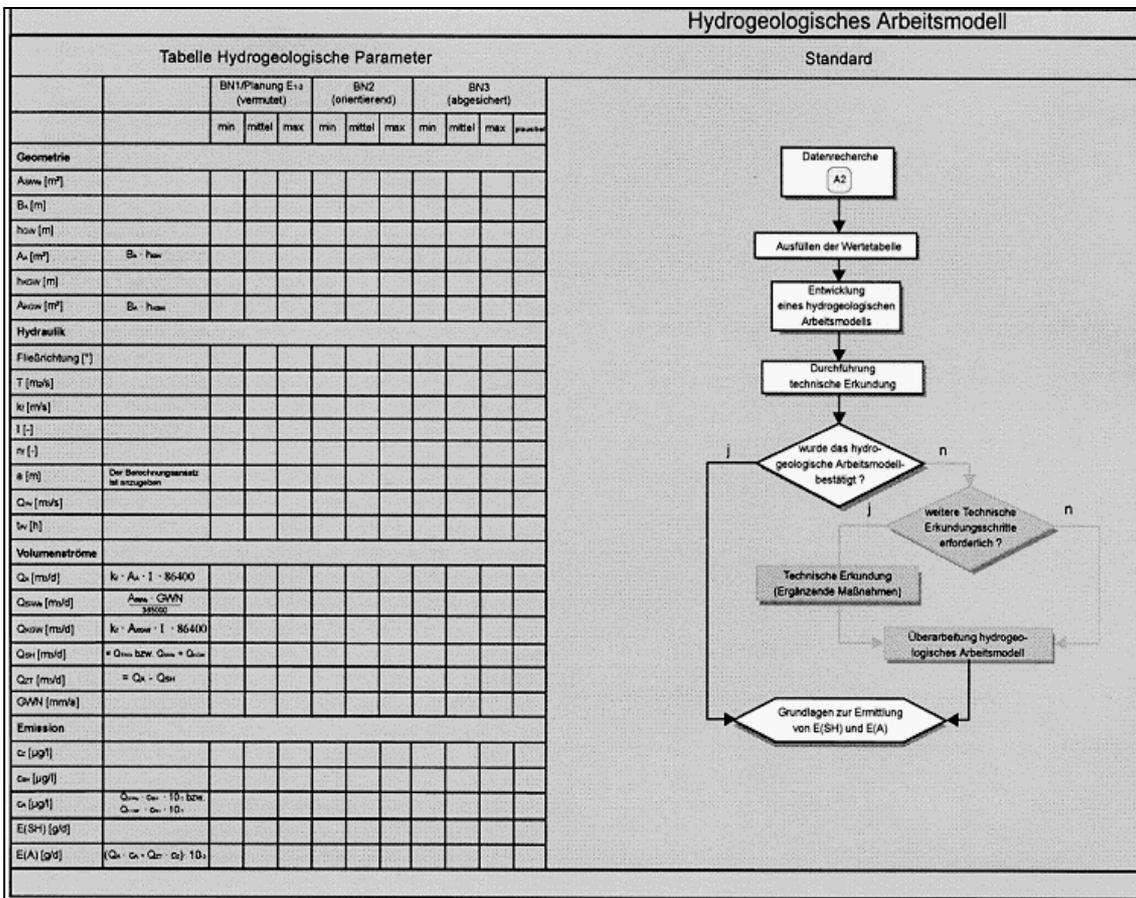
Schadstoffe:

Mehrere kleinräumige CKW-Schadensherde verteilt über das Werksgelände

- Bodenluft max. $c = 12.000 \text{ mg/m}^3$
- Boden max. $c = 559 \text{ mg/kg}$
- Sickerwasser max. $c_{SH} = 721.000 \text{ } \mu\text{g/l}$



2. Hydrogeologisches Arbeitsmodell



Diagramm

Orientierende Erkundung

Für die Ermittlung eines hydrogeologischen Arbeitsmodelles wurden das entsprechende Blatt der geologischen Karte GK 25, der topographischen Karte TK 25 sowie regionale hydrogeologische Forschungsarbeiten ausgewertet.

Die hydrogeologischen Parameter sind in der Tabelle "11. Hydrogeologische Parameter" am Ende des Fallbeispiels zusammengestellt.

Hydrogeologisches Arbeitsmodell:

Unter einer geringdurchlässigen, rund 10 - 15 m mächtigen ungesättigten Zone folgen die ca. 90 m mächtigen, verkarsteten Kalksteine des Oberen Muschelkalkes.

Die ungesättigte Zone besteht überwiegend aus tonigen Schluffen mit wechselnden Sand-/Kiesanteilen.

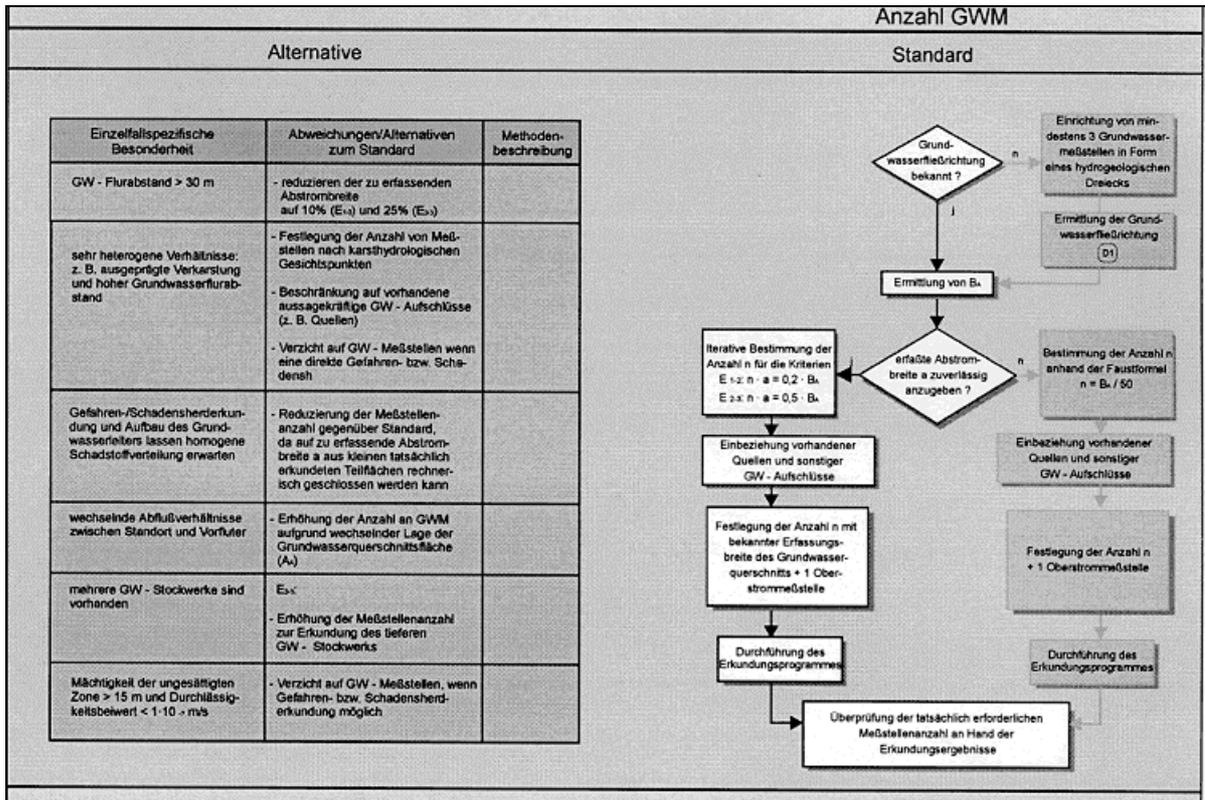
Die Kalksteine des Oberen Muschelkalkes sind tektonisch beansprucht. Klüfte und Schichtfugen sind durch Lösungserscheinungen aufgeweitet (verkarstet). Durch die Verkarstung ist ein großes Grundwasserdargebot, eine hohe Gebirgsdurchlässigkeit und eine hohe Grundwasserfließgeschwindigkeit zu erwarten.

Die regional dominierende Grundwasserfließrichtung konnte anhand von Markierungsversuchen im Rahmen regionaler Forschungsarbeiten mit Nordwest bis Nord bestimmt werden.

Nähere Erkundung

Die Ergebnisse der orientierenden Erkundung bestätigten das bestehende Arbeitsmodell.

3. Anzahl GWM



Diagramm

Orientierende Erkundung

Die Grundwasserfließrichtung war aus der Auswertung regionaler hydrogeologischer Untersuchungen bekannt. Die Größe von B_A ergab sich aus den Ergebnissen der direkten Emissionserkundung sowie aus geometrischen Betrachtungen zu B_A = 70 m. Die in E₁₋₂ geforderte Erfassungsbreite von 0,2 B_A beträgt somit 14 m.

Die erforderlichen Meßstellenanzahl ergibt sich unter Beachtung des Kriteriums a <= 20 m zu

$$n = \frac{0,2 \cdot B_A}{a} = \frac{14 \text{ m}}{14 \text{ m}} = 1$$

mit a = 14 m.

Mit einer hydrogeologisch sinnvollen Pumprate von Q_{PV} = 0,005 m³/s läßt sich anhand der Gleichung von BEAR & JACOBS die entsprechende Pumpdauer berechnen (x = 0; y = 7 m):

$$t_{PV} = \left(\frac{0,02 \cdot 0,005 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot 86400}{2 \cdot \pi \cdot (0,095 \text{ m d}^{-1})^2 \cdot 30 \text{ m}} \cdot \left(-\ln \left(\cos \left(7 \text{ m} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 30 \text{ m} \cdot 0,095 \text{ m d}^{-1}}{0,005 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot 86400} \right) \right) \right) \right) \cdot 24$$

= 5,2 h

Zusätzlich ist eine Meßstelle zur Überprüfung einer möglichen Schadstoffbelastung im Zu-
strom erforderlich.

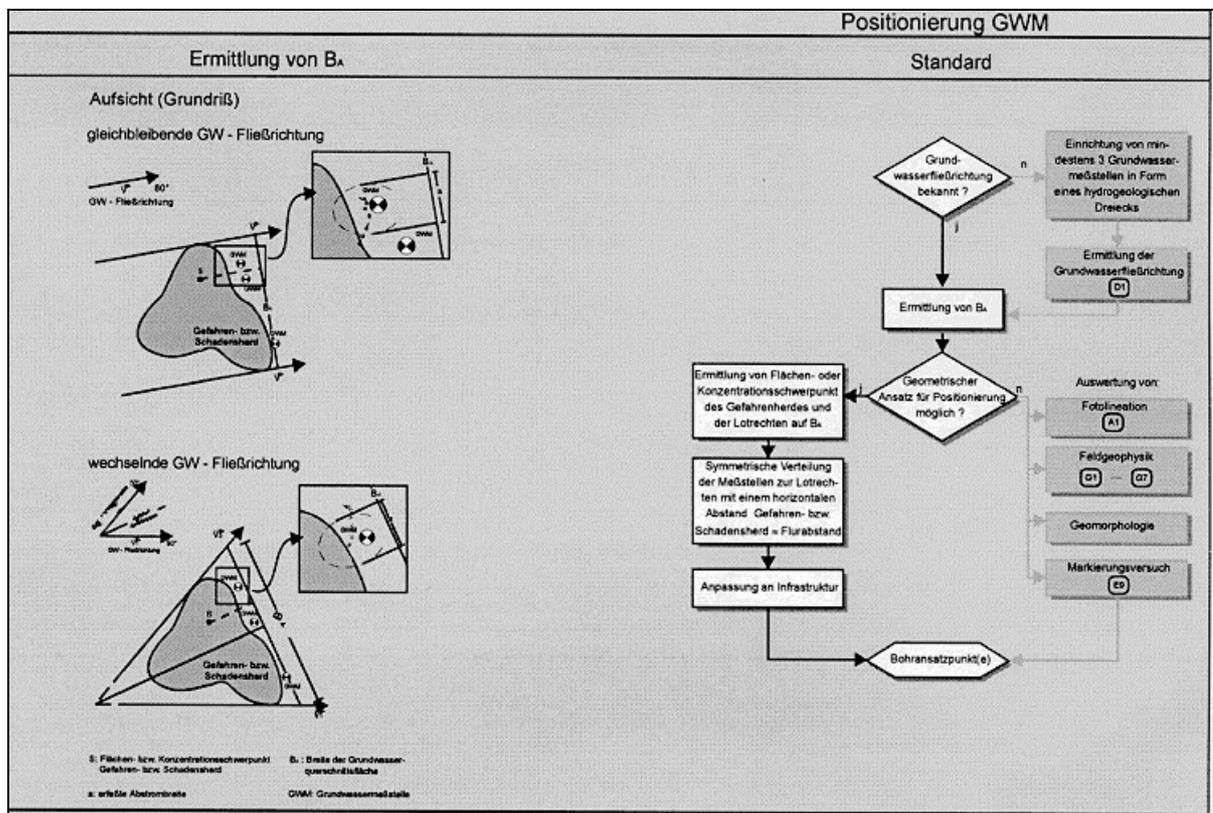
Nähere Erkundung

Durch die vorausgegangene Grundwassererkundung konnte das bestehende hydrogeologische
Arbeitsmodell bestätigt werden.

Zur Erreichung des Kriteriums $0,5 B_A$ ist es bei gleichbleibender Pumprate von $0,005 \text{ m}^3/\text{s}$
und gleichbleibender Erfassungsbreite der Einzelmeßstelle von $a = 14 \text{ m}$ notwendig, zwei
weitere Meßstellen im Abstrom einzurichten.

$$n = \frac{0,5 B_A}{a} = \frac{35 \text{ m}}{14 \text{ m}} = 3$$

4. Positionierung GWM



Diagramm

Orientierende Erkundung

Eine Positionierung der abstromigen Meßstelle anhand eines geometrischen Ansatzes ist gene-
rell möglich. Unter Berücksichtigung der besonderen Lage des Schadensherdes inner-
halb eines Stadtgebietes ist jedoch eine Anpassung der Bohransatzpunkte an die Infrastruktur not-
wendig.

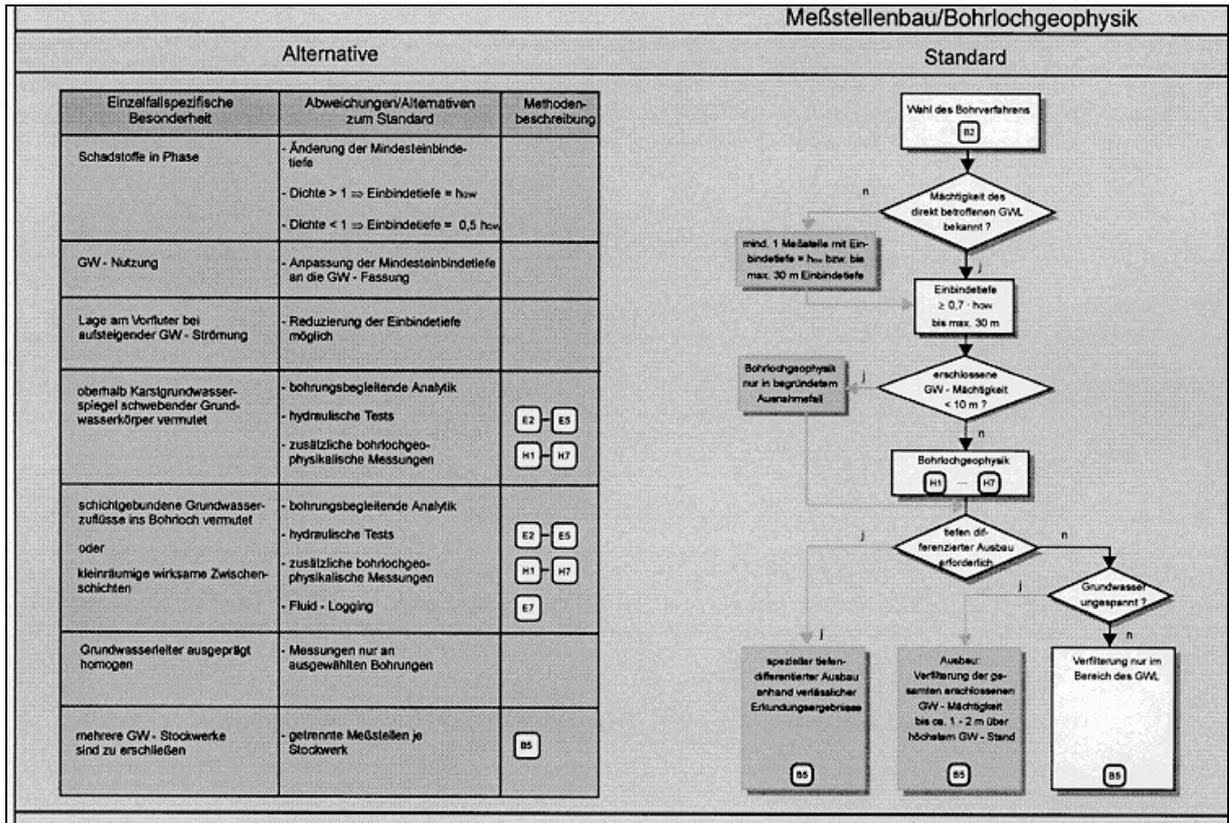
Das Kriterium "symmetrische Verteilung der Meßstellen" konnte somit nicht oder nur unge-
nügend erfüllt werden.

Auch die Positionierung der Zustrommeßstelle erfolgte anhand infrastruktureller Gesichtspunkte.

Nähere Erkundung

Die Positionierung unterliegt auch hier infrastrukturellen Zwängen, so daß die Maßgabe "symmetrische Anordnung" nicht eingehalten werden konnte.

5. Meßstellenbau/Bohrlochgeophysik



Diagramm

Orientierende Erkundung

Zur Erschließung des Karstgrundwasserleiters wird nach Durchörterung der quartären Deckschichten mittels Rammkernbohrung ein Rotationskernbohrverfahren eingesetzt.

Durch das große Grundwasserdargebot im Oberen Muschelkalk wird von einem Lösungstransport im Grundwasser ausgegangen. Da in diesem Fall mit einem Absinken der Schadstoffe erst im weiteren Abstrom zum Gefahrenherd zu rechnen ist, reicht es für den unmittelbaren Abstrom zunächst aus, die Meßstellen unvollkommen mit einer maximalen Einbindetiefe von 30 m auszubauen.

Zur Kontrolle der vertikalen Gliederung der erbohrten Schichten wurden geophysikalische Bohrlochmessungen durchgeführt (Gamma-, FE-, Temperatur-, Flow-, Salinitäts-Log).

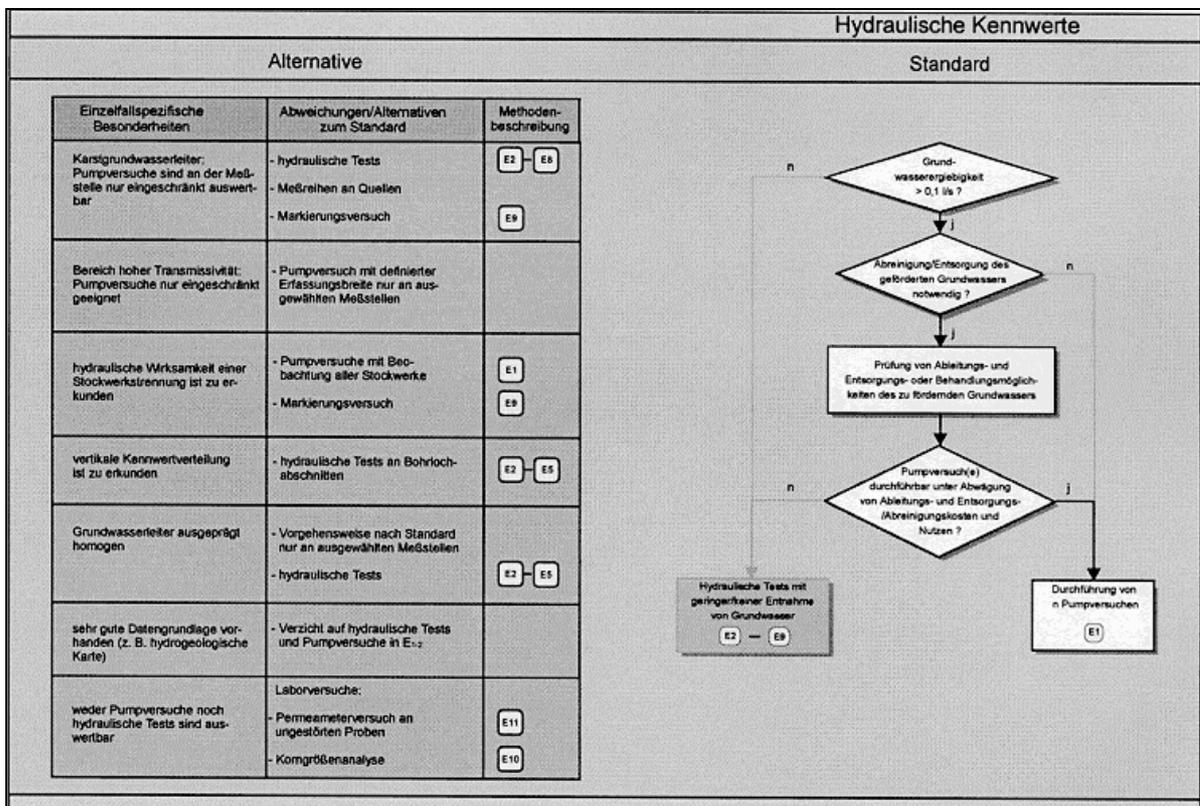
Die Bohrlochgeophysik ergab Grundwasserzuflüsse über die gesamte Einbindetiefe, die dem gleichen Grundwasserleiter angehören. Die Meßstellen wurden deshalb zwischen Oberkante Muschelkalk und Bohrlochsohle durchgängig verfiltrert.

Zum Zeitpunkt des Bohrens lagen ungespannte Grundwasserverhältnisse vor. In Zeiten hoher Grundwasserstände muß aufgrund der hydrogeologischen Situation mit gespannten Verhältnissen gerechnet werden.

Nähere Erkundung

Ausbau und Bohrlochgeophysik erfolgten analog E_{1,2}.

6. Hydraulische Kennwerte



Diagramm

Orientierende Erkundung

Unter Abwägung der entstehenden Entsorgungskosten bei langandauernden Pumpversuchen mit hohen Pumpraten, wurde zur Ermittlung hydraulischer Kennwerte an den GWM im Zu- und Abstrom je ein Kurzpumpversuch (2h-Absenkung, 1h-Wiederanstieg) mit einer Pumprate von 0,005 m³/s durchgeführt.

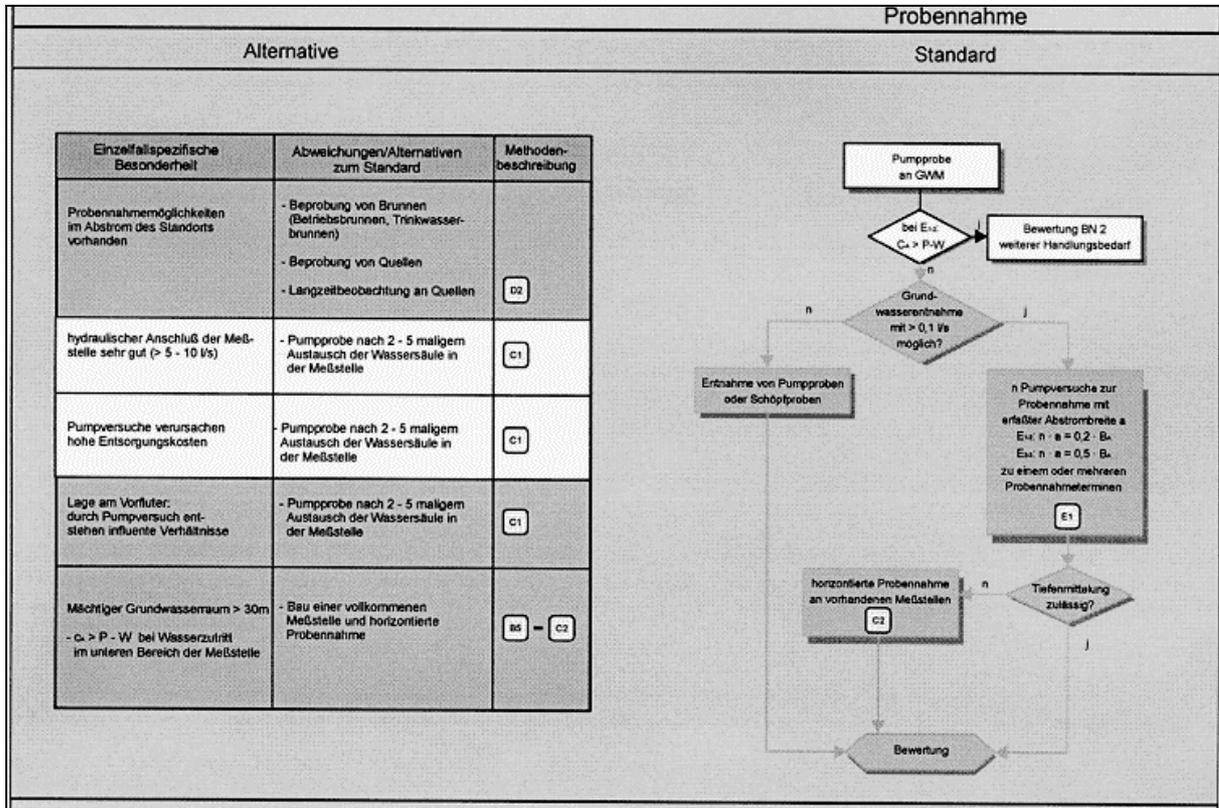
Das kontaminierte Abwasser aus der abstromigen GWM konnte aufgrund der relativ kleinen Gesamtmenge in das öffentliche Kanalnetz eingeleitet werden.

Die Bestimmung der Transmissivität erfolgte anhand der Auswertung des Wiederanstiegs nach THEIS.

Nähere Erkundung

Zur Absicherung der hydraulischen Kennwerte wurden analog zu E_{1,2} an den zwei neu eingerichteten GWM Kurzpumpversuche durchgeführt.

7. Probennahme



Diagramm

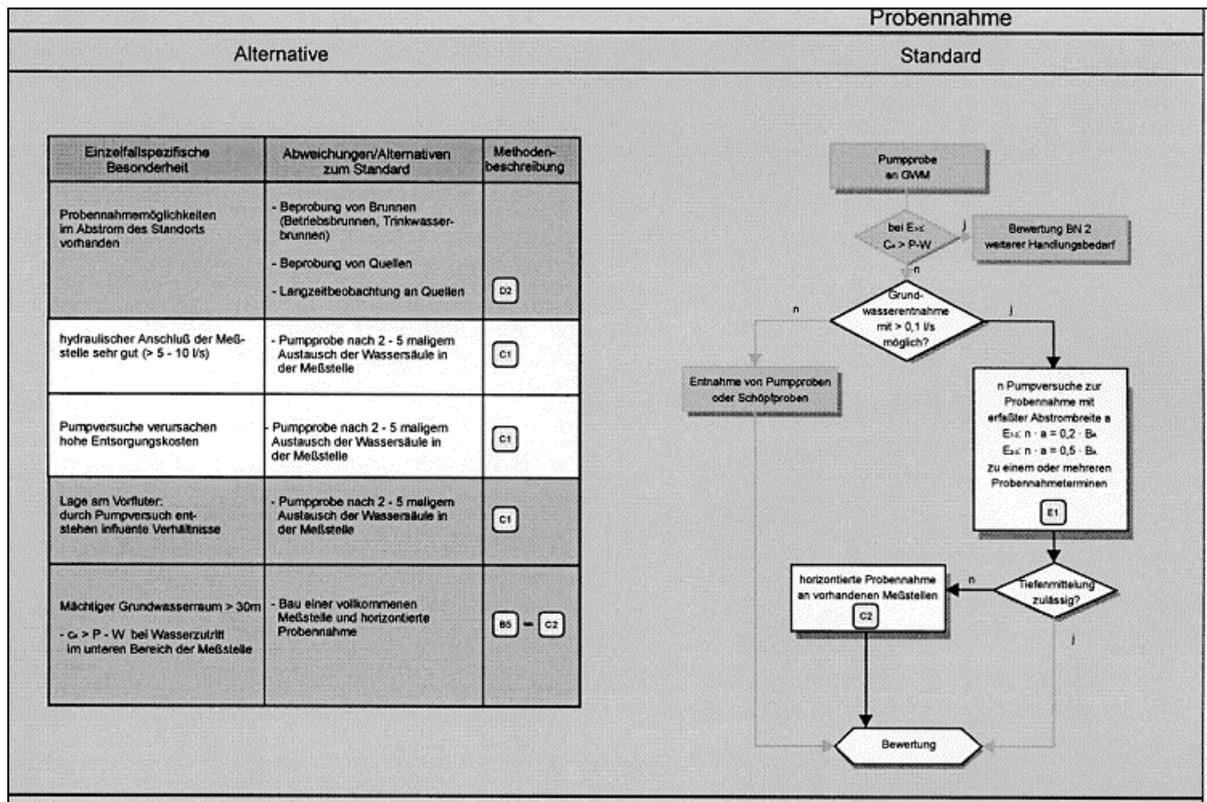
Orientierende Erkundung

Die zwei GWM wurden im Rahmen der Kurzpumpversuche zur Ermittlung der hydraulischen Kennwerte beprobt.

Auf die Durchführung von längeren Pumpversuchen mit großen Pumpraten zur Erfassung von $0,2 B_A$ wurde aus folgenden Gründen verzichtet:

- Hydraulischer Anschluß der GWM sehr gut (> 10 l/s).
- Hohe Entsorgungskosten für die Abreinigung des kontaminierten Abwassers.

Die Ergebnisse zeigten in der abstromigen Meßstelle eine P-W-Wert-Überschreitung für CKW. Hieraus ergibt sich ein weiterer Handlungsbedarf E_{2,3}.



Diagramm

Nähere Erkundung

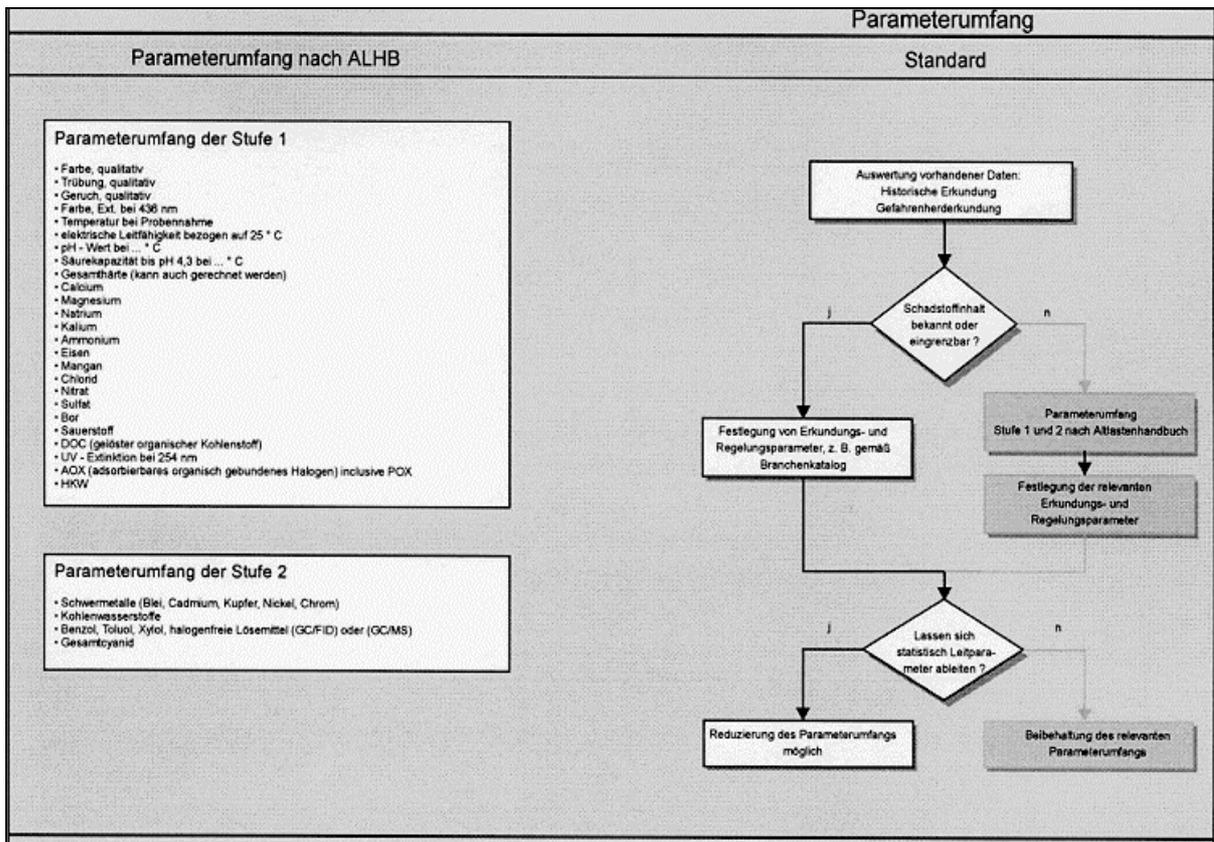
Die Probennahme in den drei abstromigen Meßstellen wurde analog zur orientierenden Erkundung durchgeführt.

Im Hinblick auf eine Tiefenabgrenzung der Schadstofffahne und einer möglichen hydraulischen Sanierung des in einem Trinkwasserschutzgebiet (Zone III A) liegenden Standortes, wurde für deren spätere Optimierung an der zentral im Abstrom gelegenen GWM eine horizontierte Probennahme in Tiefenstufen von jeweils 10 m durchgeführt.

Durch die Ergebnisse der horizontierten Probennahme konnte eine deutliche Abnahme der Schadstoffkonzentration zur Tiefe festgestellt werden.

Die Entnahme erfolgte mittels eines 2-Pumpen-Systems.

8. Parameterumfang



Diagramm

Orientierende Erkundung

Durch die Ergebnisse der historischen Erkundung und der Schadensherderkundung im Rahmen von E_{1-2} konnte der Untersuchungsumfang eingeschränkt werden:

- Temperatur - CKW
- pH-Wert - BTXE
- elektr. Leitfähigkeit - Kohlenwasserstoffe
- AOX - Phenole
- Schwermetalle - Cyanide

Die Grundwasseranalysen bestätigten das Ergebnis der direkten Emissionserkundung dahingehend, daß CKW als einzige relevante Schadstoffgruppe im Grundwasser nachweisbar war.

Tiefengemittelte Probennahme c_A : **Σ CKW P-W: 10 $\mu\text{g/l}$**

Meßstelle 1 (Zustrom)	< Nachweisgrenze
Meßstelle 2	38 $\mu\text{g/l}$

Nähere Erkundung

Durch die Ergebnisse der direkten Emissionserkundung und der Grundwassererkundung wurde der Parameterumfang zur Probennahme auf die Parameter

- pH-Wert
- el. Leitfähigkeit
- Temperatur
- CKW

reduziert.

Horizontierte Probennahme: **Σ CKW P-W: 10 $\mu\text{g/l}$**

Tiefenstufe	Meßstelle 2
20 m u. GOK	143 $\mu\text{g/l}$
30 m u. GOK	63 $\mu\text{g/l}$
40 m u. GOK	< Nachweisgrenze

Tiefengemittelte Probennahme c_A : **Σ CKW P-W: 10 $\mu\text{g/l}$**

Meßstelle 1 (Zustrom)	< Nachweisgrenze
Meßstelle 2	89 $\mu\text{g/l}$
Meßstelle 3	26 $\mu\text{g/l}$
Meßstelle 4	51 $\mu\text{g/l}$

9. Emissionsermittlung über Grundwassererkundung und Plausibilitätskontrolle

Orientierende Erkundung

Grundsätzlich wird davon ausgegangen, daß die Emission der Schadstoffe über die gesamte Breite B_A erfolgt.

Emissionsermittlung:

Die Berechnung der E(A)-Werte für die Szenarien min/mittel/max erfolgt anhand der Werte aus der Tabelle "11. Hydrogeologische Parameter".

Emission E(A):

$\Sigma CKW E_{max}$ -W: 20 g/d

	min	mittel	max
E(A)	4 g/d	77 g/d	154 g/d

Aufgrund der geringen Pumprate während der Probennahme und des dadurch vernachlässigbaren Anteils an Grundwasser aus Schichten unterhalb der Brunnenunterkante, wird zur Berechnung der Fläche A_A nur die Einbindetiefe der Meßstelle und nicht die volle Mächtigkeit des GWL angesetzt.

Plausibilitätskontrolle:

Die aus der Schadensherderkundung ermittelte Emission E(SH) wird hinsichtlich ihrer Größenordnung mit der aus der Grundwassererkundung berechneten Emission E(A) verglichen.

Dabei zeigt sich, daß die Emissionswerte E(SH) gegenüber den Emissionswerten E(A) eine deutlich größere Spannweite von E(SH) = 0,3 - 1.154 g/d aufweisen.

Heterogene Schadstoffverteilung und stagnierende Sickerwasserverhältnisse, vor allem im Bereich der geringdurchlässigen quartären Deckschichten, sind als wahrscheinliche Ursachen hierfür zu nennen.

Im Fall der Grundwassererkundung besitzen die Analyseergebnisse einen integralen Charakter. Durch die Grundwasserströmung sind die gemessenen Größen örtlich und zeitlich gemittelt.

Unter der Voraussetzung, daß die GWM im sicheren Abstrom zum Schadensherd liegt, ist die Emission E(A) als die den Standort am besten kennzeichnende Größe anzusehen.

Nähere Erkundung

Emissionsermittlung:

Die bislang bestehenden Unterschiede zwischen E(SH) und E(A) fallen durch die neuen Ergebnisse geringer aus. Die Werte von E(A) bleiben aber immer noch deutlich hinter den Werten von E(SH) zurück.

Für die Ermittlung der plausiblen Emissionen wird neben mittleren hydraulischen und geometrischen Werten für c_A ein Intervall von $c_A = 30 - 50 \mu\text{g/l}$ angenommen.

Emission E(A):

$\Sigma\text{CKW } E_{\text{max}}\text{-W: } 20 \text{ g/d}$

	min	mittel	max	plausibel
E(A)	3 g/d	116 g/d	362 g/d	61-102 g/d

Plausibilitätskontrolle:

Die ermittelten Emissionen E(A) bestätigen weitgehend die Ergebnisse aus E_{1-2} . Die zur Berechnung verwendete Datengrundlage kann als ausreichend abgesichert angesehen werden.

Durch den integralen Charakter der Grundwasserergebnisse sind diese zur Kennzeichnung des Standortes den Ergebnissen aus der Schadensherderkundung vorzuziehen.

Die im Hinblick auf die Tiefenabgrenzung durchgeführte horizontierte Beprobung bestätigte die ausreichende Ausbautiefe der GWM, so daß die zur Berechnung herangezogene Emissionsfläche A_A ausreichend groß gewählt wurde.

10. Bewertung

Orientierende Erkundung

Aus den durch die direkte Emissionserkundung nachgewiesenen Werten für die Schadstoffkonzentration c_{SH} leitet sich der Handlungsbedarf für eine nähere Erkundung (E_{2-3}) ab. Der Prüfwert P-W für CKW wird durch die im Sickerwasser nachgewiesenen Konzentrationen um ein Vielfaches überschritten (vgl. 11. Hydrogeologische Parameter).

In der nächsten Erkundungsstufe soll durch weitere Meßstellen im Abstrom eine Datenverdichtung zur Ableitung abgesicherter Werte erfolgen.

Im Hinblick auf die Festlegung der emissionsbeeinflussten Fläche A_A soll durch eine horizontierte Probennahme der Tiefgang der Verunreinigung erfaßt werden.

Nähere Erkundung

Die aus der direkten Emissionserkundung nachgewiesenen Werte für die Schadstoffkonzentration c_{SH} überschreiten den Prüfwert P-W für CKW deutlich und sind aufgrund der Datendichte als abgesichert einzustufen.

Aus der abgesicherten Prüfwertüberschreitung $c_{SH} > P-W$ ergibt sich zusammen mit einer abgesicherten Emission ein Handlungsbedarf für eine eingehende Erkundung E_{3-4} .

11. Hydrogeologische Parameter

		BN1 / Planung E ₁₋₂ (vermutet)			BN2 (orientierend)			BN3 (abgesichert)			
		min	mittel	max	min	mittel	max	min	mittel	max	plausibel
Geometrie											
A _{SiWa} [m ²]			2.000			2.000			2.000		2.000
B _A [m]			70			70			70		70
h _{GW} [m]			90			90			90		90
A _A [m ²]	B _A · 30 m		2.100			2.100			2.100		2.100
h _{KGW} [m]											
A _{KGW} [m ²]	B _A · h _{KGW}										
Hydraulik											
Fließrichtung [°]		300	330	360	320	330	340	320	330	340	330
T [m ² /s]			1,0 · 10 ⁻²		2,1 · 10 ⁻³	4,3 · 10 ⁻²	8,3 · 10 ⁻²	2,1 · 10 ⁻³	4,3 · 10 ⁻²	8,3 · 10 ⁻²	4,3 · 10 ⁻²
k _f [m/s]			3,3 · 10 ⁻⁴		7,0 · 10 ⁻⁵	1,4 · 10 ⁻³	2,8 · 10 ⁻³	7,0 · 10 ⁻⁵	1,4 · 10 ⁻³	2,8 · 10 ⁻³	1,4 · 10 ⁻³
I [-]			0,01			0,008			0,008		0,008
n _f [-]			0,02			0,02			0,02		0,02
a [m]	BEAR & JACOBS		14								
Q _{pV} [m ³ /s]			0,005								
t _{pV} [h]			5,2								
Volumenströme											
Q _A [m ³ /d]	k _f · A _A · I · 86400		599		102	2.032	4.064	102	2.032	4.064	2.032
Q _{SiWa} [m ³ /d]	$\frac{A_{SiWa} \cdot GWN}{365000}$		1,6			1,6			1,6		1,6
Q _{KGW} [m ³ /d]	k _f · A _{KGW} · I · 86400										
Q _{SH} [m ³ /d]	= Q _{SiWa}		1,6			1,6			1,6		1,6
Q _{ZT} [m ³ /d]	= Q _A - Q _{SH}		597		100	2.030	4.062	100	2.030	4.062	2.030
GWN [mm/a]			300			300			300		300
Emission											
c _Z [µg/l]						nn			nn		nn
c _{SH} [µg/l]					180	175.900	721.000	180	175.900	721.000	175.900
c _A [µg/l]						38		26	57	89	30-50
E(SH) [g/d]	Q _{SH} · c _{SH} · 10 ⁻³				0,3	281	1.154	0,3	281	1.154	281
E(A) [g/d]	(Q _A · c _A - Q _{ZT} · c _Z) · 10 ⁻³				4	77	154	3	116	362	61 - 102

Fallbeispiel 3: Porengrundwasserleiter, heterogen

Quartäre, rißzeitliche Vorstoßschotter

1. Standortbeschreibung

Aus der vorausgegangenen historischen Erkundung E_{0-1} und der direkten Emissionserkundung E_{1-2} sind folgende Eckdaten zu der Altablagerung bekannt:

Ablagerungsgut:

- Hausmüll und hausmüllähnliche Stoffe
- Sperrmüll
- Bauschutt und Erdaushub
- Gewerbeabfälle (Gerberei)
- Industrieabfälle

Ablagerungsart:

Verfüllung einer max. 12 m tiefen Lehmgrube durch Abkippen des Abfalls von einer Rampe; gelegentlich verdichtet und planiert; keine Sohlabdichtung; keine Sickerwasserdrainage; Sickerwasserzutritte möglich; dichte Lagerung; Müllkörper ständig über GW.

Fläche: 50.000 m²

Volumen: 260.000 m³

Betriebszeitraum: 1967 - 1975

Ehemalige Nutzung: Lehmgrube

Geologie:

Rißzeitliche Grundmoräne (in Lehmgrube abgebaut, ca. 10 - 15 m) über Rißvorstoßschottern (z.T. zu Nagelfluhbänken zementiert), die von geringdurchlässigen Sedimenten (Sandsteine und Mergel) der Oberen Süßwassermolasse unterlagert werden. Grundwasser in Schottern ca. 30 m unter Gelände mit Fließrichtung in Richtung Vorfluter (Nord-West nach Süd-Ost). Gute Durchlässigkeit des quartären Grundwasserleiters.

Das Grundwasser wird im weiteren Abstrom als Trinkwasser genutzt. Die Altablagerung liegt nicht im Wasserschutzgebiet.

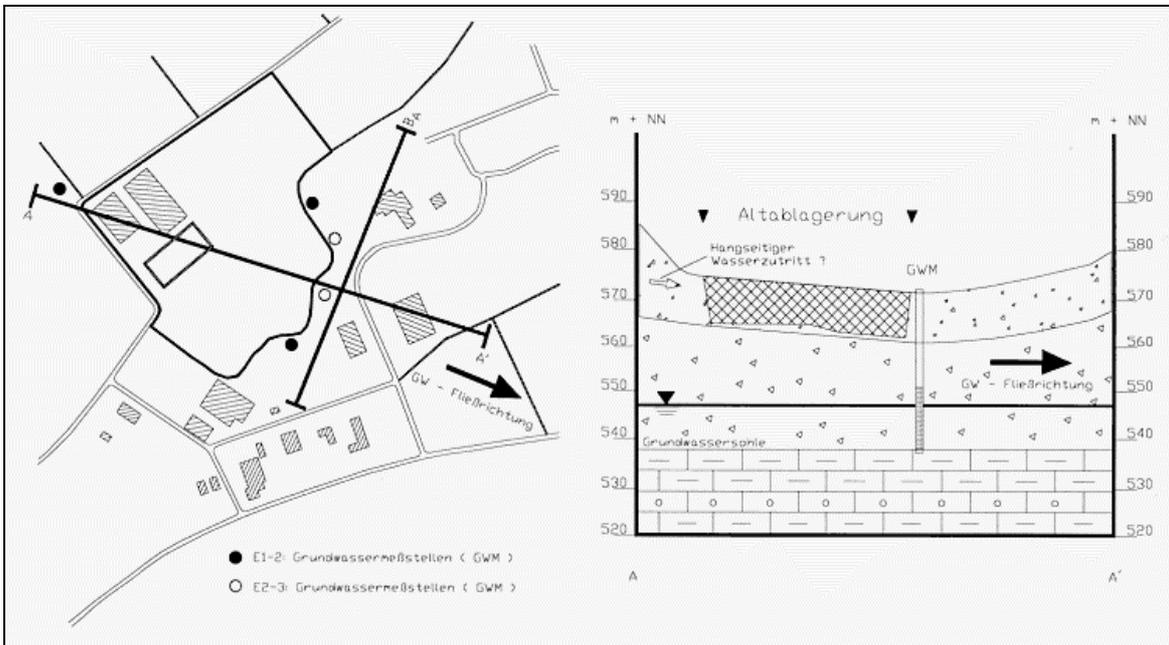
Gefahren-/Schadensherderkundung:

Luftbildauswertung, Gaspfad, Geoelektrik

Schadstoffe

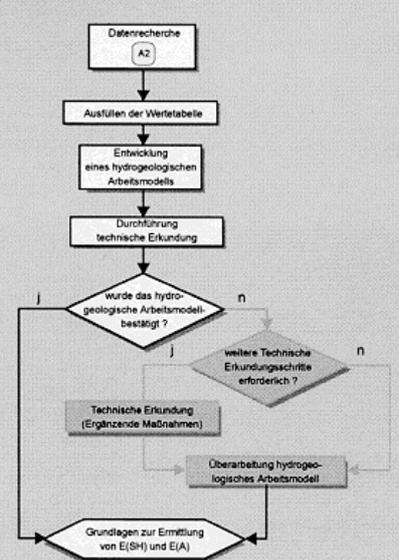
Flächige Belastung durch CKW.

- Bodenluft max. $c = 150 \text{ mg/m}^3$
- Grundwasser max. $c_A = 720 \text{ } \mu\text{g/l}$



2. Hydrogeologisches Arbeitsmodell

Tabelle Hydrogeologische Parameter										Standard
	BN1/Planung E=2 (vermutet)			BN2 (orientierend)			BN3 (abgesichert)			
	min	mittel	max	min	mittel	max	min	mittel	max	
Geometrie										
A_{Bauw} [m ²]										
B_{w} [m]										
h_{Bauw} [m]										
A_{w} [m ²]	$B_{\text{w}} \cdot h_{\text{Bauw}}$									
h_{Bauw} [m]										
A_{Bauw} [m ²]	$B_{\text{w}} \cdot h_{\text{Bauw}}$									
Hydraulik										
Fließrichtung [°]										
T [m/s]										
k_0 [m/s]										
l [-]										
m [-]										
a [m]	Der Berechnungswert ist anzugeben									
Q_{w} [m ³ /s]										
h_{w} [m]										
Volumenströme										
Q_{w} [m ³ /d]	$k_0 \cdot A_{\text{w}} \cdot l \cdot 86400$									
Q_{Bauw} [m ³ /d]	$A_{\text{Bauw}} \cdot Q_{\text{GN}} \cdot 86400$									
Q_{GW} [m ³ /d]	$k_0 \cdot A_{\text{Bauw}} \cdot l \cdot 86400$									
Q_{SH} [m ³ /d]	$= Q_{\text{w}} \cdot \text{bzw. } Q_{\text{Bauw}} + Q_{\text{GW}}$									
Q_{A} [m ³ /d]	$= Q_{\text{w}} - Q_{\text{SH}}$									
Q_{GN} [mm/a]										
Emission										
c_{w} [µg/l]										
c_{SH} [µg/l]										
c_{A} [µg/l]	$Q_{\text{w}} \cdot c_{\text{w}} - 10 \cdot \text{bzw. } Q_{\text{SH}} \cdot c_{\text{SH}} - 10$									
$E(\text{SH})$ [g/d]										
$E(\text{A})$ [g/d]	$(Q_{\text{A}} \cdot c_{\text{A}} - Q_{\text{A}} \cdot c_{\text{w}}) \cdot 10$									



Diagramm

Orientierende Erkundung

Zur Erarbeitung eines hydrogeologischen Arbeitsmodelles wurden die topographische Karte TK 25 und die geologische Karte GK 25 ausgewertet.

Hydrogeologisches Arbeitsmodell

Die gut durchlässigen Reißvorstoßschotter bilden im Bereich der Altablagerung den Grundwasserleiter. Die Basis bilden die schlecht durchlässigen Sandsteine und Mergel der Oberen Süßwassermolasse. Die Quartärablagerungen liegen dabei diskordant auf den Tertiärsedimenten. Die ehemalige tertiäre Landoberfläche zeigt ein z.T. starkes Relief, so daß mit bevorzugten Fließrichtungen in Rinnenstrukturen gerechnet werden muß. Durch die Ablagerungsbedingungen der Vorstoßschotter und durch die Zementation zu Nagelfluhbänken kommt es zu Heterogenitäten.

Die Grundwasserfließrichtung ergibt sich aus der Lage zum Vorfluter, sie beträgt rd. 120°. Schadstoffgehalte in einer Trinkwasserfassung, die Quellaustritte in der Nähe des Vorfluters erfaßt, lassen eine hydraulische Verbindung mit der Altablagerung vermuten.

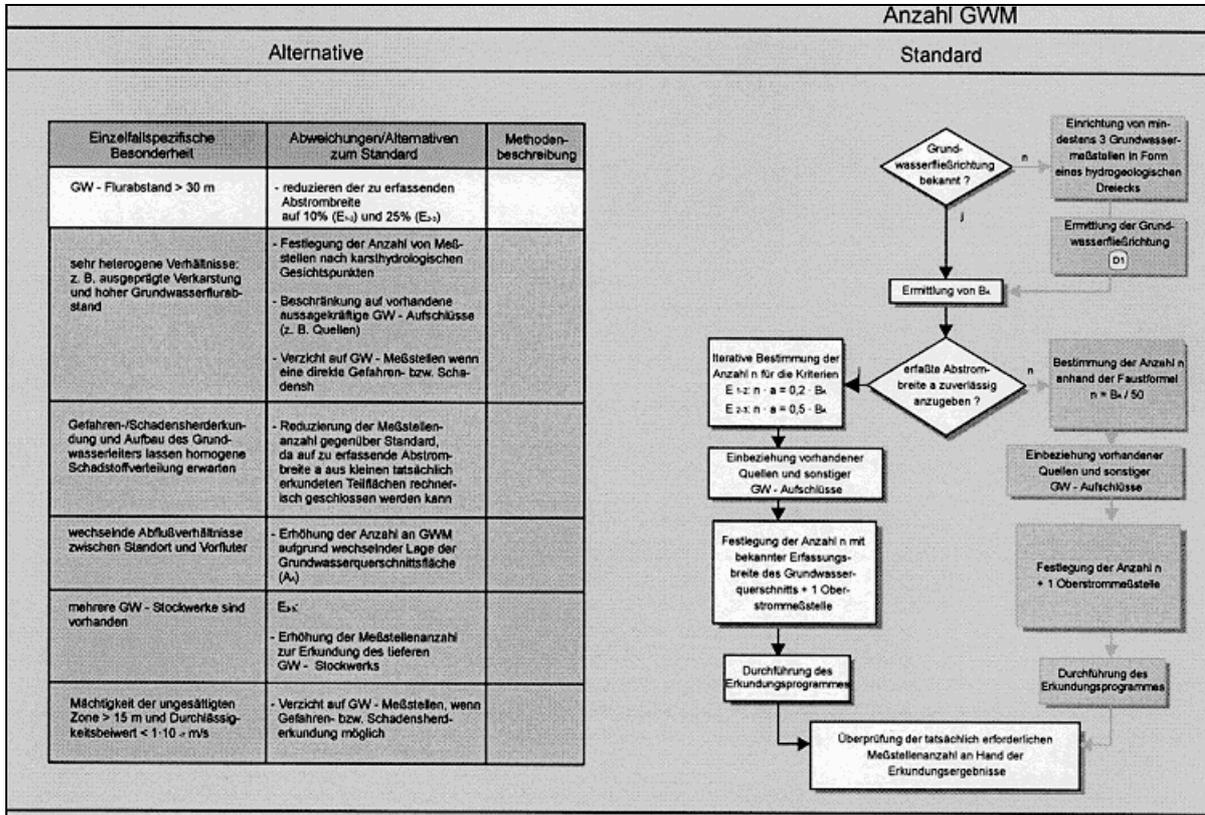
Der Grundwasserflurabstand beträgt im Schnitt 30 m.

Bei der direkten Emissionserkundung wurde kein Sickerwasser angetroffen.

Nähere Erkundung

Das Arbeitsmodell zur Planung von E₁₋₂ wurde durch die Ergebnisse der orientierenden Erkundung bestätigt.

3. Anzahl GWM



Diagramm

Orientierende Erkundung

Die Grundwasserfließrichtung ist aus der Datenrecherche zur Erstellung eines hydrogeologischen Arbeitsmodelles hinreichend genau bekannt. Die Größe B_A ergibt sich aus der Annahme einer Emission über die gesamte Breite der Ablagerung zu $B_A = 270$ m.

Aufgrund des verhältnismäßig großen Flurabstandes von ca. 30 m wurde zur Kostenminimierung die notwendige Erfassungsbreite auf $0,1 B_A = 27$ m reduziert.

Erforderlich wird unter Berücksichtigung der Bedingung $a \leq 20$ m eine Mindestmeßstellenanzahl von 2 mit einer Erfassungsbreite von je $a = 14$ m:

$$n = \frac{0,1 B_A}{a} = \frac{27 \text{ m}}{14 \text{ m}} \approx 2$$

Bei einer hydrogeologisch sinnvollen Pumprate von $Q = 0,005 \text{ m}^3/\text{s}$ und einer gewünschten Erfassungsbreite der Meßstelle von $a = 14$ m ergibt sich anhand der Formel nach BEAR & JACOBS eine Pumpdauer von $(x = 0 \text{ m}, y = 7 \text{ m})$:

$$t_{PV} = \left(\frac{0,2 \cdot 0,005 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot 86400}{2 \cdot \pi \cdot (0,864 \text{ m d}^{-1})^2 \cdot 10 \text{ m}} \cdot \left(-\ln \left(\cos \left(7 \text{ m} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 10 \text{ m} \cdot 0,864 \text{ m d}^{-1}}{0,005 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot 86400} \right) \right) \right) \right) \cdot 24$$

= 20 h

Zur Absicherung der Grundwasserfließrichtung und des hydraulischen Gradienten wurde zusätzlich eine GWM im Zustrom eingerichtet.

Nähere Erkundung

Durch die vorausgegangene Grundwassererkundung in E₁₋₂ konnten keine Belastungsschwerpunkte im Abstrom festgestellt werden, so daß die Abstrombreite gleich bleibt.

Für die Erfassung von $0,25 B_A = 67,5 \text{ m}$ sind unter Einhaltung des Kriteriums $a \leq 20 \text{ m}$ und einer gegenüber der orientierenden Erkundung geringfügig größer gewählten Erfassungsbreite der Einzelmeßstelle von $a = 17 \text{ m}$ mindestens zwei zusätzliche GWM notwendig:

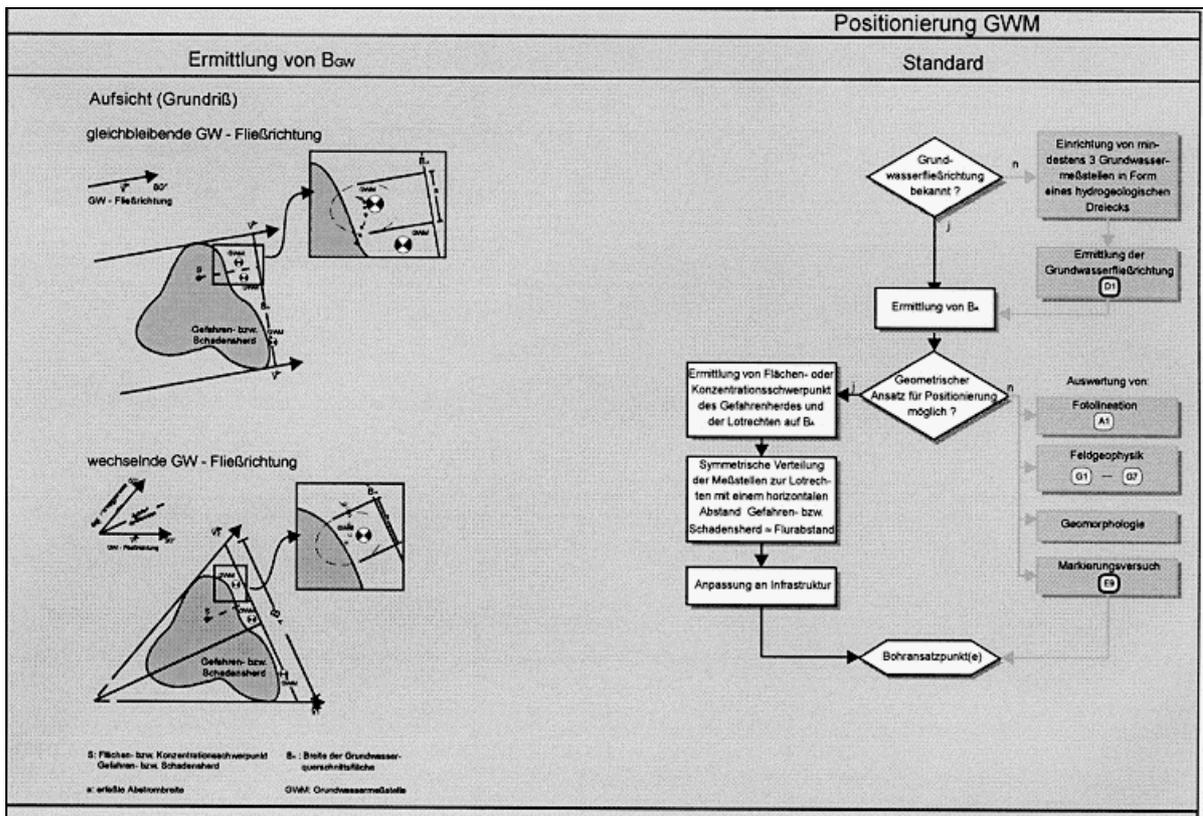
$$n = \frac{0,25 B_A}{a} = \frac{67,5 \text{ m}}{17 \text{ m}} \approx 4$$

Bei einer Pumprate von $Q_{pv} = 0,005 \text{ m}^3/\text{s}$ ergibt sich nach BEAR & JACOBS eine Pumpdauer von ($x = 0 \text{ m}$; $y = 8,5 \text{ m}$):

$$t_{PV} = \left(\frac{0,2 \cdot 0,005 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot 86400}{2 \cdot \pi \cdot (0,055 \text{ m d}^{-1})^2 \cdot 10 \text{ m}} \cdot \left(-\ln \left(\cos \left(8,5 \text{ m} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 10 \text{ m} \cdot 0,055 \text{ m d}^{-1}}{0,005 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot 86400} \right) \right) \right) \right) \cdot 24$$

= 25 h

4. Positionierung GWM



Diagramm

Orientierende Erkundung

Die Heterogenitäten des quartären GWL sind derzeit unbekannt.

Mit der vereinfachenden Annahme einer homogenen Schadstoffausbreitung über die gesamte Abstrombreite, wurden die zwei GWM symmetrisch im Abstrom verteilt.

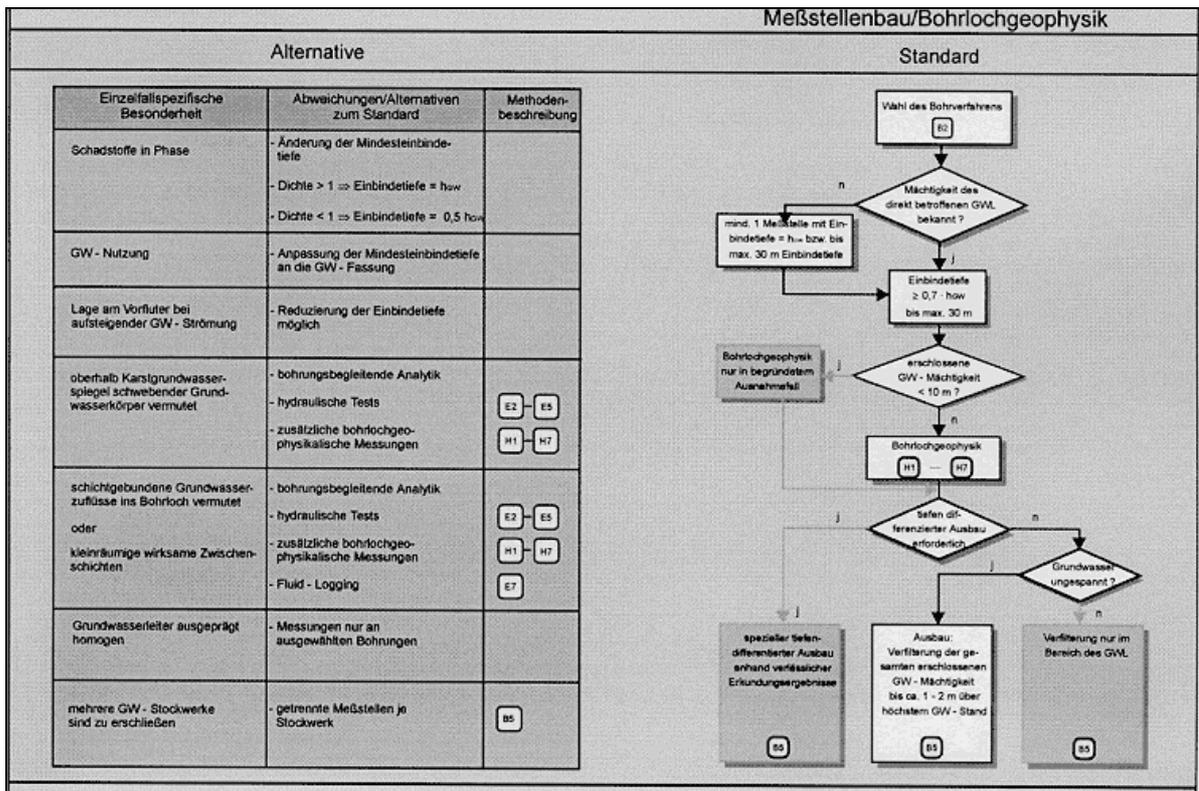
Nähere Erkundung

Eine Reduzierung der Abstrombreite durch die vorausgegangenen Untersuchungsergebnisse war nicht möglich.

Um Aussagen über mögliche glaziale Rinnenstrukturen zu erhalten, wurden geophysikalische Geländemessungen (Geoelektrik) durchgeführt. Durch die Untersuchungen ergaben sich keine verwertbaren Hinweise für die Positionierung von GWM.

Analog zu E_{1-2} wurden die zwei weiteren Meßstellen nach rein geometrischen Gesichtspunkten positioniert.

5. Meßstellenbau/Bohrlochgeophysik



Diagramm

Orientierende Erkundung

Die Grundwassermächtigkeit ist mit durchschnittlich 10 m relativ gering.

Die Bohrungen wurden als vollkommene GWM ausgebaut.

Zur Kontrolle der Vertikalgliederung wurden die Bohrungen mittels Bohrlochgeophysik (Gamma-, FE-, Flow-, Salinitäts-, Temperatur-Log) untersucht.

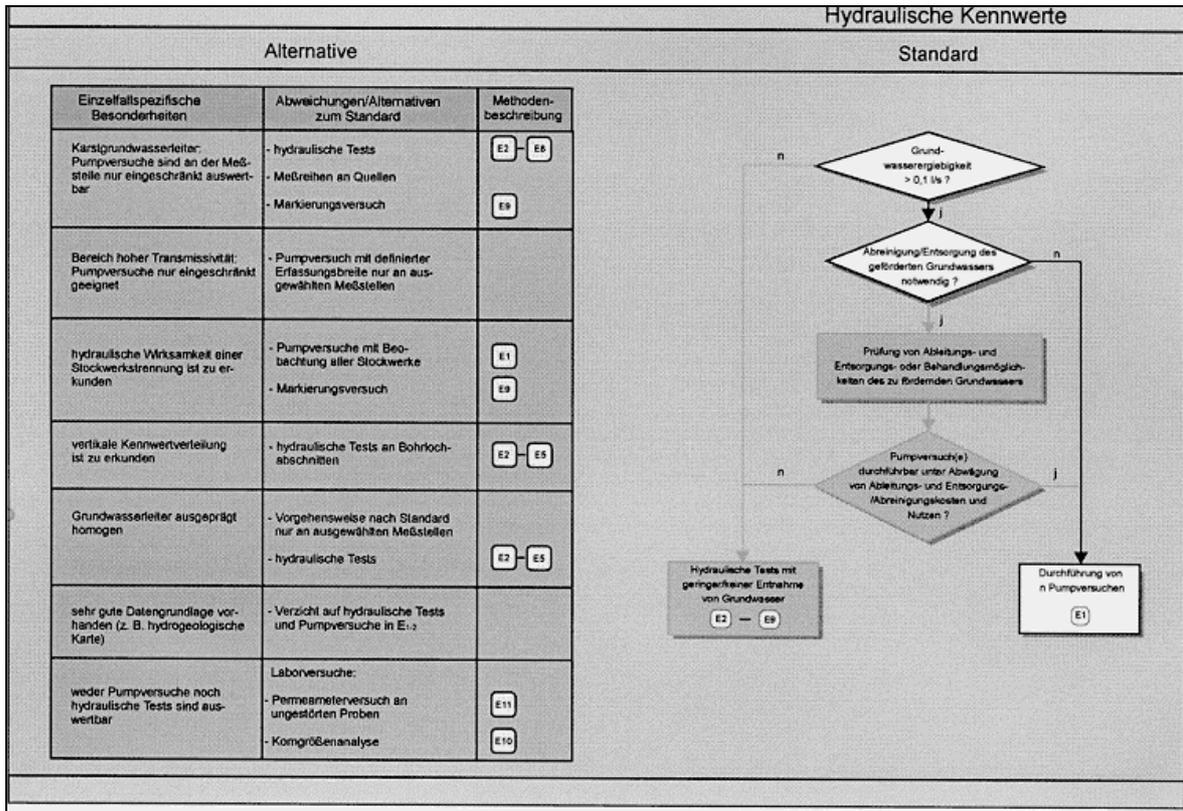
Aufgrund der ungespannten Grundwasserverhältnisse und dem Ziel einer Gewinnung tiefengemittelter Grundwasserproben, wurden die Bohrungen bis 1 m über den höchsten Grundwasserstand durchgängig verfiltrert.

Ein tiefendifferenzierter Ausbau ist aufgrund der Bohrprofile und der geophysikalischen Bohrlochmessungen nicht notwendig.

Nähere Erkundung

Meßstellenbau und Bohrlochgeophysik entsprechen der Vorgehensweise unter E₁₋₂.

6. Hydraulische Kennwerte



Diagramm

Orientierende Erkundung

Zur Ermittlung der Transmissivität wurden in den zwei abstromigen GWM Kurzpumpversuche (3 h-Absenkung, 1 h-Wiederanstieg) durchgeführt.

Eine Abreinigung wurde aufgrund der geringen Fördermenge und der erwarteten starken Verdünnung der Schadstoffe nicht vorgesehen.

Die Ermittlung der Transmissivität erfolgte anhand des Wiederanstiegsverfahrens nach THEIS.

Transmissivitäten

Meßstelle 2	$8,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
Meßstelle 3	$2,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

Nähere Erkundung

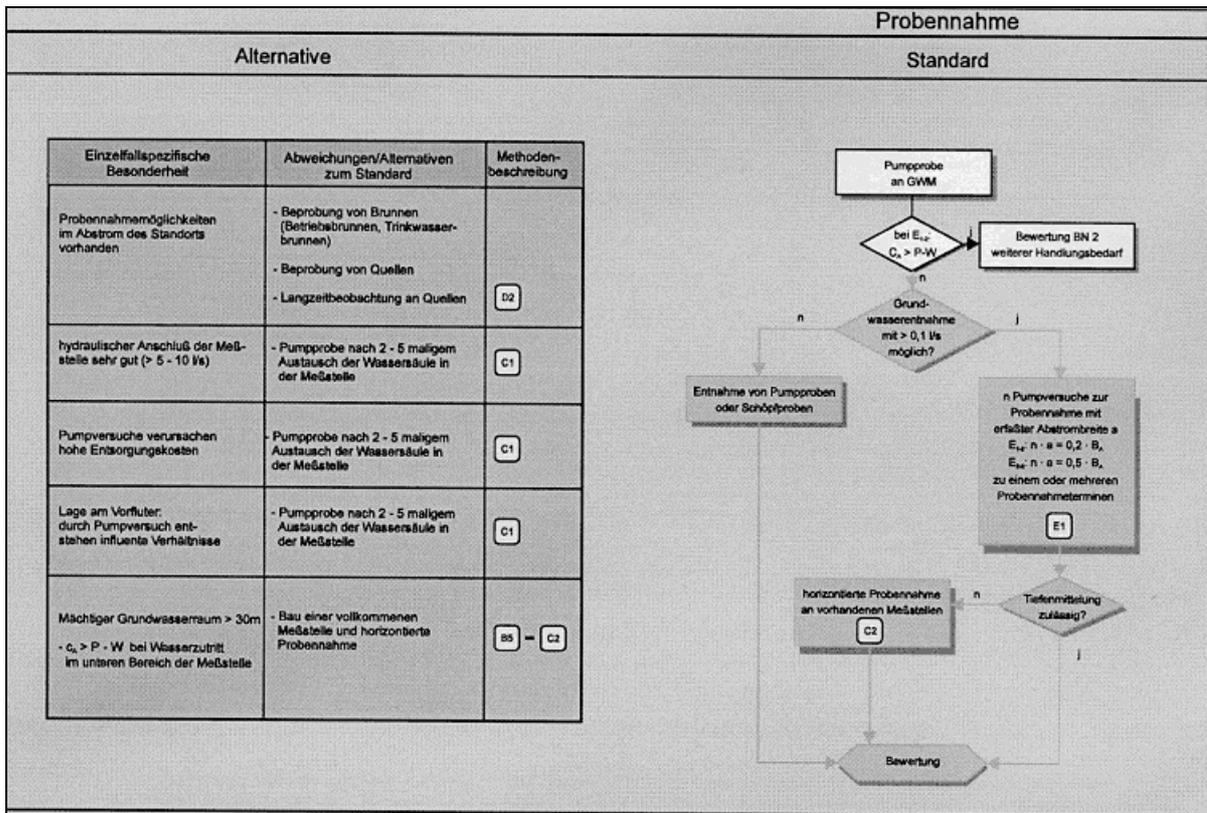
Zur Erfassung von $0,25 B_A$ wurden vier Pumpversuche zur Probennahme durchgeführt. Gleichzeitig wurden die Wasserstände in den umliegenden GWM mitbeobachtet.

Anhand der Zeit-Absenkungskurven konnte eine Auswertung der Transmissivität nach dem Gerad-linienverfahren von COOPER & JACOB durchgeführt werden.

Transmissivitäten

Meßstelle 2	$1,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
Meßstelle 3	$1,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
Meßstelle 4	$9,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
Meßstelle 5	$2,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

7. Probennahme



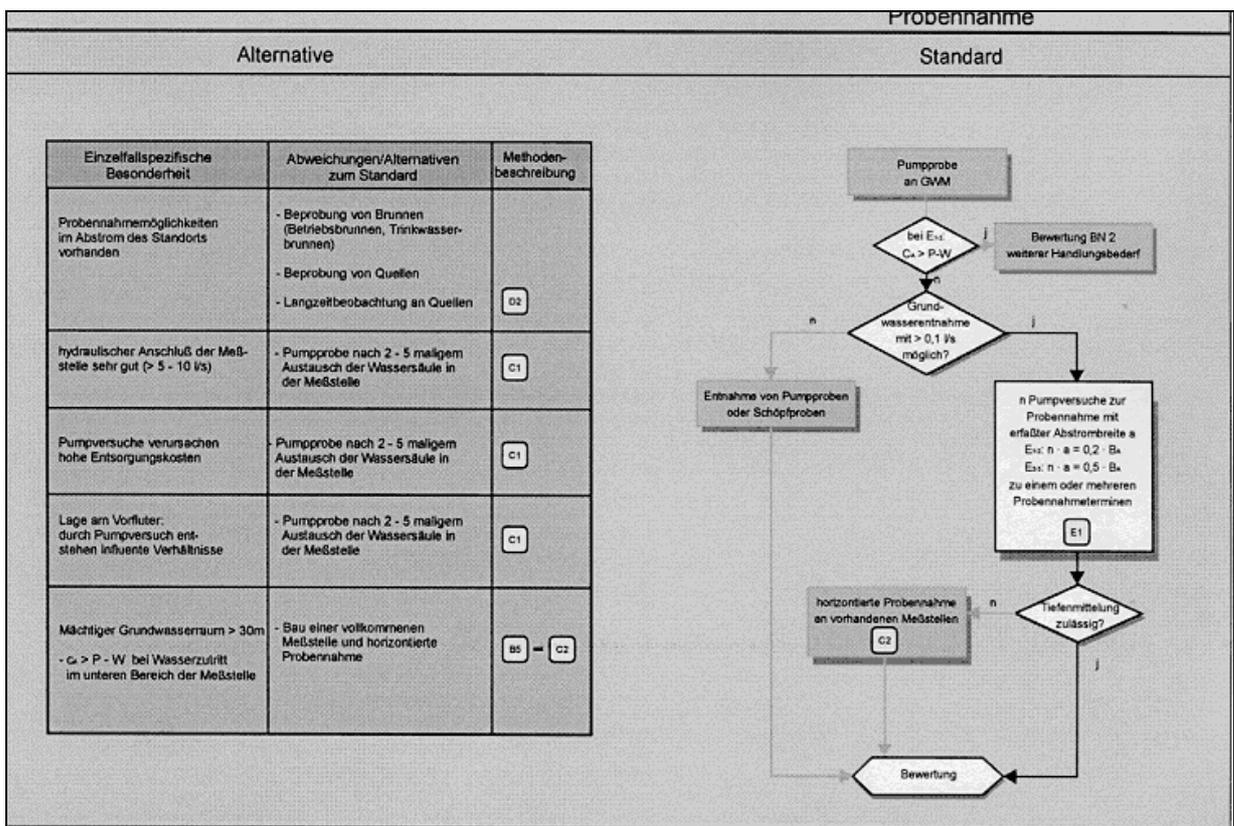
Diagramm

Orientierende Erkundung

Aus sämtlichen GWM erfolgte zunächst die Entnahme einer Pumpprobe. Die Proben wurden nach Erreichen der Meßwertkonstanz der vor Ort gemessenen Parameter pH, elektrische Leitfähigkeit, Temperatur entnommen (Pumpdauer ca. 20 min).

Durch die festgestellte Prüfwert-Überschreitung (vgl. 8. Parameterumfang) wurde auf Pumpversuche zur Erfassung von 0,1 B_A im Rahmen der orientierenden Erkundung verzichtet.

Aus der P-W-Wert-Überschreitung im Abstrom leitet sich ein weiterer Handlungsbedarf E₂₋₃ ab.



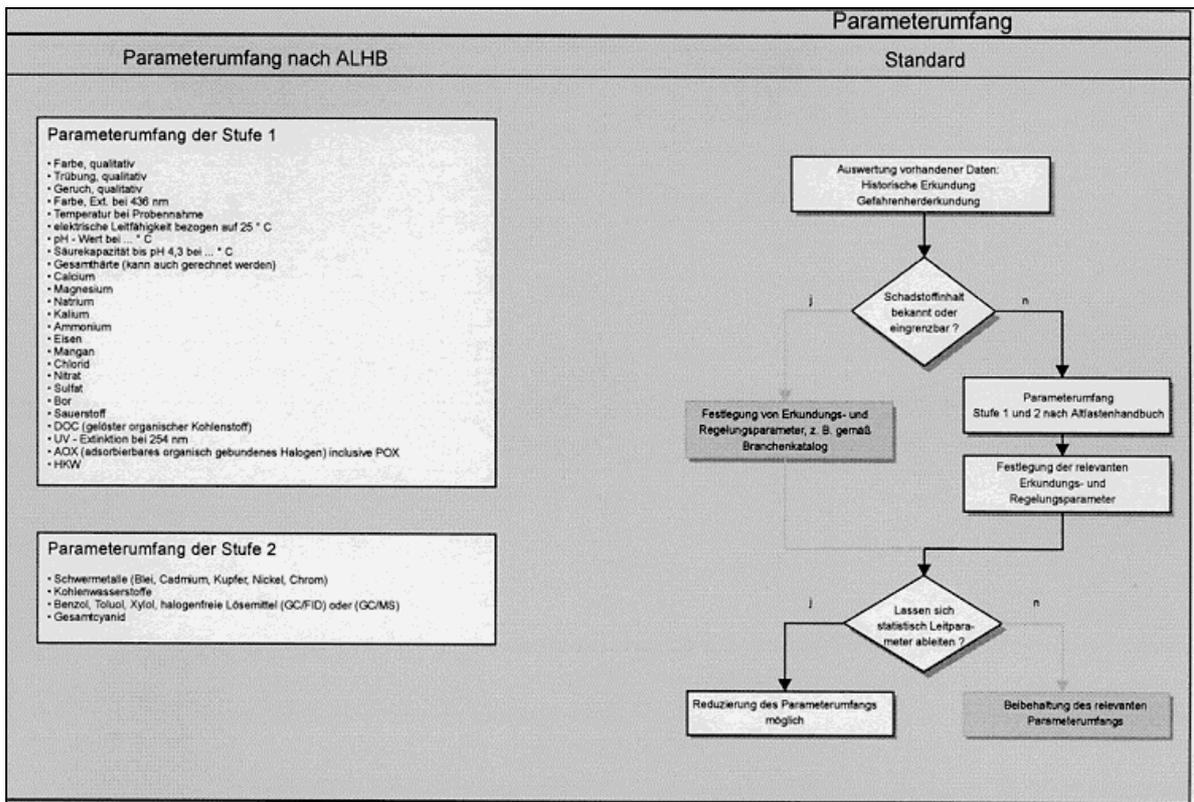
Diagramm

Nähere Erkundung

Zur Erfassung von 0,25 B_A wurden an allen abstromigen GWM Pumpversuche zur Probenahme durchgeführt.

Die Probenahme erfolgte jeweils am Anfang und am Ende des 25-stündigen Pumpversuches.

8. Parameterumfang



Diagramm

Orientierende Erkundung

Auf Grundlage der historischen Erkundung und der vorausgegangenen Schadensherderkundung konnte der Parameterumfang nicht eingengt werden.

Um einen Überblick über das gesamte Schadstoffspektrum zu erhalten, wurden die Parameter der Parameterstufen 1 + 2 gemäß ALHB analysiert.

In der abstromigen Grundwassermeßstelle zeigte sich neben einer Belastung durch deponie-spezifische Parameter (NH_4^+ , B, SO_4 etc.) eine Überschreitung des P-W-Wertes durch CKW-Gehalte bis max. 590 $\mu\text{g/l}$.

Tiefengemittelte Probennahme c_A:**ΣCKW P-W: 10 µg/l**

Meßstelle 1	< Nachweisgrenze
Meßstelle 2	590 µg/l
Meßstelle 3	398 µg/l

Nähere Erkundung

Aufgrund der Ergebnisse aus E₁₋₂ wurde der Parameterumfang in E₂₋₃ auf Vor-Ort-Parameter und CKW reduziert.

In den mittels Pumpversuchen beprobten Meßstellen wurden folgende Schadstoffkonzentrationen nachgewiesen:

Tiefengemittelte Probennahme c_A:**ΣCKW P-W: 10 µg/l**

	Anfang	Ende
Meßstelle 1	< Nachweisgrenze	---
Meßstelle 2	720µg/l	312µg/l
Meßstelle 3	63µg/l	125µg/l
Meßstelle 4	590µg/l	398µg/l
Meßstelle 5	298µg/l	130µg/l

9. Emissionsermittlung über Grundwassererkundung und Plausibilitätskontrolle

Orientierende Erkundung

Emissionsermittlung:

Die Emission E(A) für den Schadstoff CKW berechnet sich für die Szenarien min/mittel/max anhand der Werte aus der Tabelle "11. Hydrogeologische Parameter".

Emissionen E(A):

Σ CKW E_{max}-W: 20 g/d

	min	mittel	max
E(A)	31 g/d	74 g/d	132 g/d

Rückrechnung auf c_{SH}:

Die Schadstoffkonzentration c_{SH} ergibt sich aus:

$$c_{SH} = E(A) / Q_{SH} \cdot 10^{-3}$$

Q_{SH} errechnet sich in diesem Fall über die Fläche des Schadensherdes A_{SiWa} und die Grundwasserneubildung GWN. Die Ablagerung liegt nicht im gesättigten Bereich.

Die Berechnung ergibt folgende min/mittel/max Werte für c_{SH} [µg/l]:

Eluatkonzentration c_{SH}:

Σ CKW P-W: 10 µg/l

	min	mittel	max
c _{SH}	1.476 µg/l	2.741 µg/l	3.882 µg/l

Plausibilitätskontrolle:

Eine Plausibilitätskontrolle durch einen Vergleich der Emission E(SH) und E(A) ist nicht möglich, da die tatsächlichen Konzentrationen des Eluates c_{SH} durch Messungen im Schadensherd nicht bekannt sind.

Zur Berechnung des Sickerwasseranfalls wurde somit lediglich die GWN herangezogen. Sollte allerdings, wie vermutet, von der Hangseite Schichtwasser zum Müllkörper zutreten, so dürfte die Sickerwassermenge Q_{SiWa} deutlicher höher liegen und c_{SH} dadurch niedriger ausfallen.

Nähere Erkundung

Emissionsermittlung:

Mit Ausnahme der leicht veränderten Transmissivitäten und des Schwankungsbereiches für h_{GW} von 10 - 14 m, erfolgt die Berechnung der E(A)-Werte analog zu E_{1-2} .

Emissionen E(A):

$\Sigma CKW E_{max}$ -W: 20 g/d

	min	mittel	max	plausibel
E(A)	5,6 g/d	48 g/d	141 g/d	43 - 58 g/d

Rückrechnung auf c_{SH} :

Die Rückrechnung auf die Konzentration im Eluat c_{SH} erfolgt analog E_{1-2} . Q_{SH} entspricht somit dem Wert von E_{1-2} , da A_{SiWa} und GWN gleich geblieben sind.

Eluatkonzentration c_{SH} :

$\Sigma CKW P$ -W: 10 $\mu\text{g/l}$

	min	mittel	max	plausibel
c_{SH}	267 $\mu\text{g/l}$	1.778 $\mu\text{g/l}$	4.147 $\mu\text{g/l}$	1.593 - 2.148 $\mu\text{g/l}$

Plausibilitätskontrolle:

Die Plausibilitätskontrolle erfolgt mangels einer direkten Emissionserkundung durch einen Vergleich der beiden Grundwassererkundungen. Die mittleren Eluatkonzentrationen und Emissionen zeigen eine vergleichsweise gute Übereinstimmung.

Durch die Ergebnisse aus E_{2-3} ergab sich eine Bestätigung der Werte aus E_{1-2} .

Für die Ermittlung der plausiblen Emissionen wurde neben mittleren hydraulischen und geometrischen Werten für c_A eine Schwankungsbreite von $c_A = 300 - 400 \mu\text{g/l}$ angenommen.

10. Bewertung

Orientierende Erkundung

Aus der Schadstoffkonzentration im Grundwasser c_A und der rückgerechneten Konzentration im Sickerwasser c_{SH} ergibt sich ein weiterer Handlungsbedarf für eine nähere Erkundung E_{2-3} .

Der Prüfwert P-W für CKW wird dabei sowohl im Grundwasser als auch in den berechneten potentiellen Konzentrationen des Sickerwassers bereits im günstigsten Fall um ein Vielfaches überschritten.

Weitere Vorgehensweise:

Die Anzahl der GWM im Abstrom der Altablagerung muß zur Erfassung von $0,25 B_A$ erhöht werden.

Nähere Erkundung

Die zurückgerechneten Werte für die Schadstoffkonzentration c_{SH} überschreiten den Prüfwert für CKW deutlich. Aus den ermittelten Werten ergibt sich zusammen mit einer abgesicherten Emission ein weiterer Handlungsbedarf für eine eingehende Erkundung E_{3-4} .

11. Hydrogeologische Parameter

	BN1 / Planung E ₁₋₂ (vermutet)			BN2 (orientierend)			BN3 (abgesichert)				
	min	mittel	max	min	mittel	max	min	mittel	max	plausibel	
Geometrie											
A _{SiWa} [m ²]		50.000			50.000			50.000		50.000	
B _A [m]		270			270			270		270	
h _{GW} [m]		10			10		10	11	14	11	
A _A [m ²]	B _A · h _{GW}	2.700			2.700		2.700	2.970	3.780	2.970	
h _{KGW} [m]											
A _{KGW} [m ²]	B _A · h _{KGW}										
Hydraulik											
Fließrichtung [°]		110	120	130	110	120	130	110	120	130	120
T [m ² /s]		1 · 10 ⁻³	5 · 10 ⁻²	1 · 10 ⁻¹	8,2 · 10 ⁻⁴	1,6 · 10 ⁻³	2,4 · 10 ⁻³	9,5 · 10 ⁻⁴	1,5 · 10 ⁻³	2,1 · 10 ⁻³	1,5 · 10 ⁻³
k _f [m/s]		1 · 10 ⁻⁴	5 · 10 ⁻³	1 · 10 ⁻²	8,2 · 10 ⁻⁵	1,6 · 10 ⁻⁴	2,4 · 10 ⁻⁴	9,5 · 10 ⁻⁵	1,4 · 10 ⁻⁴	1,5 · 10 ⁻⁴	1,4 · 10 ⁻⁴
I [-]			0,002			0,004			0,004		0,004
n _f [-]			0,2			0,2			0,2		0,2
a [m]	BEAR & JACOBS		14			17			17		
Q _{PV} [m ³ /s]			0,005			0,005			0,005		
t _{PV} [h]			20			25			25		
Volumenströme											
Q _A [m ³ /d]	k _f · A _A · I · 86400	47	2.333	4.666	77	149	224	89	144	196	144
Q _{SiWa} [m ³ /d]	$\frac{A_{SiWa} \cdot GWN}{365000}$	21	27	34	21	27	34	21	27	34	27
Q _{KGW} [m ³ /d]	k _f · A _{KGW} · I · 86400										
Q _{SH} [m ³ /d]	= Q _{SiWa}	21	27	34	21	27	34	21	27	34	27
Q _{ZT} [m ³ /d]	= Q _A - Q _{SH}	26	2.306	4.632	56	122	190	68	117	162	117
GWN [mm/a]		150	200	250	150	200	250	150	200	250	200
Emission											
c _Z [µg/l]						nn			nn		nn
c _{SH} [µg/l]	$c_{SH} = \frac{E(A)}{Q_{SiWa} \cdot 10^{-3}}$				1.476	2.741	3.882	267	1.778	4.147	1.593 - 2.148
c _A [µg/l]					398	494	590	63	330	720	300-400
E(SH) [g/d]											
E(A) [g/d]	(Q _A · c _A - Q _{ZT} · c _Z) · 10 ⁻³				31	74	132	5,6	48	141	43 - 58

Fallbeispiel 4: Schichtig gegliederter Grundwasserleiter

Ton-/ Mergelsteine des Gipskeupers

1. Standortbestimmung

Aus der historischen Erkundung der ehemaligen Hausmülldeponie einer ca. 3.000 EW umfassenden, überwiegend ländlich geprägten Gemeinde sind folgende Eckdaten bekannt:

Ablagerungsgut:

Überwiegend Hausmüll und hausmüllähnliche Stoffe, Bauschutt, Erdaushub, Fäkalschlämme, Gewerbeabfälle (Autowracks, Metall- und Holzabfälle, Farben und Lacke, Klebstoffabfälle).

Ablagerungsart:

Der Müll wurde an einer Böschung abgekippt. Die Fäkalschlämme wurden in einer Grube im Müllkörper abgelagert.

Fläche: 15.000 m²

Volumen: 150.000m³

Betriebszeitraum: 1920 - 1989

Ehemalige Nutzung: Brachland

Geologie:

Am Standort folgen unter einer 1 - 2 m mächtigen Löß-/Lößlehm-Auflage die Dunkelroten Mergel und Grundgipsschichten (ca. 35 m) des Mittleren Keupers, bestehend aus einer bunten Abfolge von Ton-/ Tonmergelsteinen mit gelegentlichen Gipseinschaltungen. Der Mittlere Keuper wird im Liegenden durch den Grenzdolomit abgeschlossen, der regional einen bedeutenden Grundwasserleiter darstellt und der Trinkwassergewinnung dient.

Nutzungswürdigkeit des Grundwassers:

Das Grundwasservorkommen ist im Sinne der VwV als nutzungswürdig einzustufen. Die Altablagerung liegt nicht im Trinkwasserschutzgebiet.

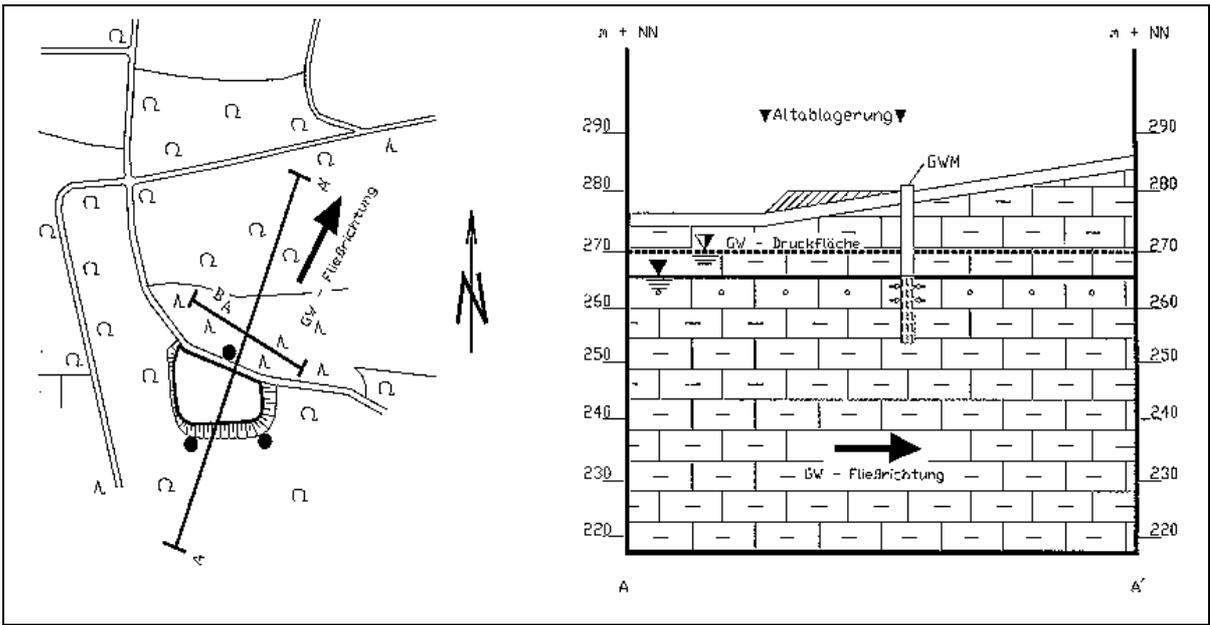
Gefahren-/Schadensherderkundung:

Gaspfad/Bodenluft

Schadstoffe:

Flächenhafte Belastung der Bodenluft durch BTXE-Aromaten ohne Belastungsschwerpunkte.

- Bodenluft max. $c = 50 \text{ mg/m}^3$
- Grundwasser $c_A = \text{nn}$



2. Hydrogeologisches Arbeitsmodell

Tabelle Hydrogeologische Parameter										
	BN1/Planung E-1 (vermutet)			BN2 (orientierend)			BN3 (abgesichert)			Anmerkungen
	min	mittel	max	min	mittel	max	min	mittel	max	
Geometrie										
A _{akt} [m ²]										
B _x [m]										
h ₀ [m]										
A _v [m ²]	B _x · h ₀									
h ₀ [m]										
A _{akt} [m ²]	B _x · h _{akt}									
Hydraulik										
Fließrichtung [°]										
T [m/s]										
k _r [m/s]										
I [-]										
n [-]										
a [m]	Der Berechnungsansatz ist anzugeben									
Q _{ex} [m ³ /s]										
t _w [h]										
Volumenströme										
Q _k [m ³ /d]	k _r · A _v · I · 86400									
Q _{akt} [m ³ /d]	A _{akt} · GWN 36500									
Q _{ex} [m ³ /d]	k _r · A _{akt} · I · 86400									
Q _{gr} [m ³ /d]	= Q _{ex} bzw. Q _{ex} + Q _{akt}									
Q _{gr} [m ³ /d]	= Q _k + Q _{gr}									
GWN [mm/a]										
Emission										
c ₀ [µg/l]										
c ₁₀ [µg/l]										
c ₂₀ [µg/l]										
E(SH) [g/d]	Q _{ex} · c ₀ · 10 ⁻³ bzw. Q _{gr} · c ₀ · 10 ⁻³									
E(A) [g/d]	(Q _{ex} · c ₀ + Q _{gr} · c ₂₀) · 10 ⁻³									

Hydrogeologisches Arbeitsmodell

Standard

```

graph TD
    A2((A2)) --> B[Ausfüllen der Wertetabelle]
    B --> C[Entwicklung eines hydrogeologischen Arbeitsmodells]
    C --> D[Durchführung technische Erkundung]
    D --> E{wurde das hydrogeologische Arbeitsmodell bestätigt?}
    E -- j --> F[Grundlagen zur Ermittlung von E(SH) und E(A)]
    E -- n --> G{weitere Technische Erkundungsschritte erforderlich?}
    G -- j --> H[Technische Erkundung Ergänzende Maßnahmen]
    H --> C
    G -- n --> I[Überarbeitung hydrogeologisches Arbeitsmodell]
    I --> C
    
```

Diagramm

Orientierende Erkundung

Als Grundlagen für ein hydrogeologisches Arbeitsmodell wurden die topographische Karte TK 25, die geologische Karte GK 25 sowie Bohrprofile von in der Nähe liegenden Trinkwasserbohrungen aus-gewertet (vgl. 11. Hydrogeologische Parameter).

Hydrogeologisches Arbeitsmodell:

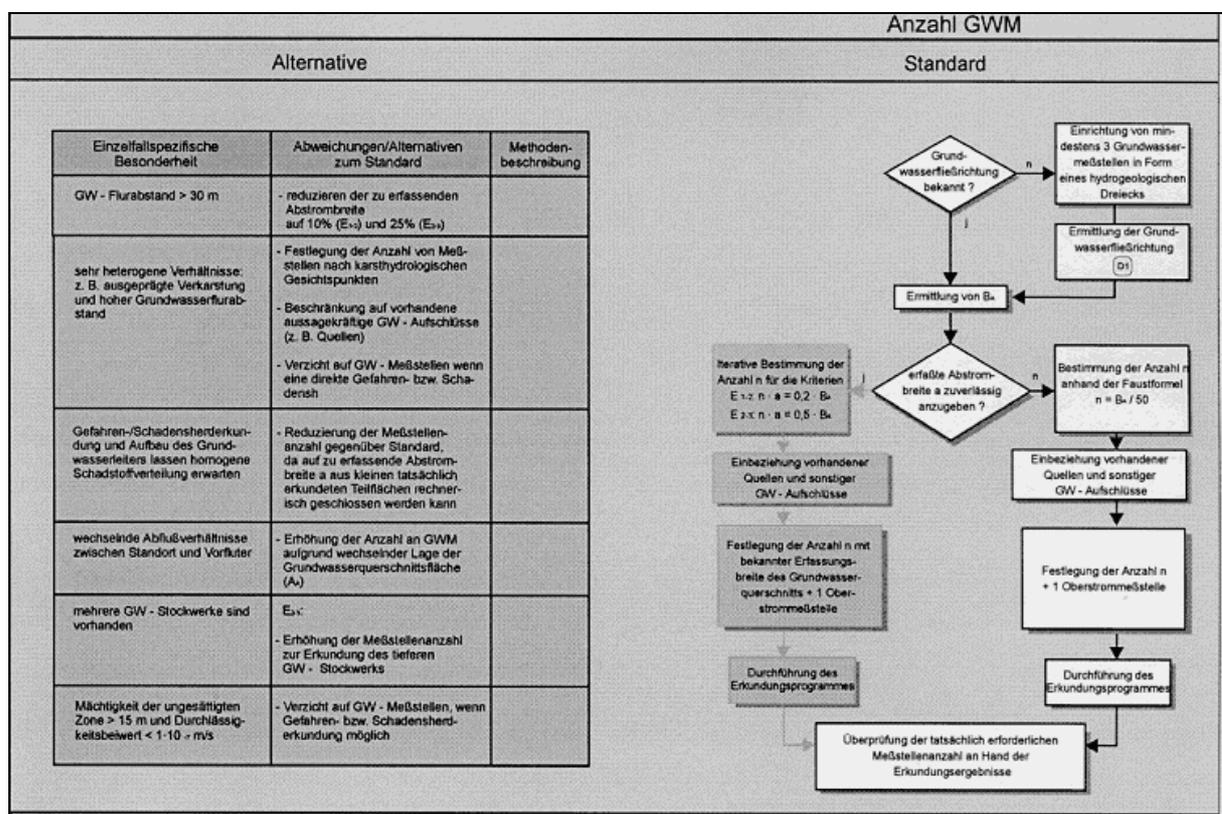
Anhand der unvollständig vorliegenden Daten kann für die hydrogeologische Situation nur ein sehr grobes Modell entwickelt werden.

Eine Grundwasserführung ist für den oberflächennahen Auflockerungsbereich sowie in tieferen Lagen für einzelne Schichten der Tonsteinserien zu erwarten.

Die Höhenlagen von gegebenenfalls mehreren Grundwasserspiegeln sowie die tatsächlichen Grundwasserfließrichtungen sind unbekannt.

Für oberflächennah auftretendes Grundwasser der Auflockerungszone wird eine Fließrichtung ent-sprechend der Morphologie nach Süden, für die tieferen, schichtgebundenen Grundwässer eine Fließrichtung gemäß dem Schichteinfallen mit 1 - 2° nach Norden angenommen.

3. Anzahl GWM



Diagramm

Orientierende Erkundung

Im Hinblick auf die bestehende Unsicherheit über die genaue Grundwasserfließrichtung, wurden zunächst drei GWM in Form eines hydrogeologischen Dreiecks und einer Einbindetiefe in das Grundwasser von 10 m eingerichtet.

Anhand einer Stichtagsmessung konnte die Grundwasserfließrichtung (Nord) und damit die Breite von B_A mit $B_A = 180$ m ermittelt werden.

Die Bestimmung einer zuverlässigen Erfassungsbreite der Einzelmeßstelle war mangels hydraulischer Kennwerte nicht möglich. Die Festlegung der erforderlichen GWM-Anzahl erfolgte deshalb anhand der Faustformel

$$n = \frac{B_A}{50} = \frac{180 \text{ m}}{50 \text{ m}} \approx 4$$

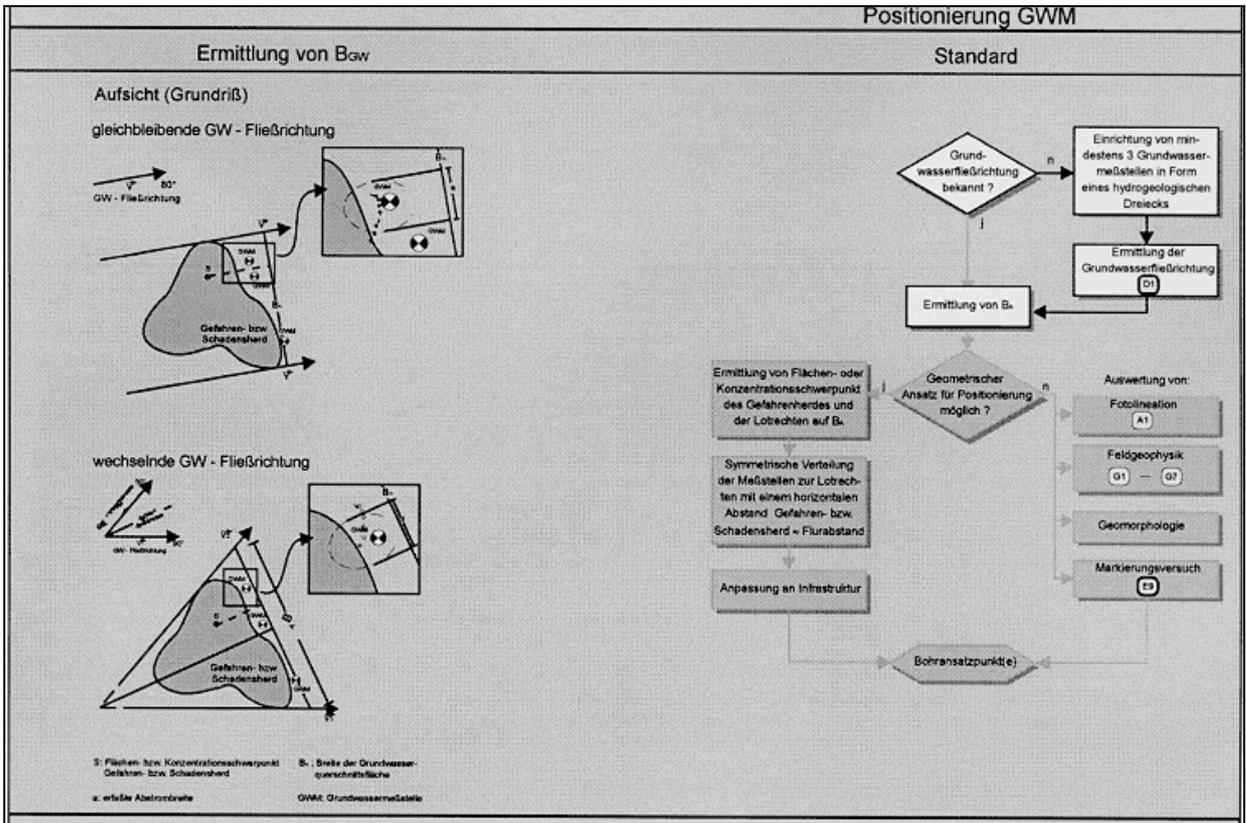
Danach wären zusätzlich zur bestehenden GWM drei weitere GWM im Abstrom erforderlich.

Unter Beachtung der Verhältnismäßigkeit (vgl. 7. Probennahme) wurde nach Abwägung aller Umstände zunächst auf weitere Bohrungen im Rahmen von E_{1-2} verzichtet (Kostenminimierung).

Folgende Gründe wurden für diese Entscheidung herangezogen:

- verhältnismäßig geringe BTXE-Bodenluftkonzentrationen bis max. $c = 50$ mg/m³
- niedrige Durchlässigkeiten der Ton-/Tonmergelsteine verbunden mit hoher Adsorption
- Müll stammt aus einer ländlich geprägten Gemeinde d.h. geringes Schadstoffpotential zu erwarten

4. Positionierung GWM



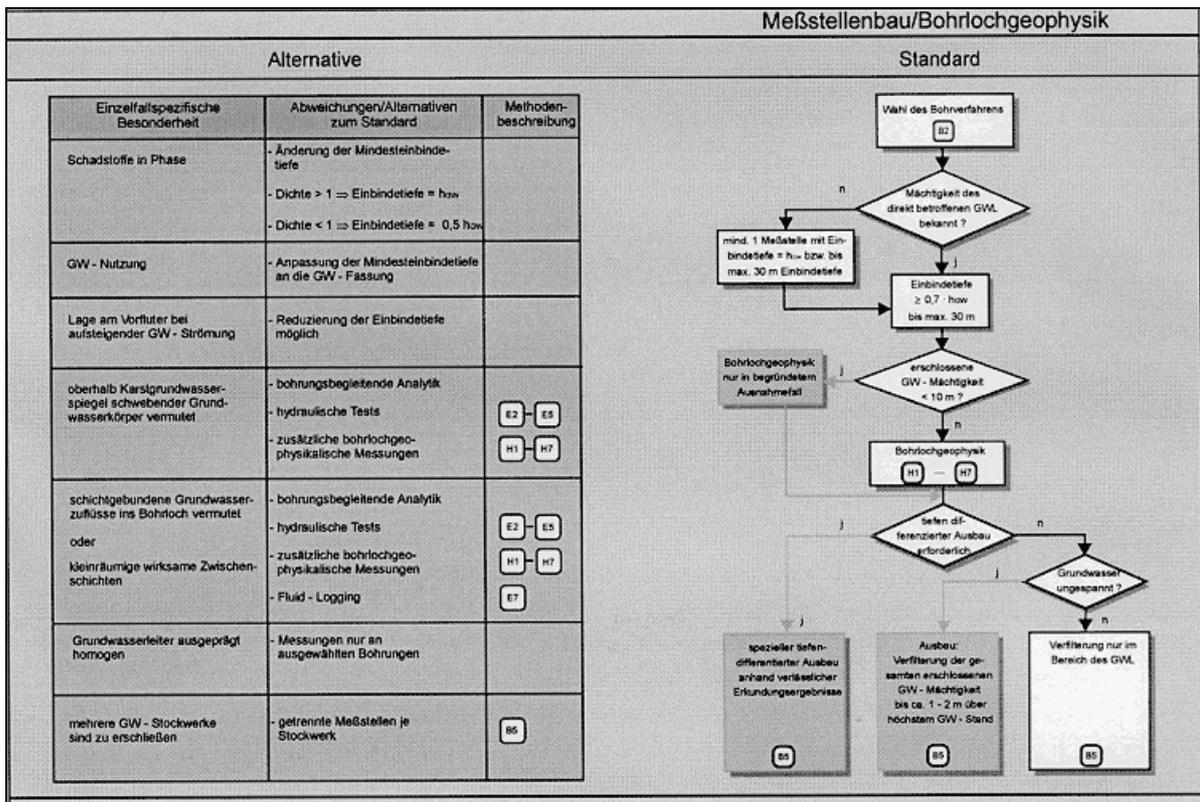
Diagramm

Orientierende Erkundung

Zur Bestimmung der Grundwasserfließrichtung wurden die drei GWM in Form eines hydrogeologischen Dreiecks positioniert. Es wurde versucht, zwei Meßstellen im anfangs vermuteten Abstrom (Süd) für das oberflächennahe Grundwasser einzurichten (vgl. 11. Hydrogeologisches Arbeitsmodell), um sie für die spätere hydrochemische Untersuchung verwenden zu können.

Die Meßstellen wurden im unmittelbaren Abstrom positioniert.

5. Meßstellenbau/Bohrlochgeophysik



Diagramm

Orientierende Erkundung

Der erste Grundwasserzutritt, in den im Trockenbohrverfahren mit Luftspülung niedergebrachten Bohrungen, wurde im Bereich zwischen 13 bis 14 m u. GOK registriert (= Oberkante GWL). Die Grundwasserdruckfläche des gespannten Grundwassers pegelte sich bei 10 m u. GOK ein.

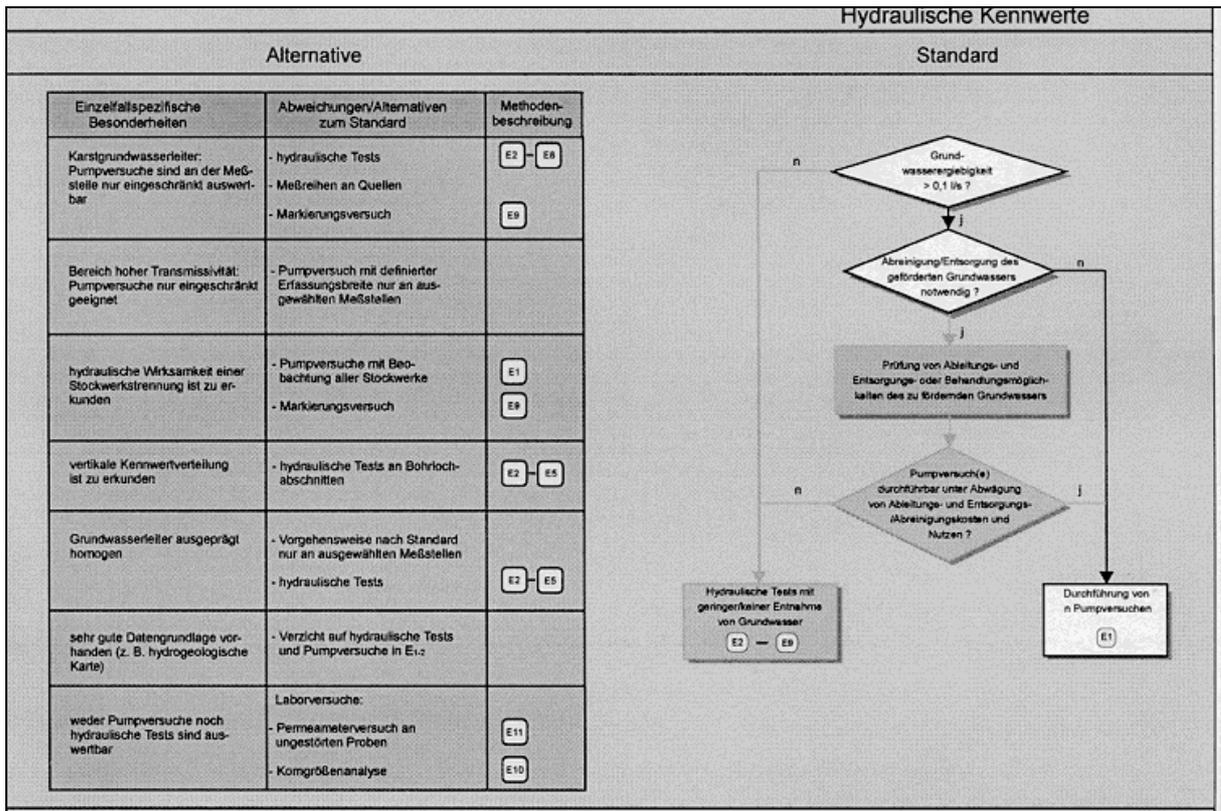
Die Einbindetiefe wurde zur Kosteneinsparung aus folgenden Gründen zunächst auf 10 m begrenzt:

- Unkenntnis über die Gesamtmächtigkeit des schichtig gegliederten Grundwasservorkommens
- geringe vertikale Gebirgsdurchlässigkeit und damit bevorzugt horizontaler Schadstofftransport

Die durchgeführte Bohrlochgeophysik im nicht ausgebauten Bohrloch (eingestellter Hilfsfilter) ergab in allen Bohrungen einen deutlichen Wasserzutritt im Bereich 13,0 - 19,5 m u. GOK.

Die Bohrungen wurden von der Bohrlochsohle bis zur Oberkante des GWL durchgehend verfüllt. Die Endteufen lagen in allen Meßstellen bei ca. 23 m.

6. Hydraulische Kennwerte



Diagramm

Orientierende Erkundung

Zur Ermittlung hydraulischer Kennwerte wurde in der abstromig gelegenen Meßstelle ein Kurzpumpversuch (3h - Absenkung, 1h - Wiederanstieg) durchgeführt. Die Pumprate betrug 0,0005 m³/s.

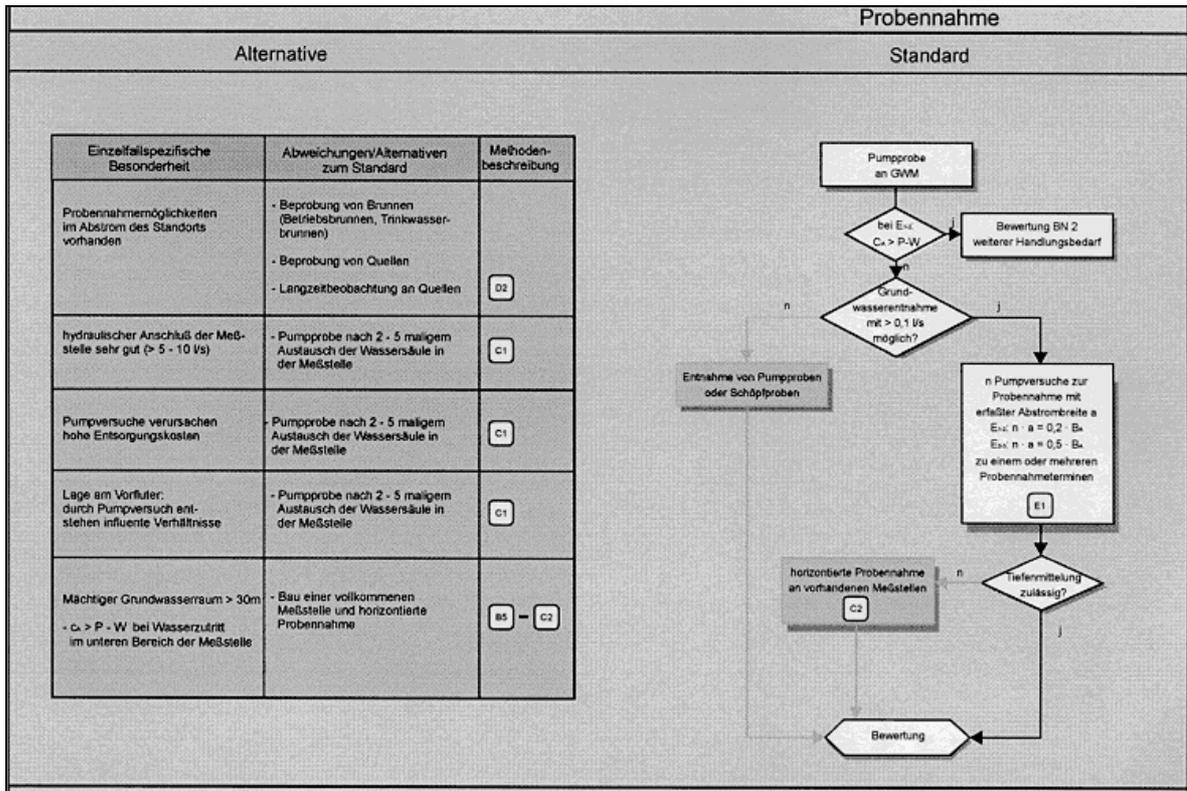
Die Ermittlung der Transmissivität erfolgte anhand des Wiederanstiegs nach THEIS.

Aufgrund des geringen Grundwasserdargebotes und einer damit großen Reichweite des Pumpversuches, wurde zur Vermeidung einer eventuellen Schadstoffverschleppung entgegen der natürlichen Grundwasserfließrichtung, auf Pumpversuche in den beiden Meßstellen im Zustrom verzichtet.

Transmissivität

Meßstelle 2	$1,1 \cdot 10^4 \text{ m}^2/\text{s}$
-------------	---------------------------------------

7. Probennahme



Diagramm

Orientierende Erkundung

Im Verlauf des dreistündigen Kurzpumpversuches an der abstromigen Meßstelle erfolgte zur Erhöhung der Datensicherheit je eine Beprobung zu Beginn und am Ende.

In keiner Probe kam es zur Überschreitung von P-W-Werten.

Zur Erfassung von $0,2 B_A$ wäre unter Berücksichtigung des Kriteriums $a \leq 20 \text{ m}$ und der ermittelten hydraulischen Kennwerte zusätzlich eine weitere Meßstelle im Abstrom erforderlich.

Um die Erkundungskosten in einem dem Gefährdungspotential des Standortes angemessenen Rahmen zu halten, wurde auf die Einrichtung einer weiteren Bohrung zugunsten eines kostengünstigeren Pumpversuches mit der Erfassungsbreite $a = 0,2 B_A = 37 \text{ m}$ verzichtet.

Der Entscheidung einen Pumpversuch durchzuführen, wurden folgende Überlegungen zugrundegelegt:

- Aufgrund des geringen Grundwasserdargebotes ist nicht mit einer unzulässig hohen Verdünnung der Schadstoffkonzentrationen bei einer Breitenmittelung über 37 m zu rechnen.
- Durch eine analytische Begleitung des Pumpversuches kann dieser Unsicherheitsfaktor weitgehend ausgeschlossen werden, so daß die Ergebnisse aussagekräftig für die Bewertung auf Beweisniveau BN2 sind.

Im Gegensatz zur Festlegung der GWM-Anzahl unter "3. Anzahl GWM" konnte anhand der mittlerweile vorliegenden hydraulischen Parameter die Pumpdauer nach BEAR & JACOBS berechnet werden.

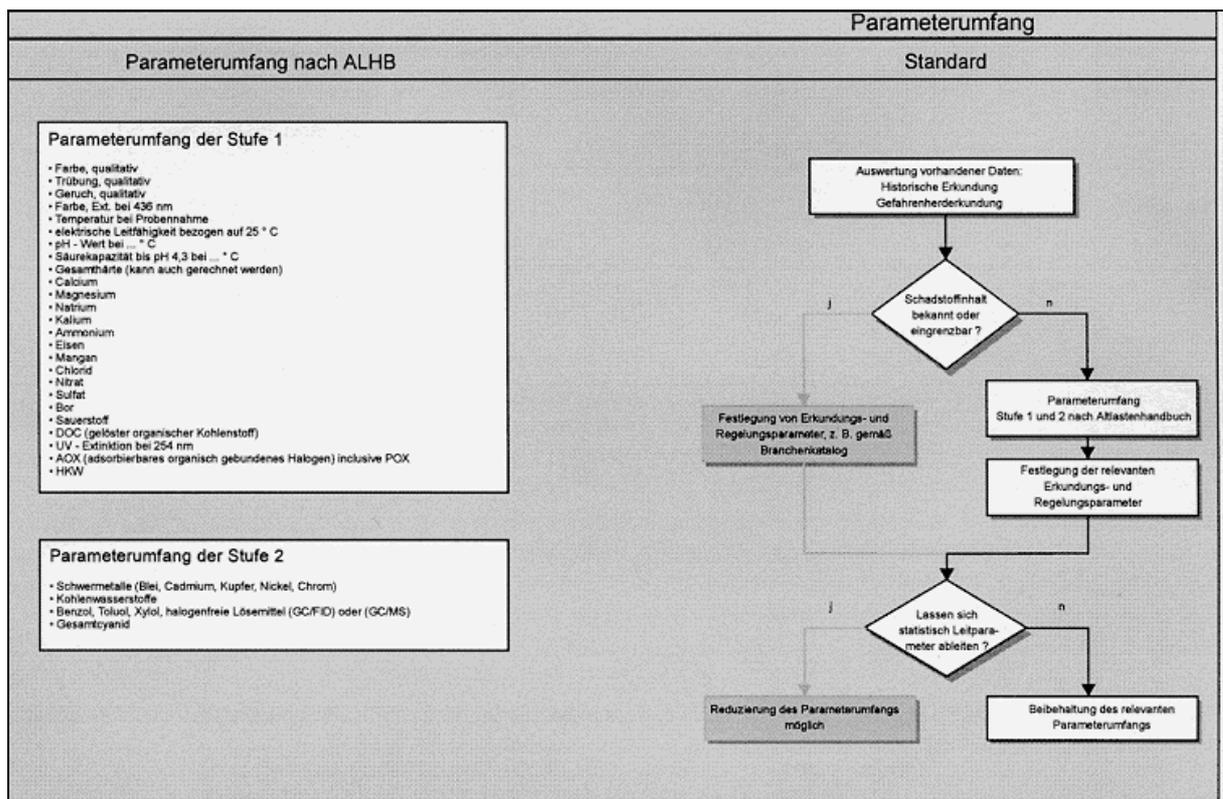
Mit einer hydrogeologisch sinnvollen Pumprate von $0,0005 \text{ m}^3/\text{s}$ ergibt sich eine Pumpdauer ($x = 0 \text{ m}$; $y = 18,5 \text{ m}$):

$$t_{PV} = \left[\frac{0,01 \cdot 0,0005 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot 86400}{2 \cdot \pi \cdot (0,0026 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1})^2 \cdot 11 \text{ m}} \cdot \left(-\ln \left(\cos \left(18,5 \text{ m} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 11 \text{ m} \cdot 0,0026 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}}{0,0005 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot 86400} \right) \right) \right) \right] \cdot 24$$

= 66 h

Während dieses 2,8-tägigen Pumpversuches wurden Grundwasserproben zu Beginn, nach halber Pumpdauer und am Ende entnommen.

8. Parameterumfang



Diagramm

Orientierende Erkundung

Aufgrund der verschiedenen Ablagerungsgüter und eines hieraus resultierenden breiten Schadstoffspektrums, wurden an sämtlichen Grundwasserproben Übersichtsanalysen der Parameterstufen 1 + 2 gemäß ALHB durchgeführt.

In keiner Probe wurde eine P-W-Wert-Überschreitung festgestellt.

9. Emissionsermittlung über Grundwassererkundung und Plausibilitätskontrolle

Orientierende Erkundung

Emissionsermittlung:

Da keine Prüfwertüberschreitung im Grundwasser festgestellt werden konnte, wurde eine Emissionsermittlung hinfällig.

Plausibilitätskontrolle:

Durch die mehrfache Beprobung der abstromigen Meßstelle, einer maximalen Erfassungsbreite von $0,2 B_A$ und einer durch mehrere Stichtagsmessungen abgesicherte Grundwasserfließrichtung, sind die Ergebnisse als ausreichend für eine Bewertung auf BN2 anzusehen.

Aus Erfahrungen mit vergleichbaren Fällen ist auch in absehbarer Zukunft mit keiner Belastung des Grundwassers zu rechnen.

10. Bewertung

Orientierende Erkundung

Anhand der Erkundungsergebnisse Gefahrenherd/Grundwasser besteht kein Bedarf für die weitere Erkundung/Langzeitüberwachung der Altablagerung.

Die Einstufung erfolgt deshalb mit einem Handlungsbedarf B = Belassen.

11. Hydrogeologische Parameter

	BN1 / Planung E _{1,2} (vermutet)			BN2 (orientierend)			BN3 (abgesichert)			
	min	mittel	max	min	mittel	max	min	mittel	max	plausibel
Geometrie										
A _{SiWa} [m ²]		15.000			15.000					
B _A [m]		180			185					
h _{GW} [m]					11					
A _A [m ²]	B _A · h _{GW}				2.035					
h _{KGW} [m]										
A _{KGW} [m ²]	B _A · h _{KGW}									
Hydraulik										
Fließrichtung [°]	(vermutet)	90			30					
T [m ² /s]					1,1 · 10 ⁻⁴					
k _f [m/s]					1,0 · 10 ⁻⁵					
I [-]					0,008					
n _f [-]	Literatur				0,01					
a [m]	0,2 B _A				37					
Q _{PV} [m ³ /s]					0,0005					
t _{PV} [h]					66					
Volumenströme										
Q _A [m ³ /d]	k _f · A _A · I · 86400				14,1					
Q _{SiWa} [m ³ /d]	$\frac{A_{SiWa} \cdot GWN}{365000}$	6,2			6,2					
Q _{KGW} [m ³ /d]	k _f · A _{KGW} · I · 86400									
Q _{SH} [m ³ /d]	= Q _{SiWa}	6,2			6,2					
Q _{ZT} [m ³ /d]	= Q _A - Q _{SH}				7,9					
GWN [mm/a]	Literatur	150			150					
Emission										
c _Z [µg/l]										
c _{SH} [µg/l]										
c _A [µg/l]					nn					
E(SH) [g/d]	Q _{SH} · c _{SH} · 10 ⁻³									
E(A) [g/d]	(Q _A · c _A - Q _{ZT} · c _Z) · 10 ⁻³									

Fallbeispiel 5: Kluftgrundwasserleiter

Sandsteine des Mittleren Buntsandsteins

1. Standortbestimmung

Im vorliegenden Fallbeispiel wurde ein Altstandort innerhalb eines Wohngebietes erkundet.

Aus der vorausgegangenen historischen Erkundung E_{0-1} und der Schadensherderkundung E_{1-2} sind folgende Eckdaten bekannt:

Produktion:

Aufarbeitung von Lacken und Lösemitteln

Fläche:

Gesamtfläche 4.800 m²; kontaminierte Teilfläche 2.000 m² (unversiegelt).

Produktionszeitraum: 1925 - 1978

Geologie:

Quartäre Ablagerungen

- Lößlehm (11 - 17 m)
- Eiszeitliche Schotterterrasse (4 - 7 m)

Buntsandstein

- Tonsteine (3 - 6 m)
- Sandsteine, geklüftet (mind. 170 m)

Nutzungswürdigkeit des Grundwassers:

Der Standort liegt innerhalb der Trinkwasserschutzzone IIIa.

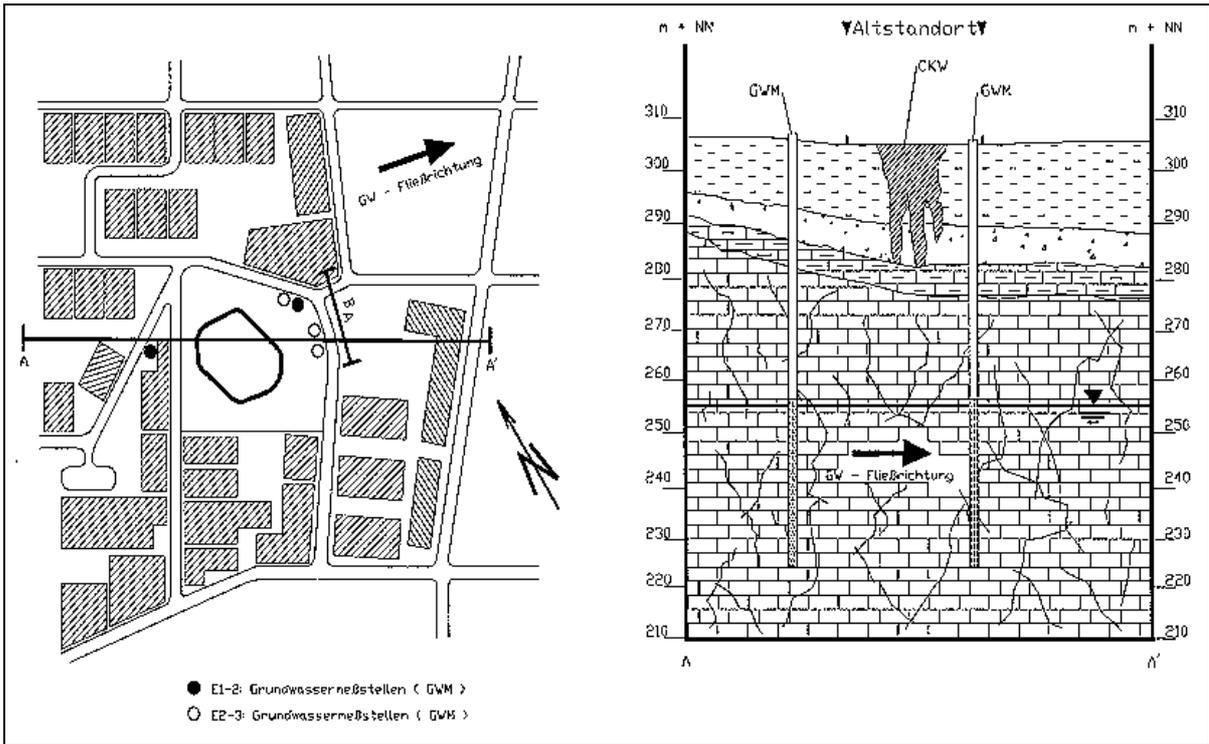
Gefahren-/Schadensherderkundung:

Multitemporale Luftbildauswertung, Bodenluft, Boden, Laboreluat.

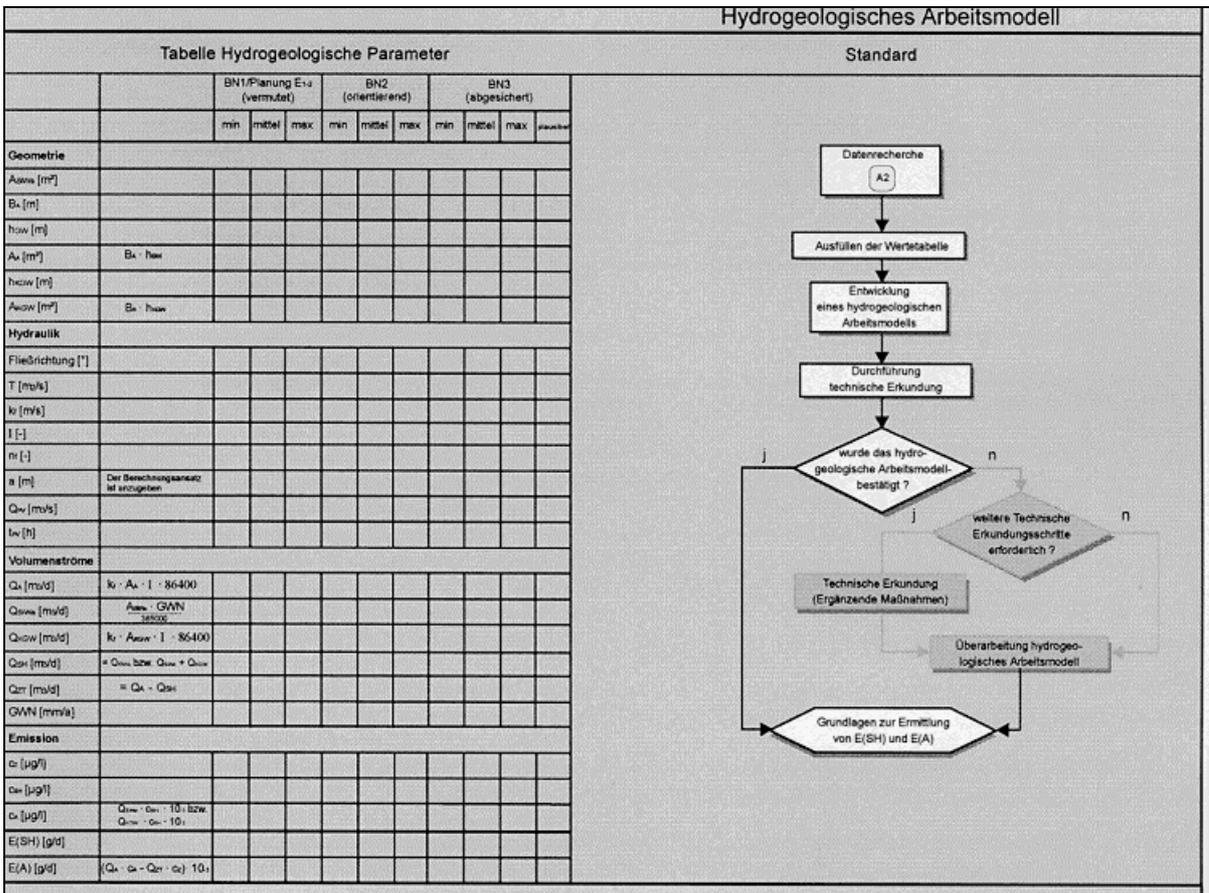
Schadstoffe:

Großflächiger Schadensherd durch CKW mit einem Belastungszentrum.

- Boden max. $c = 16.040$ mg/kg
- Laboreluat max. $c_{SH} = 221.400$ µg/l



2. Hydrogeologisches Arbeitsmodell



Diagramm

Orientierende Erkundung

Zur Erarbeitung eines hydrogeologischen Arbeitsmodelles wurden die geologische Karte GK 25, die topographische Karte TK 25 sowie Ergebnisse von Trinkwassererschließungsmaßnahmen aus der weiteren Umgebung ausgewertet. Die hydrogeologischen Verhältnisse sind im direkten Umfeld des Untersuchungsbereiches trotzdem nur unvollständig bekannt (vgl. 11. Hydrogeologische Parameter).

Hydrogeologisches Arbeitsmodell:

Die dem Untersuchungsobjekt unterlagernden Sandsteine stellen einen tektonisch stark beanspruchten, geklüfteten Grundwasserleiter dar.

Die aus dem weiteren Umfeld des Untersuchungsgebietes bekannten Varianzen des Trennflächengefüges (Kluftweiten, Kluftstände, Verschneidungen verschiedener Kluftsysteme sowie deren voneinander abweichende Streichrichtungen) deuten auf heterogene Verhältnisse im grundwassererfüllten Raum.

Der Transport im grundwassererfüllten Bereich erfolgt auf mehreren Kluftsystemen mit unterschiedlichen hydraulischen Verhältnissen.

Die Mächtigkeit des betroffenen Grundwasserleiters ist anhand der Trinkwassererschließungsmaßnahme und der Stratigraphie im Untersuchungsraum mit mindestens 170 m anzunehmen.

Die Grundwasserfließrichtung und der Flurabstand mit > 50 m sind aus der Trinkwassererschließungsmaßnahme ausreichend bekannt.

Der heterogene Aufbau des Grundwasserleiters läßt keine Übertragung von Einzelwerten auf einen größeren Gültigkeitsbereich zu.

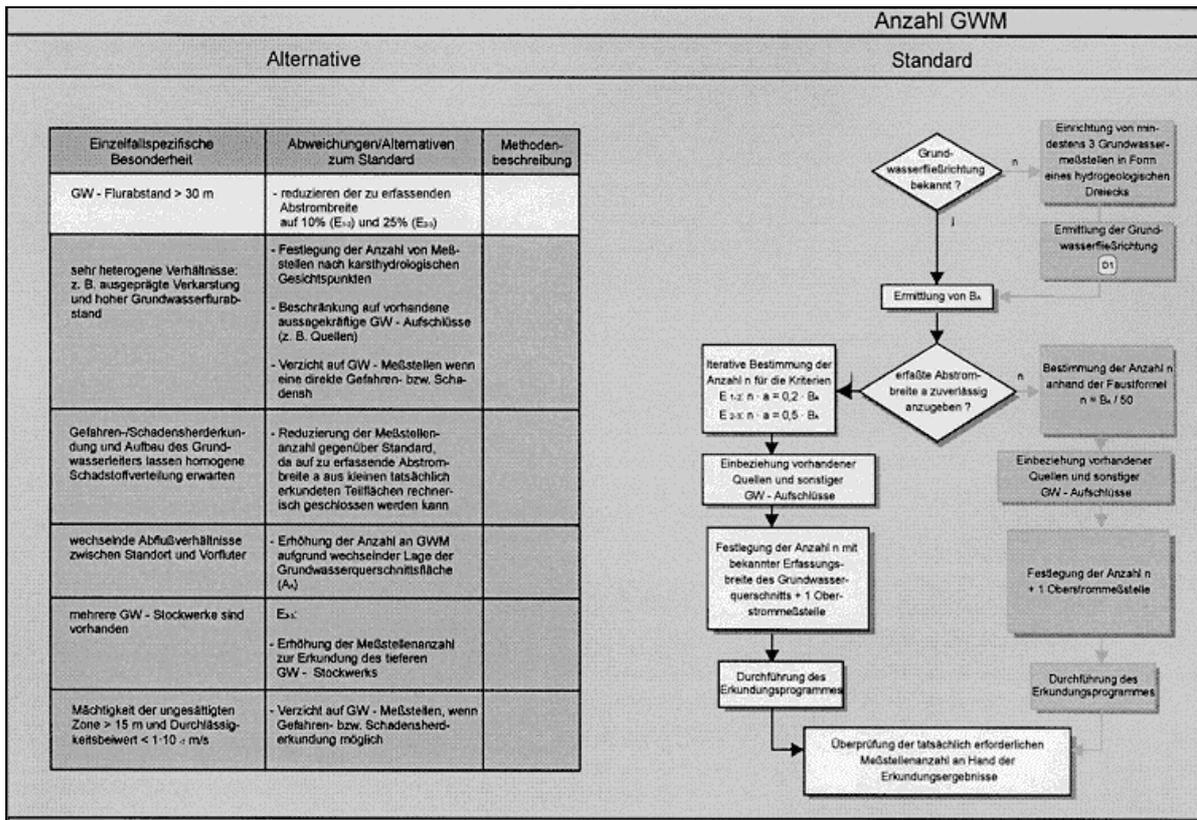
Nähere Erkundung

Die Ergebnisse der orientierenden Erkundung bestätigten weitgehend das bestehende Arbeitsmodell.

Die Fließrichtung ließ sich jedoch mit nur zwei Meßstellen (1 x Zustrom, 1 x Abstrom) noch nicht eindeutig bestätigen.

Die Tabelle "11. Hydrogeologische Parameter" wurde um die Werte für c_Z , c_{SH} , c_A , $E(SH)$ und $E(A)$ erweitert.

3. Anzahl GWM



Diagramm

Orientierende Erkundung

Die geometrische Breite des Schadensherdes beträgt an der Oberfläche ca. 80 m. Unter Berücksichtigung einer vertikalen Dispersion der Schadstoffe in einer 50 m mächtigen, heterogen aufgebauten, ungesättigten Zone, ist die Abstrombreite im Grundwasser deutlich größer anzusehen.

Es wurde deshalb zur Erhöhung der Entscheidungssicherheit die Breite B_A mit B_A = 120 m angenommen (+ 50 %).

Die für Beweisniveau BN2 geforderte Erfassungsbreite beträgt aufgrund eines Flurabstandes > 30 m nur 0,1 B_A = 12 m.

Mit einer hydrogeologisch sinnvollen Pumprate Q_{PV} = 0,0005 m³/s und einer Erfassungsbreite der Einzelmeßstelle von a = 12 m (a ≤ 20 m), ergibt sich anhand der Gleichung von BEAR & JACOBS eine Pumpdauer je Meßstelle von (x = 0 m; y = 6 m):

$$t_{PV} = \frac{0,01 \cdot 0,0005 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot 86400}{2\pi \cdot (0,0016 \text{ m d}^{-1})^2 \cdot 30 \text{ m}} \cdot \left(-\ln \left(\cos \left(\frac{2\pi \cdot 30 \text{ m} \cdot 0,0016 \text{ m d}^{-1}}{0,0005 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot 86400} \right) \right) \right) : 24$$

= 19 h

Für die Erfassung von $0,1 B_A$ wäre damit eine GWM ausreichend:

$$n = \frac{0,1 B_A}{a} = \frac{12m}{12m} = 1$$

Da eine Vorbelastung des Grundwassers nicht auszuschließen war, wurde zusätzlich eine GWM im Zustrom eingerichtet.

Nähere Erkundung

Durch die horizontale Probennahme in der bereits vorhandenen GWM konnte eine Mächtigkeit der Schadstofffahne > 30 m nachgewiesen werden.

Unter Berücksichtigung der Empfehlung zur Tiefenmittelung einen Teufenbereich von maximal 30 m zu verwenden, bedeutet dies für die Erkundung, daß bei der geplanten Einbindetiefe von 60 m ($\approx 0,3 h_{GW}$) die GWM als Meßstellengruppen mit Filterstrecken in den Teufenbereichen 50 - 80 m u. GOK und 80 - 110 m u. GOK ausgebaut werden müssen.

Bedingt durch einen Flurabstand > 30 m ergibt sich eine Auslegung der Meßstellenanzahl auf eine mögliche Erfassung des Abstromes je Teufenbereich von $0,25 B_A = 30$ m.

Unter Einhaltung des Kriteriums $a \leq 20$ m wird deshalb zusätzlich eine tiefe GWM als Ergänzung zur bereits bestehenden sowie eine neue Meßstellengruppe notwendig:

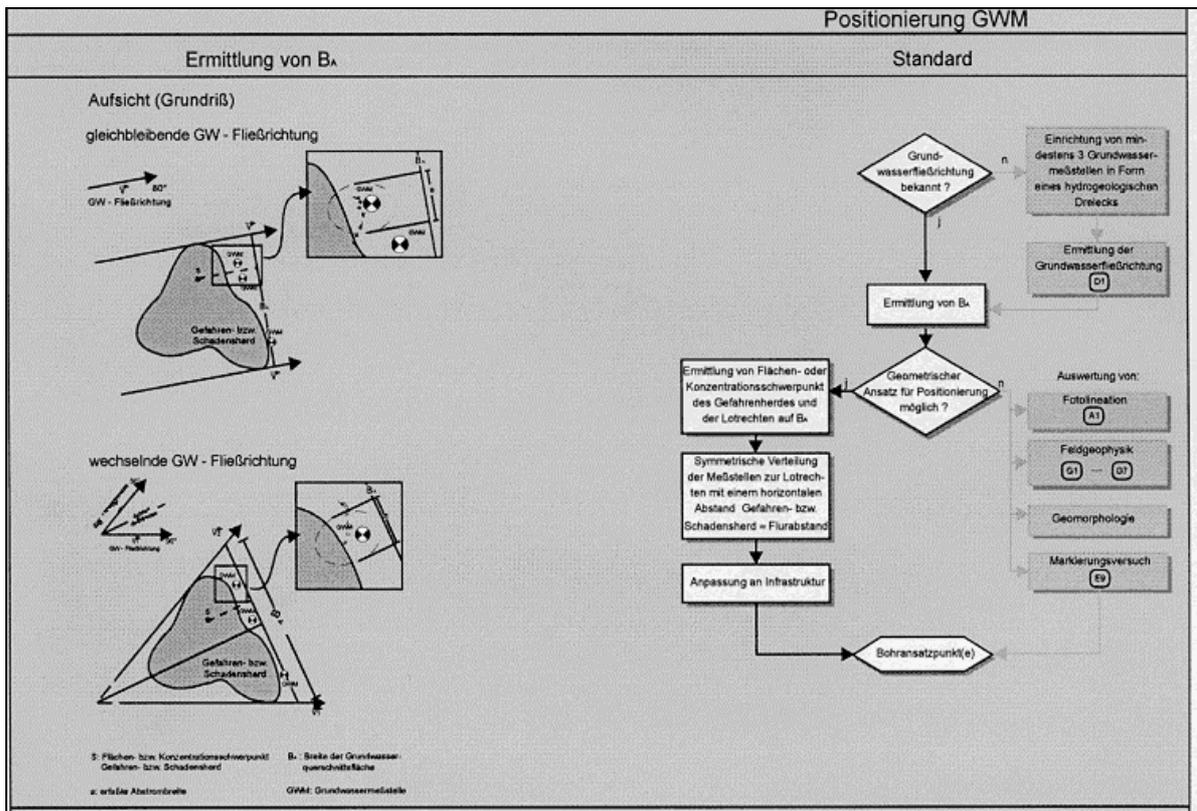
$$n = \frac{0,25 B_A}{a} = \frac{30m}{15m} = 2$$

Mit einer Pumprate von $Q_{PV} = 0,0005 \text{ m}^3/\text{s}$ ergibt sich nach BEAR & JACOBS eine Pumpdauer je Meßstelle von ($x = 0$ m; $y = 7,5$ m):

$$t_{PV} = \left(\frac{0,01 \cdot 0,0005 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot 86400}{6,28 \cdot (0,0015 \text{ md}^{-1})^2 \cdot 30 \text{ m}} \cdot \left[-\ln \left(\cos \left(7,5 \text{ m} \cdot \frac{6,28 \cdot 30 \text{ m} \cdot 0,0015 \text{ md}^{-1}}{0,0005 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot 86400} \right) \right) \right] \right) \cdot 24$$

= 29 h

4. Positionierung GWM



Diagramm

Orientierende Erkundung

Die Ergebnisse der historischen Erkundung und der Schadensherderkundung ergaben einen Belastungsschwerpunkt in der westlichen Hälfte des gesamten Schadensbereiches.

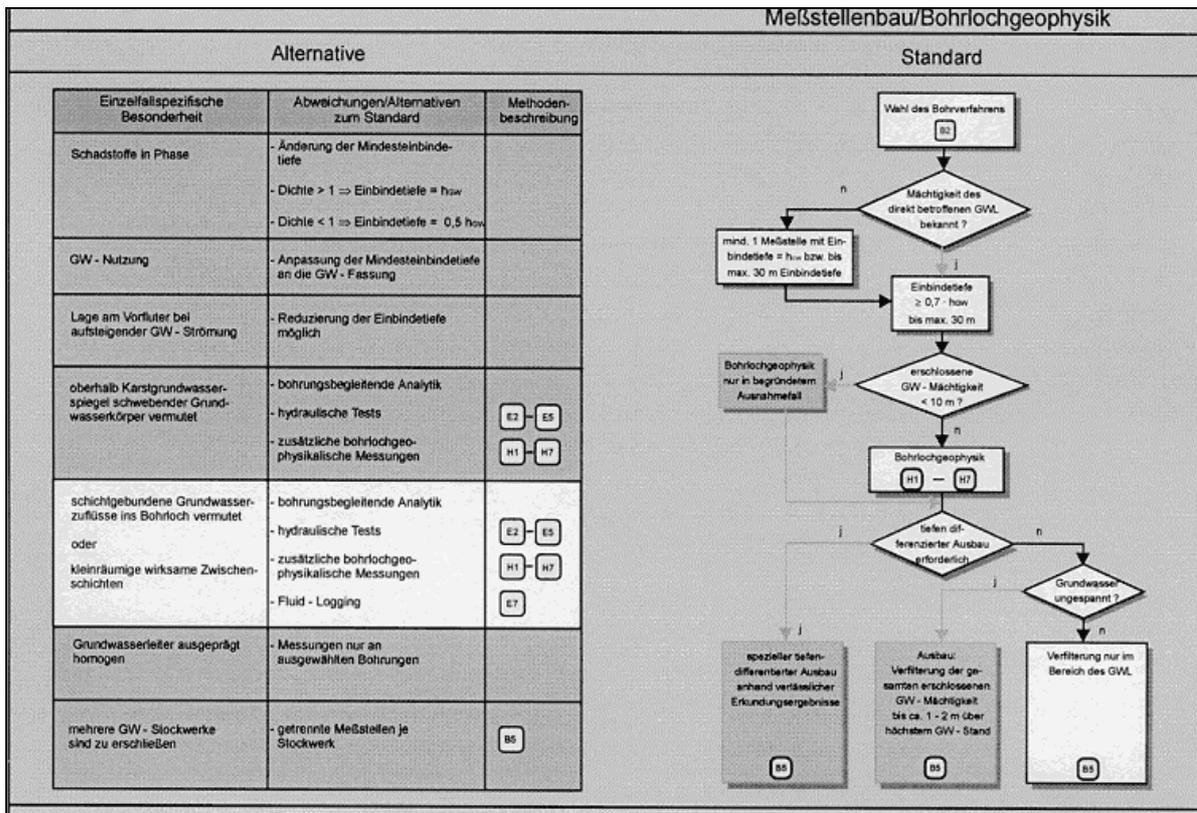
Eine Auswertung von Photolineationen ergab keine Hinweise auf strukturelle Besonderheiten.

Die Positionierung der abstromigen GWM erfolgte deshalb anhand eines rein geometrischen Ansatzes im zentralen Abstrom zum Belastungsschwerpunkt.

Nähere Erkundung

Die Positionierung der neuen GWM erfolgte analog zur orientierenden Erkundung. Die bestehende flache GWM wurde um eine tiefe GWM erweitert. Zur Abdeckung des östlichen Schadensbereiches wurde in dessen zentralen Abstrom die zweite Meßstellengruppe eingerichtet.

5. Meßstellenbau/Bohrlochgeophysik



Diagramm

Orientierende Erkundung

Die Mächtigkeit des Grundwasservorkommens ist aus den Befunden zur Trinkwassererschließung mit mindestens 170 m anzusetzen. Regional auftretende Stockwerksgliederungen mit ggf. geringmächtigeren wasserführenden Schichten waren aufgrund der Stratigraphie im Untersuchungsgebiet nicht zu erwarten.

Erkundungstechnisch bestand die Problematik generell darin, für den Schadstofftransport repräsentative bzw. ausreichend wasserführende Kluftsysteme zu erschließen. Die Einbindetiefe der Meßstellen wurde deshalb aus Kostengründen zunächst auf 30 m begrenzt (Bohrtiefe: rd. 80 m).

Die Bohrungen wurden im Festgestein als Kernbohrungen niedergebracht und mit einer 5"-PVC-Verrohrung ausgebaut.

Aufgrund räumlicher Verschneidungen der aufgeschlossenen Kluftsysteme wurden diese trotz variierender Wasserführungen oder Druckverhältnisse dem gleichen Grundwasserleiter zuerkannt.

Geophysikalische Bohrlochmessungen zeigten bis 30 m unter dem Druckspiegel des leicht gespannten Grundwassers mehrere, z.T. nicht eindeutig voneinander zu trennende Wasserzutritte mit wechselnden Wasserzutrittsraten.

Die Teufenstufen der Wasserzutritte sind sowohl in der zu- als auch in der abstromigen Meßstelle unterschiedlich und nicht korrelierbar. Die Bohrungen im Zu- und Abstrom wurden daher bis zum obersten Grundwasserzutritt im Buntsandstein durchgängig verfiltriert.

Nähere Erkundung

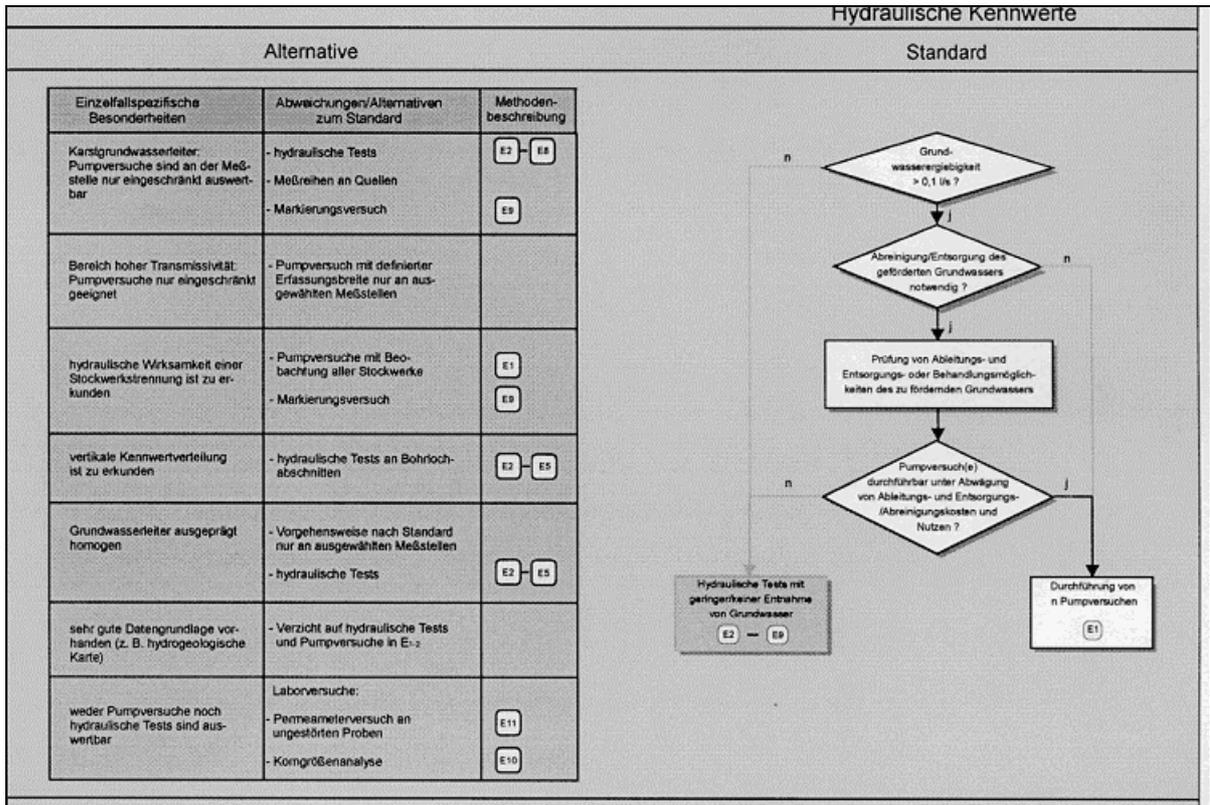
Horizontierte Beprobungen der abstromigen Meßstelle zeigten, daß die Basis der CKW-Verunreinigung im Grundwasser nicht erfaßt wurde. Eine Abnahme der Schadstoffgehalte mit zunehmender Tiefe konnte nicht beobachtet werden.

Da die Tiefenmittelung über eine Grundwassermächtigkeit von maximal 30 m erfolgen soll, wurden Meßstellengruppen (zwei getrennte Bohrungen) eingerichtet. Die flachen GWM sind dabei im Bereich 50 - 80 m u. GOK, die tiefen im Bereich 80 - 110 m u. GOK durchgängig gefiltert.

Weitere bohrlochgeophysikalische Messungen bestätigten den heterogenen Aufbau des GWL. Die Teufenlagen der Wasserzutritte waren für sämtliche Meßstellen verschieden und nicht miteinander korrelierbar. Eine Trennung in einzelne Grundwasserstockwerke war nicht erkennbar.

In den neuen Meßstellen wurden teilweise Kluftsysteme mit einem nur ungenügenden hydraulischen Anschluß angefahren. Die Wasserzutrittsraten waren teilweise so gering, daß eine direkte Messung von Zutritten mittels Flowmeter-Messungen über die gesamte Bohrtiefe keine verwertbaren Ergebnisse lieferte.

6. Hydraulische Kennwerte



Diagramm

Orientierende Erkundung

Zur Ermittlung der hydraulischen Kennwerte wurden sowohl in der zu- als auch abstromigen Bohrung beim ersten Zutritt von Wasser und nach Erreichen der jeweiligen Endteufe ein Kurzpumpversuch durchgeführt (3h - Absenkung; 1h - Wiederanstieg).

Die Entnahmeraten lagen zwischen 0,0001 und 0,0005 m³/s. Das entnommene Wasser wurde vorsorglich über Aktivkohlefilter und danach in das Kanalnetz geleitet.

Die Auswertung des Wiederanstiegs erfolgte nach THEIS.

Die aus der Trinkwassererschließung bekannten Transmissivitätsdaten wurden weitgehend bestätigt.

Transmissivitäten

Meßstelle 1 (Zustrom)	8,1 · 10 ⁻⁵ m ² /s
Meßstelle 2	2,8 · 10 ⁻⁵ m ² /s
Meßstelle 1 (Zustrom)	nicht auswertbar
Meßstelle 2	6,2 · 10 ⁻⁵ m ² /s

Nähere Erkundung

Zur Quantifizierung des Heterogenitätsmaßes wurden an den beiden neu eingerichteten Meßstellen abermals Kurzpumpversuche (3h - Absenkung; 1h - Wiederanstieg) beim ersten Wasserzutritt als auch nach Erreichen der Endteufe durchgeführt.

Die Pumpraten betragen maximal 0,0005 m³/s. Das entnommene Wasser wurde aufgrund seiner Belastung über einen Aktivkohlefilter in das Kanalnetz eingeleitet.

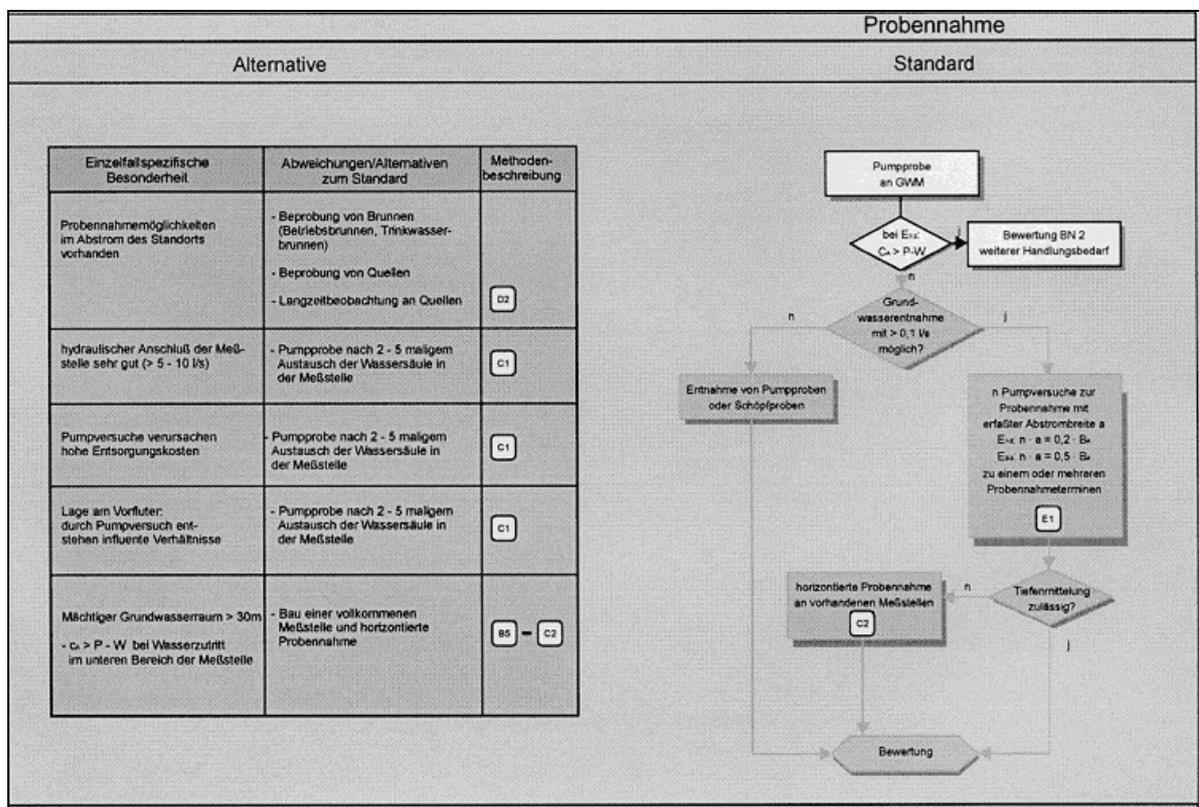
Die Auswertung des Wiederanstieges erfolgte nach THEIS.

Die Werte für T stimmen in ihrer Größenordnung mit denjenigen aus der E_{1,2}-Erkundung überein.

Transmissivitäten

Meßstelle 2 (flach)	9,4 · 10 ⁻⁶ m ² /s
Meßstelle 2 (tief)	9,5 · 10 ⁻⁵ m ² /s
Meßstelle 3 (flach)	nicht auswertbar
Meßstelle 3 (tief)	nicht auswertbar

7. Probennahme



Diagramm

Orientierende Erkundung

Aus den zwei Grundwassermeßstellen (je eine im Zu- und Abstrom) wurden nach Fertigstellung mittels U-Pumpe die Proben als tiefengemittelte Grundwasserproben entnommen.

Die Probennahme erfolgte nach Erreichen der Parameterkonstanz der gemessenen Vor-Ort-Parameter (Pumpdauer: 0,5 h bis 1 h).

Auf die Probennahme während der hydraulischen Kurzpumpversuche wurde aus Gründen der Verfälschung von Analyseergebnissen durch das ins Gebirge eingedrungene Spülwasser verzichtet.

Aufgrund der nachgewiesenen P-W-Wert-Überschreitungen im Grundwasser (vgl. 8. Parameterumfang) wurde vorerst kein Pumpversuch zur Erfassung von $0,1 B_A$ durchgeführt.

Aus den P-W-Wert-Überschreitungen im Schadensherd und im Grundwasserabstrom ergab sich ein weiterer Handlungsbedarf für eine nähere Erkundung E_{2-3} ab.

Nähere Erkundung

Zur Klärung der Frage, ob die gewählte Einbindetiefe im vorliegenden Fall ausreicht, wurde in der aus der orientierenden Erkundung vorhandenen abstromigen Bohrung vor Einrichtung der neuen Meßstellen eine horizontierte Probennahme durchgeführt. Die Tiefenstufen lagen bei 60 m, 66 m, 72 m und 78 m u. GOK. Die Proben wurden mittels eines 2-Pumpensystemes entnommen. Es fielen insgesamt 4 Proben an.

Die Ergebnisse zeigten, daß mit einer Einbindetiefe von 30 m die Schadstofffahne in ihrer Tiefenausdehnung nicht vollständig erfaßt wurde.

Aus diesem Grund ergab sich die Notwendigkeit, mit Meßstellengruppen (je eine tiefe und flache Bohrung) eine größere Einbindetiefe zu erreichen. Die flachen GWM wurden dabei im Bereich 50 - 80 m u. GOK, die tiefen im Bereich 80 - 110 m u. GOK durchgängig gefiltert.

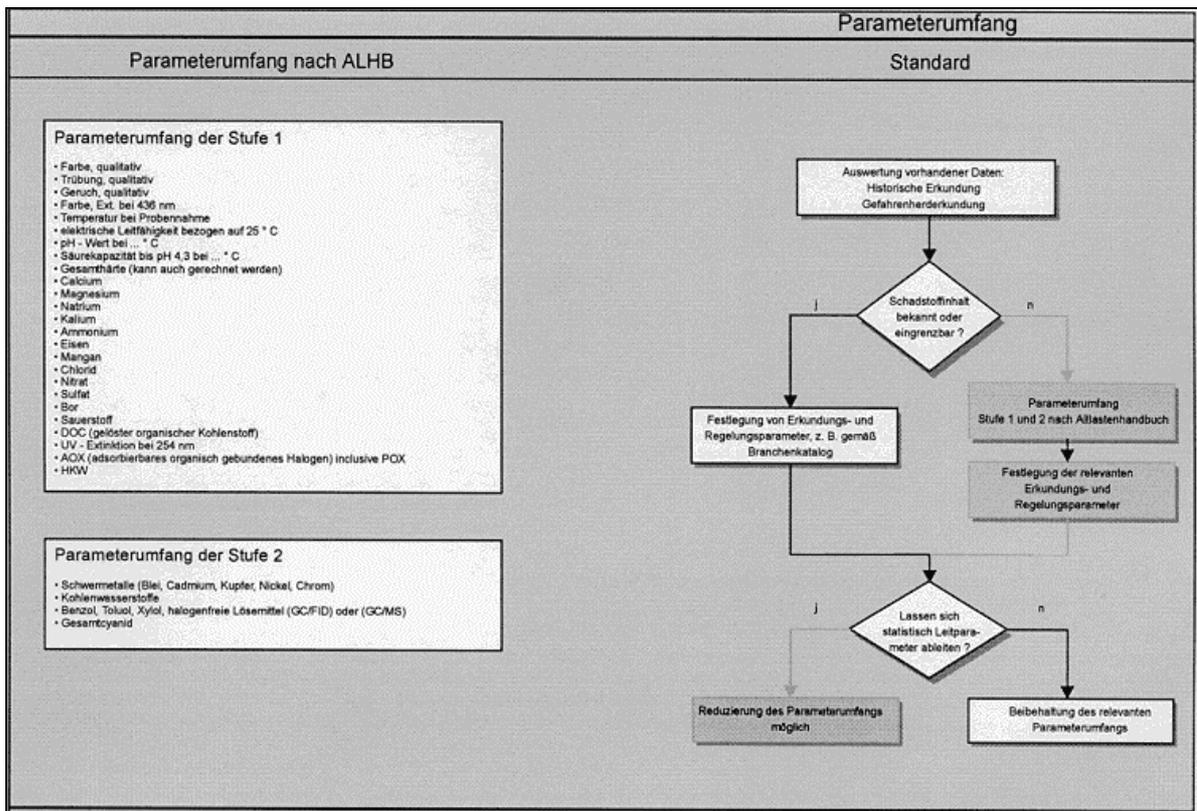
Vor der eigentlichen Probennahme erfolgte in den tiefen Grundwassermeßstellen ebenfalls eine horizontierte Probennahme mit den Tiefenstufen 90 m, 96 m, 102 m und 108 m u. GOK.

Obwohl eine Tiefenabgrenzung nicht erreicht wurde, war doch eine deutliche Abnahme der Schadstoffkonzentrationen zu verzeichnen.

Da anhand der bohrlochgeophysikalischen Untersuchungen keine Grundwasserstockwerke unterschieden werden konnten, erfolgte aus allen abstromigen GWM eine tiefengemittelte Probennahme.

Zur Erfassung von $0,25 B_A$ je Teufenbereich (flach, tief) wurden insgesamt vier Pumpversuche zur Probennahme durchgeführt. Über deren Dauer wurden Proben jeweils zu Beginn, zur Halbzeit und zum Ende entnommen. Die Pumpraten lagen im Bereich zwischen $0,0001 - 0,0005 \text{ m}^3/\text{s}$.

8. Parameterumfang



Diagramm

Orientierende Erkundung

Durch die Ergebnisse der vorausgegangenen historischen Erkundung und der Schadensherkennung, konnte das Schadstoffspektrum auf die relevante Schadstoffgruppe CKW eingengen werden.

Die Grundwasseranalytik bestätigte generell das Ergebnis der direkten Emissionserkundung. Als relevante Schadstoffgruppe im Grundwasser wurden CKW detektiert.

Tiefengemittelte Probennahme c_A :

Σ CKW P-W: 10 $\mu\text{g/l}$

Meßstelle 1 (Zustrom)	< Nachweisgrenze
Meßstelle 2	9.950 $\mu\text{g/l}$

Nähere Erkundung

Durch die direkte Emissionserkundung und die Grundwassererkundung im Rahmen von E₁₋₂ konnte das Schadstoffspektrum auf die relevante Schadstoffgruppe CKW eingengt werden.

Die Proben der horizontalen Probennahmen und die tiefengemittelten Proben wurden auf folgende Parameter untersucht:

- pH-Wert
- el. Leitfähigkeit
- Temperatur
- CKW

Die Grundwasseranalytik bestätigte das Ergebnis der vorausgegangenen orientierenden Grundwassererkundung. Als einzige relevante Schadstoffgruppe wurden CKW nachgewiesen.

Horizontierte Probennahme

ΣCKW P-W: 10 µg/l

Tiefenstufe	Meßstelle 2	Meßstelle 3
60 m u. GOK	10.711 µg/l	8.222 µg/l
66 m u. GOK	12.380 µg/l	7.953 µg/l
72 m u. GOK	8.450 µg/l	2.335 µg/l
78 m u. GOK	9.812 µg/l	4.662 µg/l
90 m u. GOK	6.002 µg/l	1.234 µg/l
96 m u. GOK	981 µg/l	1.610 µg/l
102 m. u. GOK	43 µg/l	843 µg/l
108 m u. GOK	24 µg/l	545 µg/l

Tiefengemittelte Probennahme c_A : **Σ CKW P-W: 10 $\mu\text{g/l}$**

	Anfang	Mitte	Ende
Meßstelle 1	8.450 $\mu\text{g/l}$	-----	-----
Meßstelle 2	9.812 $\mu\text{g/l}$	6.978 $\mu\text{g/l}$	6.382 $\mu\text{g/l}$
Meßstelle 2	2.042 $\mu\text{g/l}$	1.977 $\mu\text{g/l}$	812 $\mu\text{g/l}$
Meßstelle 3	6.180 $\mu\text{g/l}$	4.213 $\mu\text{g/l}$	7.012 $\mu\text{g/l}$
Meßstelle 3	406 $\mu\text{g/l}$	533 $\mu\text{g/l}$	612 $\mu\text{g/l}$

Die Werte belegen, daß selbst in einer Tiefe von rd. 110 m u.GOK die Basis des kontaminierten Teilstromes nicht erfaßt wurde.

9. Emissionsermittlung über Grundwassererkundung und Plausibilitätskontrolle

Orientierende Erkundung

Emissionsermittlung:

Die Ergebnisse der direkten Emissions- und der Grundwassererkundung lassen eine Schadstoffemission über die gesamte Breite B_A annehmen. Konkret läßt sich dies jedoch mit nur einer Meßstelle im Abstrom nicht belegen. Für weitere Betrachtungen wird daher ein Schadstofftransport über die gesamte Breite B_A vereinfachend angenommen. Die Tiefenverteilung der Schadstoffe über die Mächtigkeit des Grundwasserleiters ist derzeit unbekannt.

Die Berechnung der E(A)-Werte für die Szenarien min/mittel/max erfolgt anhand der Werte aus der Tabelle "11. Hydrogeologische Parameter".

Zur Berechnung der Fläche A_A wird nur die Einbindetiefe der GWM in den Grundwasserleiter (30 m) und nicht die volle Mächtigkeit des Grundwasserleiters (mind. 170 m) angesetzt.

Emissionen E(A): $\Sigma CKW E_{\max} - W: 20 \text{ g/d}$

	min	mittel	max
E(A)	29 g/d	56 g/d	84 g/d

Plausibilitätskontrolle

Vergleicht man die Emission E(SH) mit der Emission E(A) so zeigen sich erhebliche Unterschiede.

Als Ursachen für diese Diskrepanz sind eine mächtige ungesättigte Zone, eine heterogene Schadstoffausbreitung und eine zu geringe Einbindetiefe der flachen GWM zu nennen.

Vor allem durch die 50 m mächtige, ungesättigte Zone kommt es zu einer Retardierung der Schadstofffront. Für die Beurteilung der Schadstoffemission aus dem Schadensherd und der Immission, gemessen im Grundwasser, muß von instationären Verhältnissen ausgegangen werden.

Ein Vergleich der Emissionen E(SH) / E(A) ist deshalb nicht bzw. nur sehr eingeschränkt möglich.

Nähere Erkundung**Emissionsermittlung:**

Die Ergebnisse der direkten Emissionserkundung und der Grundwassererkundung belegen eine Schadstoffemission über die gesamte Breite B_A . Die horizontierten Probennahmen zeigen jedoch, daß die vertikale Ausdehnung der Schadstofffahne in keiner der Bohrungen mit Endteufen von 30 m und 60 m komplett erfaßt wurde.

Zur Berechnung der Fläche A_A wurde nur die maximale Einbindetiefe der GWM in den Grundwasserleiter (60 m) und nicht die volle Mächtigkeit des Grundwasserleiters (mind. 170 m) angesetzt.

Die Berechnung der E(A)-Werte für die Szenarien min/mittel/max/plausibel erfolgt anhand der Werte aus der Tabelle "11. Hydrogeologische Parameter."

Gegenüber der orientierenden Erkundung ergibt sich durch die größere Einbindetiefe von 60 m eine Verdoppelung der Fläche A_A .

Für die Ermittlung der plausiblen Emissionen wird neben mittleren hydraulischen und geometrischen Werten für c_A eine Schwankungsbreite von $c_A = 4.000 \mu\text{g/l}$ bis $7.000 \mu\text{g/l}$ angenommen. Die angesetzte Schwankungsbreite von $3.000 \mu\text{g/l}$ ist vor dem Hintergrund der stark

schwankenden hydraulischen und hydrogeologischen Verhältnisse als Sicherheitsmarke zu berücksichtigen.

Emissionen E(A):

$\Sigma\text{CKW } E_{\text{max}}\text{-W: } 20 \text{ g/d}$

	min	mittel	max	plausibel
E(A)	6,3 g/d	49 g/d	118 g/d	42 - 74 g/d

Als min/max-Konzentrationen wurden die arithmetischen Mittel, berechnet aus den Anfangswerten der tiefengemittelten Probennahmen in der flachen und tiefen GWM, verwendet.

Plausibilitätskontrolle

Aus den vorliegenden Ergebnissen der aufeinander aufbauenden orientierenden und näheren Erkundung ergeben sich keine Verifizierungen sondern bestenfalls Korrekturen der jeweils älteren Ergebnisse.

Gegenüber der orientierenden Erkundung verringerten sich die Unterschiede zwischen den Emissionen E(A) und E(SH).

Nach der aktuellen Datenlage kann lediglich mit absoluter Sicherheit davon ausgegangen werden, daß die ermittelten plausiblen Emissionen die maximal zulässige Emission E_{max} überschreiten.

Eine sog. "kennzeichnende Emission" kann bestenfalls als vage Größe innerhalb eines weiten Intervalles von rd. 42 g/d bis 74 g/d angegeben werden.

10. Bewertung

Orientierende Erkundung

Aus der Schadstoffkonzentration c_{SH} , die mit einem mittleren Gehalt von 110.000 $\mu\text{g/l}$ deutlich über dem Prüfwert von 10 $\mu\text{g/l}$ liegt, leitet sich der weitere Handlungsbedarf für eine nähere Erkundung E_{2-3} ab.

Für die nächste Erkundungsphase ist ein stufenweises Vorgehen für die Grundwassererkundung geplant.

1. Stufe

In der bereits bestehenden abstromigen Bohrung soll eine horizontierte Probennahme durchgeführt werden.

Ziel: Erkundung der Tiefenverteilung der Schadstoffbelastung zur Festlegung der Ausbautiefen für die neu zu bohrenden Grundwassermeßstellen.

2. Stufe

Erstellung von weiteren Bohrungen im Abstrom mit einer Entnahme von tiefengemittelten Proben. Sollten größere Einbindetiefen erforderlich sein, sind in den neuen Meßstellen abermals horizontierte Beprobungen durchzuführen.

Nähere Erkundung

Aufgrund der komplexen hydraulischen Bedingungen im Kluftgrundwasserleiter gestaltet sich die technische Erkundung als schwierig und kostspielig. So ist zum Beispiel nicht abzusehen, ob weitere Bohrungen überhaupt hydraulisch relevante Kluftsysteme anfahren.

Eine Absicherung der chemischen Grundlagen kann aufgrund der Heterogenität des Grundwasserleiters nur anhand einer Vielzahl von Einzelwerten erfolgen (statistische Absicherung).

Die Abwägung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zwischen Erkundungsaufwand und Entscheidungssicherheit ergab, daß durch weitere technische Maßnahmen nur ein geringerer Informationsgewinn zu erreichen ist.

Der Standort wurde deshalb unter Annahme ungünstigster Umstände auf Beweisniveau BN3 bewertet. Die Überschreitung des Prüfwertes zusammen mit einer abgesicherten Emission ergaben einen weiteren Handlungsbedarf E_{3-4} .

11. Hydrogeologische Parameter

		BN1 / Planung E _{1,2} (vermutet)			BN2 (orientierend)			BN3 (abgesichert)			
		min	mittel	max	min	mittel	max	min	mittel	max	plausibel
Geometrie											
A _{SiWa} [m ²]			2000			2000			2000		2000
B _A [m]			120			120			120		120
h _{GW} [m]			170			170			170		170
A _A [m ²]	B _A · 30 m / 60 m		3.600			3.600			7.200		7.200
h _{KGW} [m]											
A _{KGW} [m ²]	B _A · h _{KGW}										
Hydraulik											
Fließrichtung [°]		90	100	110	90	100	110	90	100	110	100
T [m ² /s]		1,0 · 10 ⁻⁵	5,5 · 10 ⁻⁵	1,0 · 10 ⁻⁴	2,8 · 10 ⁻⁵	5,4 · 10 ⁻⁵	8,1 · 10 ⁻⁵	9,4 · 10 ⁻⁶	5,2 · 10 ⁻⁵	9,5 · 10 ⁻⁵	5,2 · 10 ⁻⁵
k _f [m/s]		3,3 · 10 ⁻⁷	1,8 · 10 ⁻⁶	3,3 · 10 ⁻⁶	9,3 · 10 ⁻⁷	1,8 · 10 ⁻⁶	2,7 · 10 ⁻⁶	3,1 · 10 ⁻⁷	1,7 · 10 ⁻⁶	3,2 · 10 ⁻⁶	1,7 · 10 ⁻⁶
I [-]			0,01			0,01			0,01		0,01
n _f [-]			0,01			0,01			0,01		0,01
a [m]	BEAR & JACOBS		12			15			15		
Q _{PV} [m ³ /s]			0,0005			0,0005			0,0005		
t _{PV} [h]			19			29			29		
Volumenströme											
Q _A [m ³ /d]	k _f · A _A · I · 86400	1,0	5,6	10,3	2,9	5,6	8,4	1,9	10,6	19,9	10,6
Q _{SiWa} [m ³ /d]	$\frac{A_{SiWa} \cdot GWN}{365000}$		1,3			1,3			1,3		1,3
Q _{KGW} [m ³ /d]	k _f · A _{KGW} · I · 86400										
Q _{SH} [m ³ /d]	= Q _{SiWa}		1,3			1,3			1,3		1,3
Q _{ZT} [m ³ /d]	= Q _A - Q _{SH}	-	4,3	9,0	1,6	4,3	7,1	0,6	9,3	18,6	9,3
GWN [mm/a]	Literatur		230			230			230		230
Emission											
c _Z [µg/l]						nn			nn		nn
c _{SH} [µg/l]					6,8	110.703	221.400	6,8	110.703	221.400	110.703
c _A [µg/l]						9.950		3.293	4.610	5.927	4.000-7.000
E(SH) [g/d]	Q _{SH} · c _{SH} · 10 ⁻³				0,009	144	288	0,009	144	288	144
E(A) [g/d]	(Q _A · c _A - Q _{ZT} · c _Z) · 10 ⁻³				29	56	84	6,3	49	118	42-74

Fallbeispiel 6: Poren-/Kluftgrundwasserleiter

Quartäre Kiese und Sande über Kalksteinen des Oberen Muschelkalkes

1. Standortbeschreibung

Im vorliegenden Fall wurde ein ehemaliges Gaswerk einer Stadt mit ca. 15.000 EW erkundet.

Aus der vorausgegangenen historischen Erkundung und Gefahren-/Schadensherderkundung sind folgende Eckdaten bekannt:

Produktion:

Stadtgas: 1.200.000 Nm³/a

Koks: 1.800 t/a

Teer: 141 t/a

Ammoniakwasser: 285 t/a

Gasreinigermasse: 29 t/a

Fläche:

Gesamtfläche des Gaswerkes 6.500 m²; kontaminierte Teilfläche 2.500 m²; Versiegelungsgrad ca. 70%

Produktionszeitraum: 1890 - 1935

Geologie:

Unter ca. 8 m mächtigen, quartären Talablagerungen aus Kiesen und Sanden folgen, getrennt durch eine verlehnte Verwitterungsdecke, die Kalksteine des Oberen Muschelkalkes mit einer Restmächtigkeit von ca. 50 m.

Nutzungswürdigkeit Grundwasser:

Das Grundwasser des quartären GWL ist gemäß VwV als nutzungswürdig einzustufen. Das Grundwasser des Oberen Muschelkalkes wird im weiteren Abstrom zur Trinkwassergewinnung genutzt.

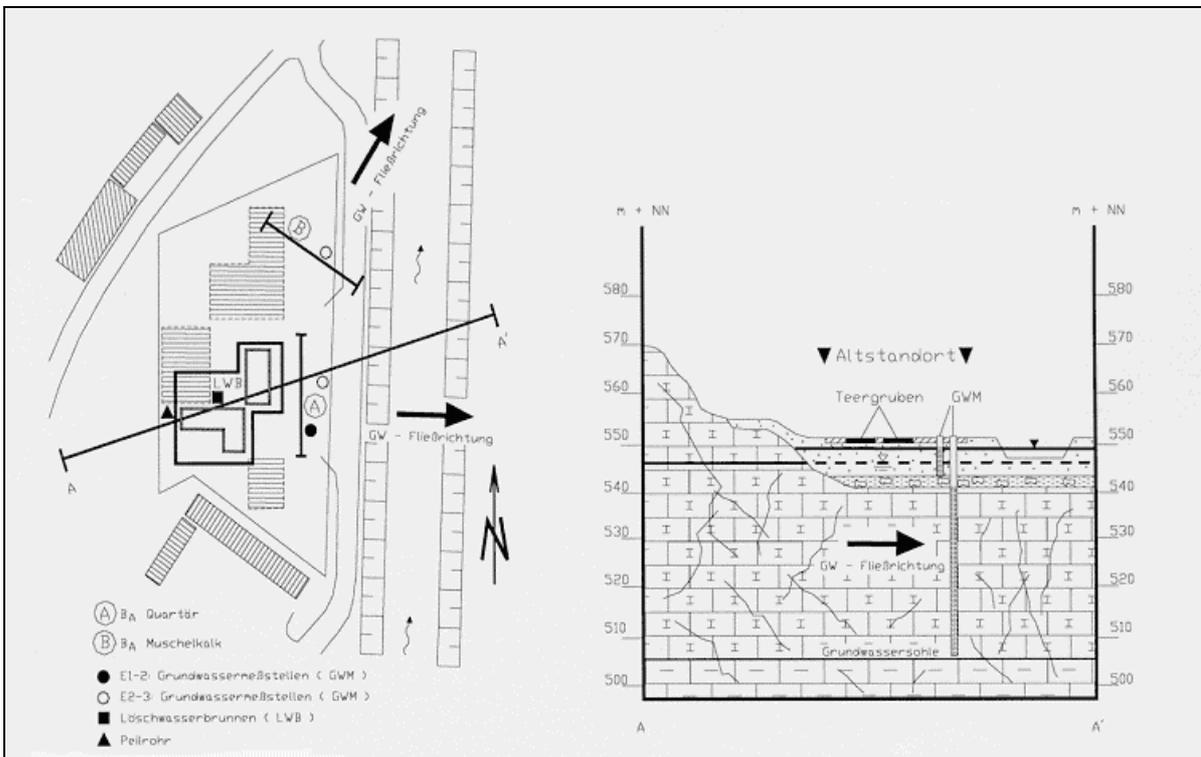
Gefahren-/Schadensherderkundung:

Bodenluft, Boden, Laboreluate

Schadstoffe:

Flächige Schadstoffbelastungen durch Naphtalin mit zwei Schadenszentren (Teergruben)

- Laboreluat max. $c_{SH} = 1.328 \mu\text{g/l}$
- Grundwasser max. $c_A = 202 \mu\text{g/l}$



2. Hydrogeologisches Arbeitsmodell

Tabelle Hydrogeologische Parameter											Standard
	BN1/Planung E-1 (vermutet)			BN2 (orientierend)			BN3 (abgesichert)			Standard	
	min	mittel	max	min	mittel	max	min	mittel	max		
Geometrie											
A _{max} [m ²]											
B _x [m]											
h _{0,0} [m]											
A ₀ [m ²]	B _x · h _{0,0}										
h _{0,0} [m]											
A _{0,0} [m ²]	B _x · h _{0,0}										
Hydraulik											
Fließrichtung [°]											
T [m/s]											
k _i [m/s]											
l [-]											
n [-]											
a [m]	Der Berechnungsansatz ist anzugeben										
Q ₀ [m ³ /s]											
t ₀ [h]											
Volumenströme											
Q ₀ [m ³ /d]	k _i · A ₀ · l · 86400										
Q _{0,GW} [m ³ /d]	A _{0,0} · GWN										
Q _{0,0} [m ³ /d]	k _i · A _{0,0} · l · 86400										
Q _{0,H} [m ³ /d]	= Q _{0,GW} bzw. Q _{0,0} + Q _{0,GW}										
Q _{0,Z} [m ³ /d]	= Q ₀ - Q _{0,H}										
GWN [mm/a]											
Emission											
c ₀ [µg/l]											
c ₀ [µg/l]											
c ₀ [µg/l]	Q _{0,H} · c ₀ · 10 ³ bzw. Q _{0,Z} · c ₀ · 10 ³										
E(SH) [g/d]											
E(A) [g/d]	(Q _{0,Z} · c ₀ - Q _{0,Z} · c ₀) · 10 ³										

Diagramm

Orientierende Erkundung

Als Grundlagen für das hydrogeologische Arbeitsmodell wurden die topographische Karte TK 25, die geologische Karte GK 25 sowie ein Bohrprofil eines auf dem Gaswerksgelände vorhandenen Löschwasserbrunnens verwendet.

Hydrogeologisches Arbeitsmodell:

Unterhalb der ca. 8 m mächtigen, quartären Talfüllung aus Kiesen und Sanden folgen die Gesteine des Oberen Muschelkalkes mit einer vermuteten Restmächtigkeit < 50 m.

Die Grundwasserfließrichtung im quartären GWL ist bei normal effluenten Verhältnissen zum Vorfluter hin gerichtet. Der Flurabstand liegt im Bereich von 3 - 4 m.

Der Ruhewasserspiegel des im Oberen Muschelkalk verfilterten Löschwasserbrunnens deutet auf ge-spannte Verhältnisse hin. Es ist anzunehmen, daß durch eine verlehnte Verwitterungsdecke des Oberen Muschelkalk eine hydraulische Trennung der GWL stattfindet.

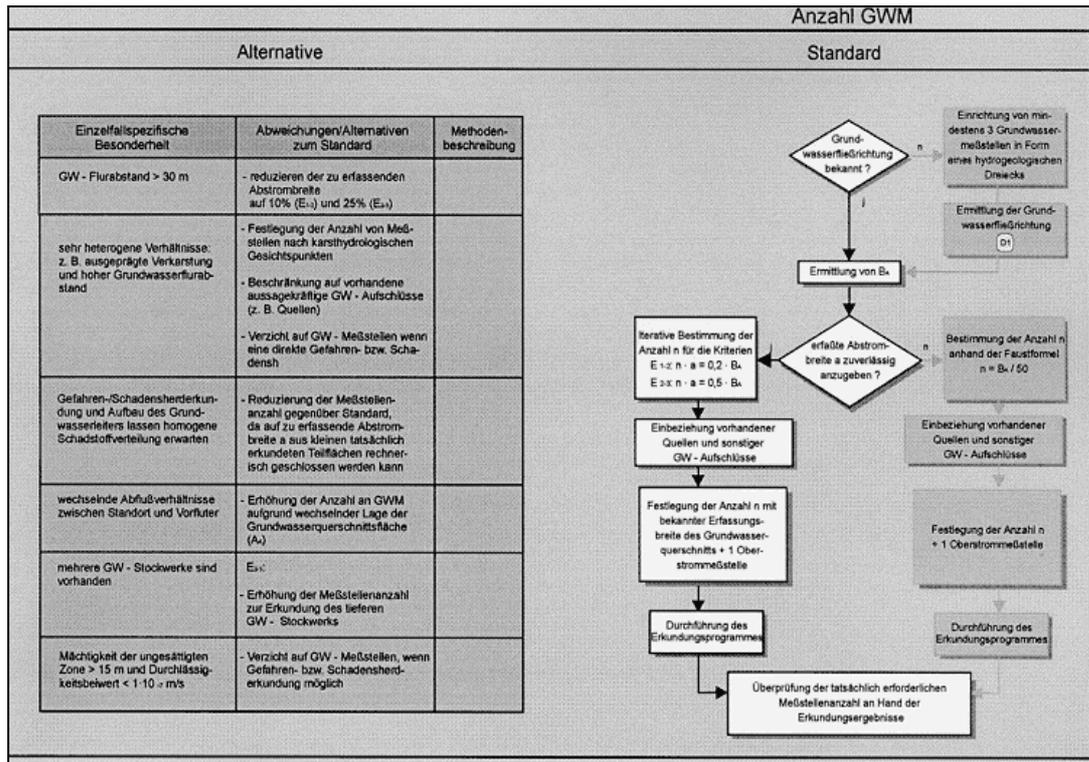
Hydraulische Kennwerte lagen für beide GWL nicht vor.

Nähere Erkundung

Durch die orientierende Erkundung wurde das bestehende hydrogeologische Arbeitsmodell des quartären GWL anhand hydraulischer und geometrischer Kennwerte bestätigt und bildet die Arbeitsgrundlage für die nähere Erkundung.

Da sich die orientierende Erkundung mit ihren technischen Maßnahmen nur auf den ersten betroffenen GWL bezog, konnte das hydrogeologische Arbeitsmodell für den zweiten GWL gegenüber dem Kenntnisstand auf Beweisniveau BN1 nicht weiter verbessert werden.

3. Anzahl GWM



Diagramm

Orientierende Erkundung

Anhand der Lage der ehemaligen Gebäude, der vorausgegangenen Schadensherdenerkundung und der angenommenen Grundwasserfließrichtung konnte die Abstrombreite zu $B_A = 50$ m bestimmt werden. Hierdurch ergibt sich eine für E_{1-2} geforderte Erfassungsbreite von $0,2 B_A = 10$ m. Unter Berücksichtigung des Kriteriums $a \leq 20$ m ergibt sich bei einer Erfassungsbreite der Einzel-meßstelle von $a = 10$ m eine Anzahl GWM von:

$$n = \frac{0,2 B_A}{a} = \frac{10 \text{ m}}{10 \text{ m}} = 1$$

Mit Annahmen für I , n_f und k_f ergibt sich mit der Formel von BEAR & JACOBS bei einer hydrogeologisch sinnvollen Pumprate von $0,001 \text{ m}^3/\text{s}$ eine Pumpdauer von ($x = 0$ m; $y = 5$ m):

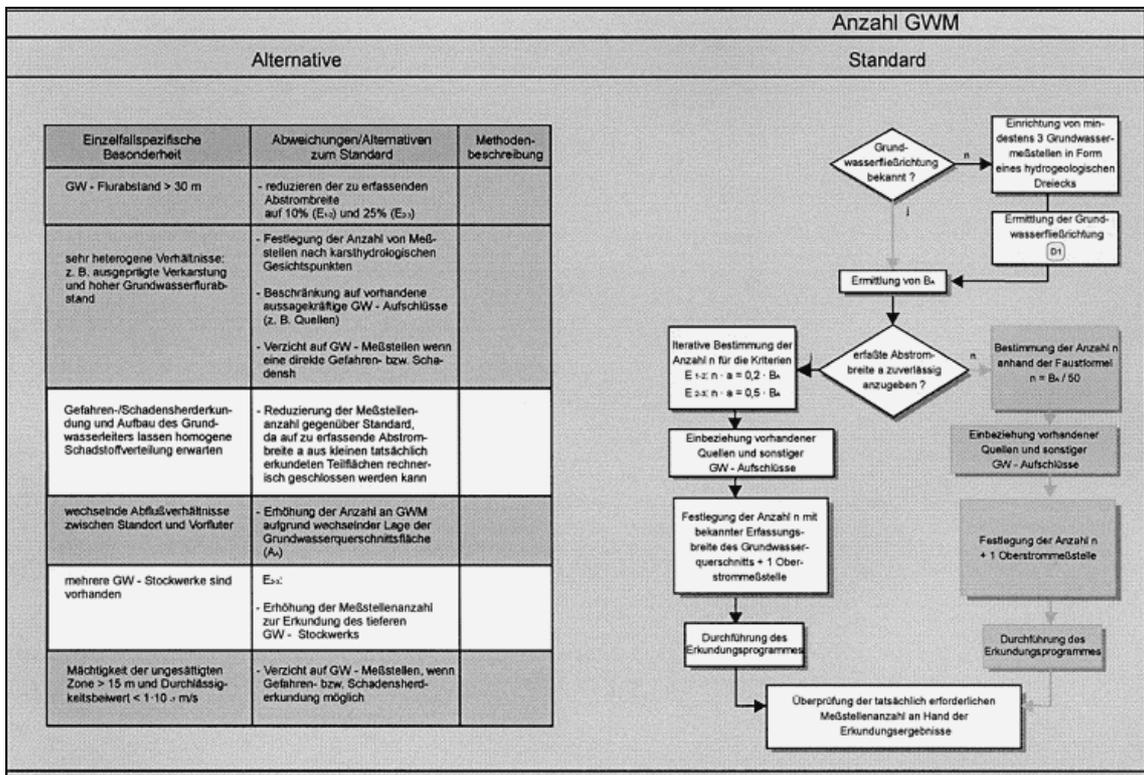
$$t_{PV} = \left(\frac{0,15 \cdot 0,001 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot 86400}{2 \cdot \pi \cdot (0,432 \text{ m d}^{-1})^2 \cdot 5 \text{ m}} \cdot \left(-\ln \left(\cos \left(5 \text{ m} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 5 \text{ m} \cdot 0,432 \text{ m d}^{-1}}{0,001 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot 86400} \right) \right) \right) \right) \cdot 24$$

= 18 h

Zur Vermeidung einer Verdünnung durch influente Verhältnisse bei Pumpversuchen mit großen Erfassungsbreiten wurden statt einer insgesamt zwei Meßstellen im Abstrom eingerichtet.

Zur Bestimmung der Grundwasserfließrichtung und des hydraulischen Gradienten wurde kostengünstig ein 2"-Peilrohr im Zustrom eingerichtet.

Zur Untersuchung des tieferen Grundwasserleiters wurde zunächst auf die Einrichtung von Meßstellen verzichtet.



Diagramm

Nähere Erkundung

Die hydrogeologischen und chemischen Ergebnisse der vorausgegangenen Grundwassererkundung deuten auf eine zulässige Regionalisierbarkeit von Meßwerten im quartären GWL hin.

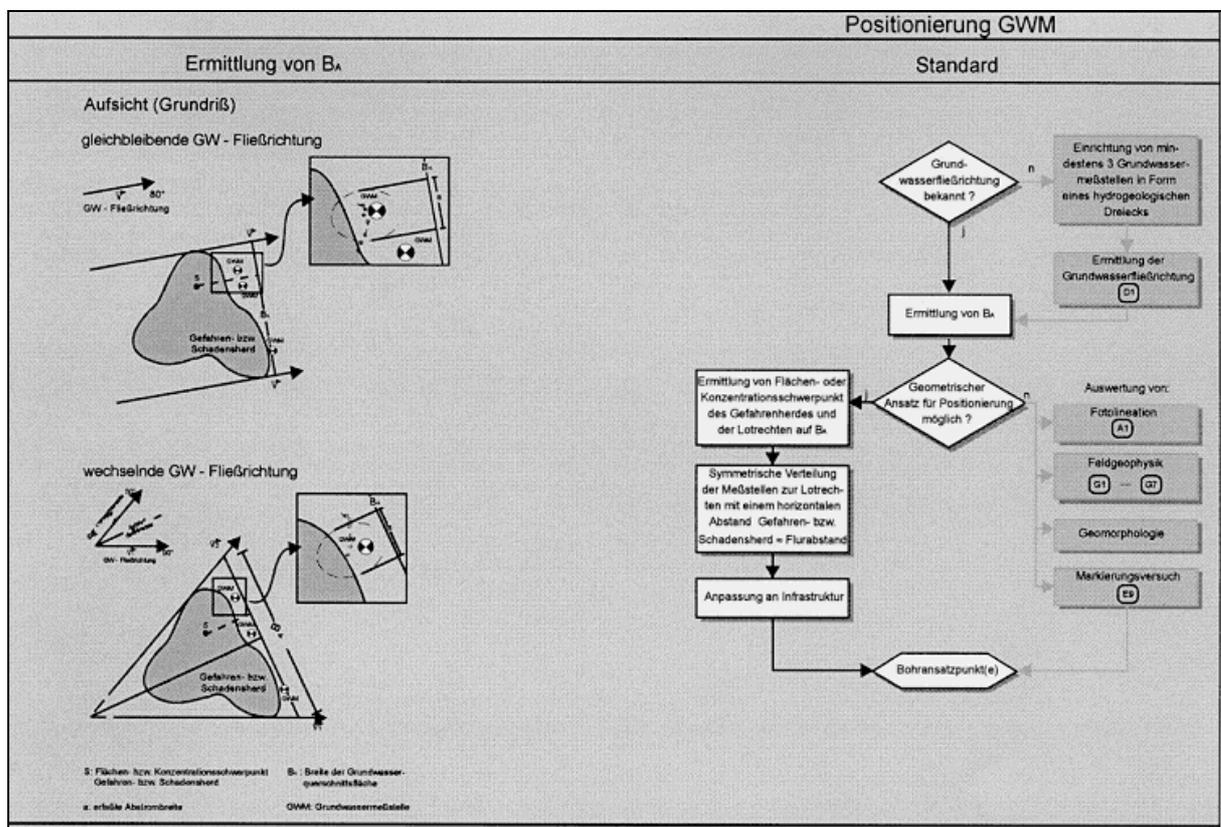
Da eine Erfassung von 0,5 B_A durch die bestehende GWM-Anzahl möglich wäre, wurde zunächst auf die Einrichtung weiterer GWM verzichtet.

Bedingt durch die Ungewißheit über die genaue Grundwasserfließrichtung im Muschelkalk-GWL wurden zwei tiefe Meßstellen zusätzlich zum Löschwasserbrunnen eingerichtet (hydrogeologisches Dreieck).

Nach Bestimmung der Grundwasserfließrichtung und der Ermittlung der Abstrombreite zu $B_A = 40 \text{ m}$ ist unter Einhaltung des Kriteriums $a \leq 20 \text{ m}$ keine weitere Meßstelle zur Erfassung von $0,5 B_A$ notwendig.

$$n = \frac{0,5 B_A}{a} = \frac{20 \text{ m}}{20 \text{ m}} = 1$$

4. Positionierung



Diagramm

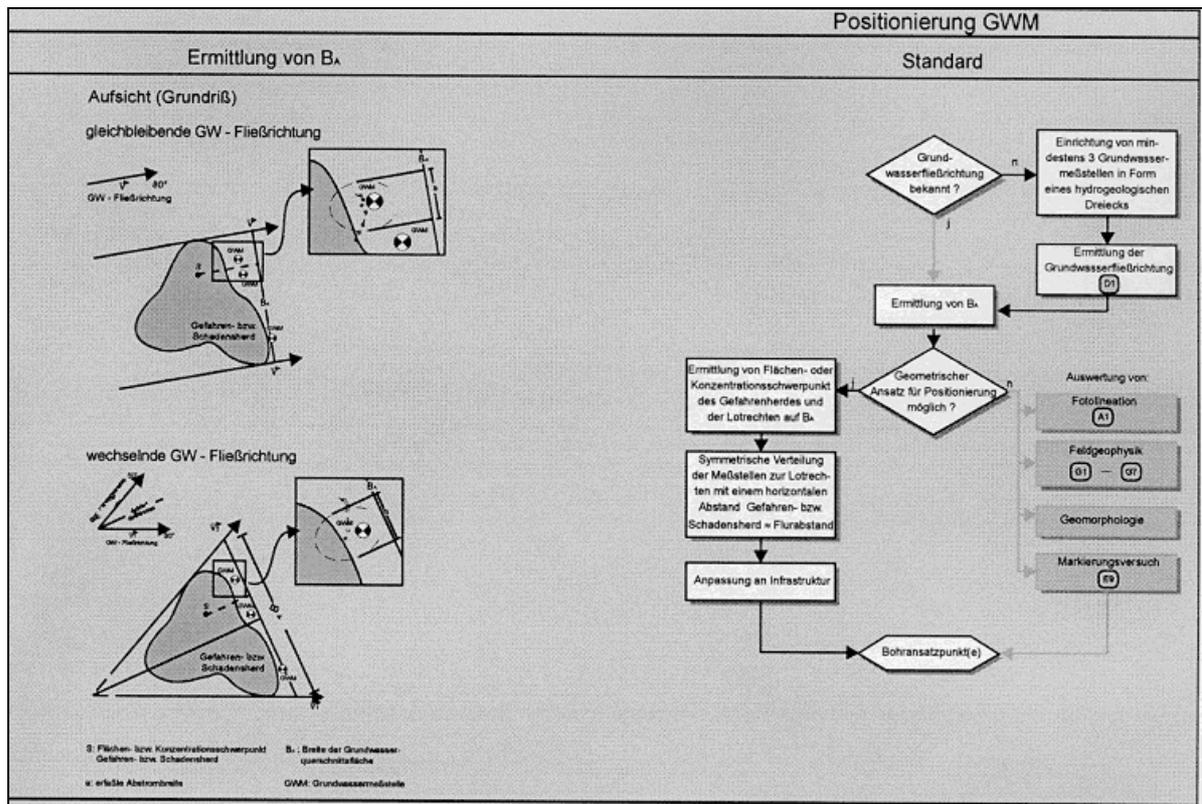
Orientierende Erkundung

Die zwei abstromigen Meßstellen im Quartär wurden nach Maßgabe durch die Belastungsschwerpunkte (ehemalige Teergruben) in deren vermuteten Abstrom positioniert.

Bei einem zu kleinen Abstand zu den Teergruben bestand die Gefahr, beim Bohren eine Teerlinse zu erfassen und damit unweigerlich Schadstoffe in das Grundwasser zu verschleppen.

Zur Vermeidung dieser Gefahr wurden die GWM in einem größeren Abstand von den Teergruben (hier: 10 m) positioniert.

Zur Bestimmung der Grundwasserfließrichtung und des hydraulischen Gradienten wurde ein 2"-Peilrohr im Oberstrom eingerichtet.



Diagramm

Nähere Erkundung

Zur Bestimmung der Grundwasserfließrichtung im Muschelkalk-GWL wurde eine Anordnung der GWM in Form eines hydrogeologischen Dreiecks gewählt. Im Hinblick auf die spätere Nutzung als Probennahmepunkt erfolgte die Positionierung so, daß zwei Meßstellen im vermuteten Abstrom lagen. Im vorliegenden Fall wurde hierfür eine Abstromrichtung NE bis SE angenommen.

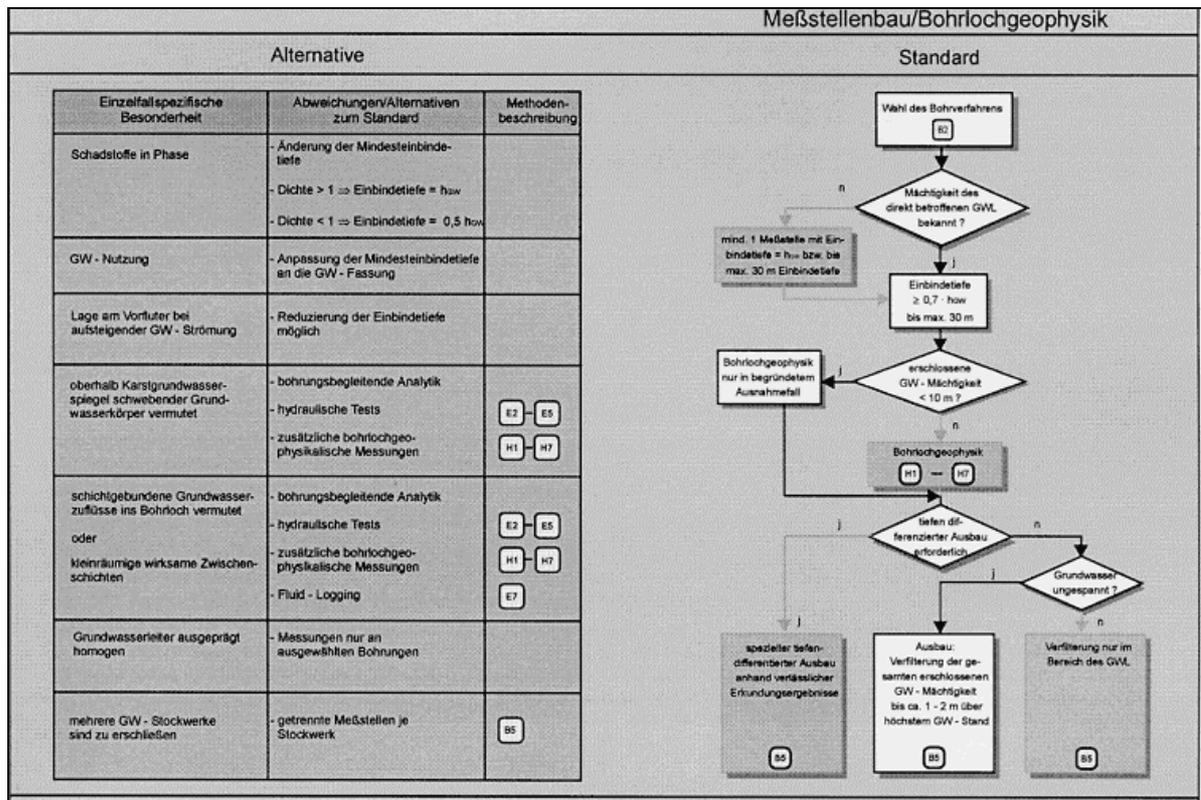
Die Annahme zur Grundwasserfließrichtung resultierte aus Überlegungen zu

- Lage zum Vorfluter
- Schichteinfallen
- Talverlauf
- Hauptkluftrichtungen.

Aus diesen Überlegungen wurde je eine tiefe Meßstelle östlich und nordöstlich zu den Hauptschadenszentren eingerichtet.

Die Stichtagsmessung ergab eine Grundwasserfließrichtung in nordöstlicher Richtung. Hierdurch lag eine Meßstelle im direkten und eine im randlichen Abstrom der Schadensherde.

5. Meßstellenbau/Bohrlochgeophysik



Diagramm

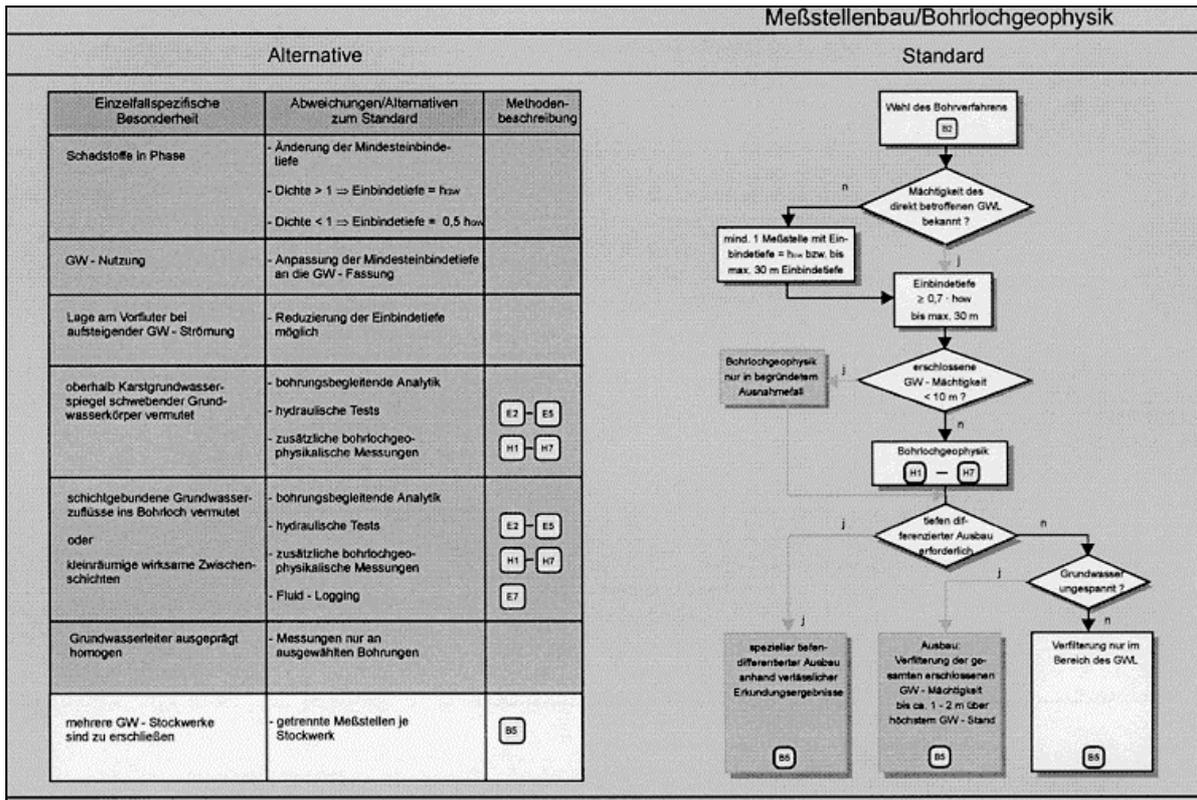
Orientierende Erkundung

Die abstromigen GWM im Quartär wurden als vollkommene Brunnen mit 5"-PVC-Verrohrung und einer Verfilterung bis 1 m über den höchsten Grundwasserstand ausgebaut. Die Meßstellentiefe betrug 8 m bei 5 m Grundwassermächtigkeit.

Durch die geringe Grundwassermächtigkeit von 5 m erübrigte sich die Durchführung von bohrlochgeophysikalischen Versuchen.

Die Zustrommeßstelle, die lediglich zur Beobachtung des Grundwasserstandes dienen soll, wurde kostengünstig als 2"-Peilrohr mit einer Grundwassereinbindetiefe von 2 m ausgeführt.

Zur Eignungsprüfung des vorhandenen Löschwasserbrunnens für eine geplante Probennahme erfolgte vor der Probennahme eine Kontrolle des Ausbaus mittels Bohrlochgeophysik.



Diagramm

Nähere Erkundung

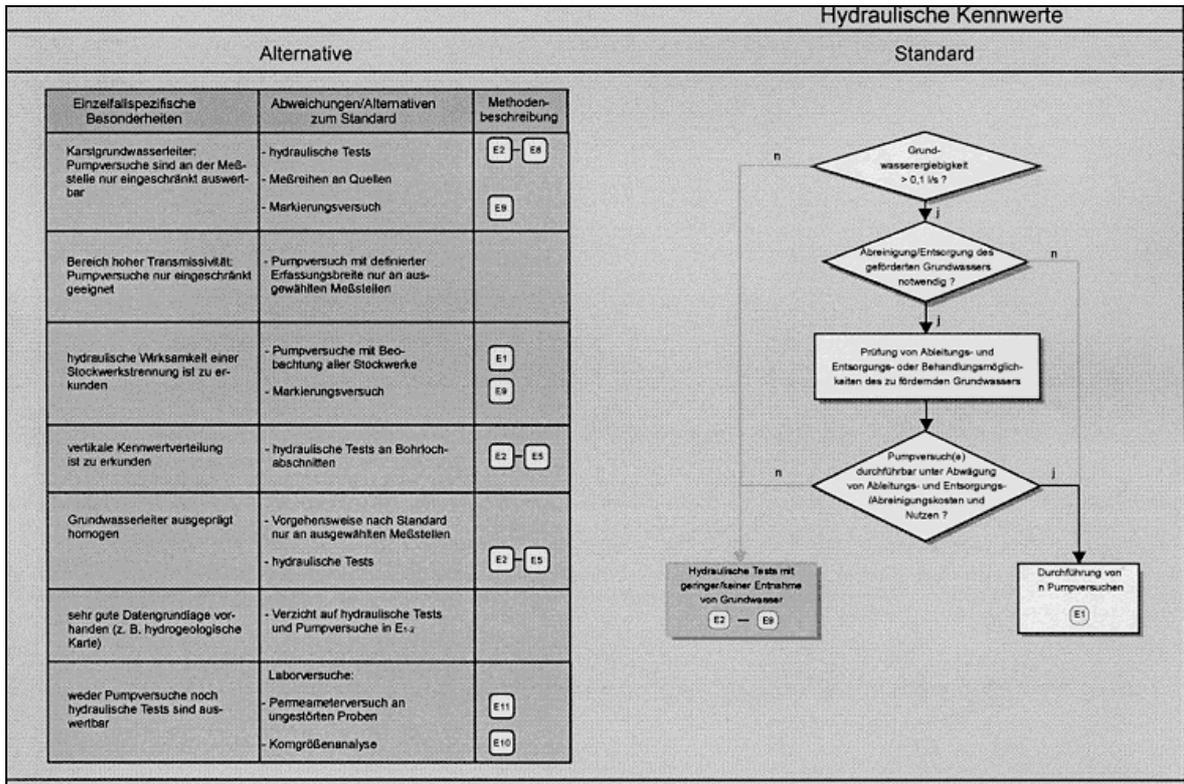
Zur Ermittlung der Grundwassermächtigkeit wurde zunächst eine Bohrung bis zur Basis des Oberen Muschelkalkes bis 58 m u. GOK niedergebracht.

Anhand der durchgeführten Bohrlochgeophysik konnten mehrere Wasserzutritte über die volle Bohrtiefe nachgewiesen werden. Die Zutritte gehören dem gleichen Grundwasserleiter an.

Der Ausbau der Grundwassermeßstellen erfolgte mit einer maximalen Einbindetiefe von 30 m in den Muschelkalk-GWL.

Mit dem Ziel tiefengemittelte Grundwasserproben zu entnehmen, wurde die volle Einbindetiefe im unverwitterten Muschelkalk-GWL durchgängig verfiltert.

6. Hydraulische Kennwerte



Diagramm

Orientierende Erkundung

In Anbetracht des vermutlich mittel bis stark belasteten Grundwassers wurde auf die Durchführung von umfangreichen hydraulischen Versuchen verzichtet.

Stattdessen wurden an den zwei abstromigen Meßstellen zur Ermittlung der Durchlässigkeiten Kurzpumpversuche (2 h-Absenkung, 1 h-Wiederanstieg) mit einer vorsorglichen Abreinigung des geförderten Wassers über eine mobile Aktivkohleeinheit durchgeführt.

Ausgewertet wurde der Wiederanstieg nach THEIS.

Transmissivitäten

Meßstelle 1	$8,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
Meßstelle 2	$6,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

Nähere Erkundung

Für den quartären GWL wurden keine weiteren hydraulischen Versuche durchgeführt.

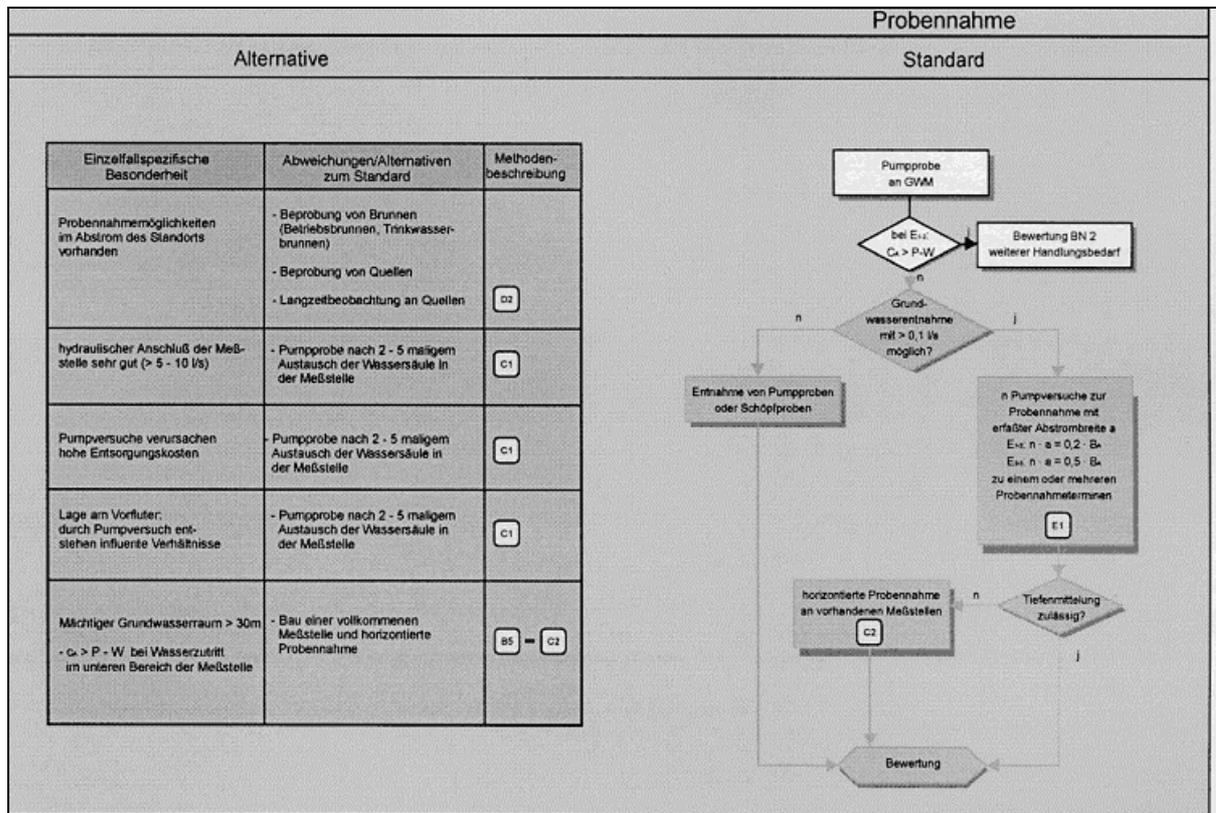
Zur orientierenden Bestimmung hydraulischer Kennwerte und der Schadstoffbelastung des Muschelkalk-GWL wurden in den zwei abstromig gelegenen GWM je ein Kurzpumpversuch (3 h-Absenkung, 1 h-Wiederanstieg) durchgeführt.

Ausgewertet wurde der Wiederanstieg nach THEIS.

Transmissivitäten

Meßstelle 3	$1,1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
Meßstelle 4	$2,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$

7. Probennahme

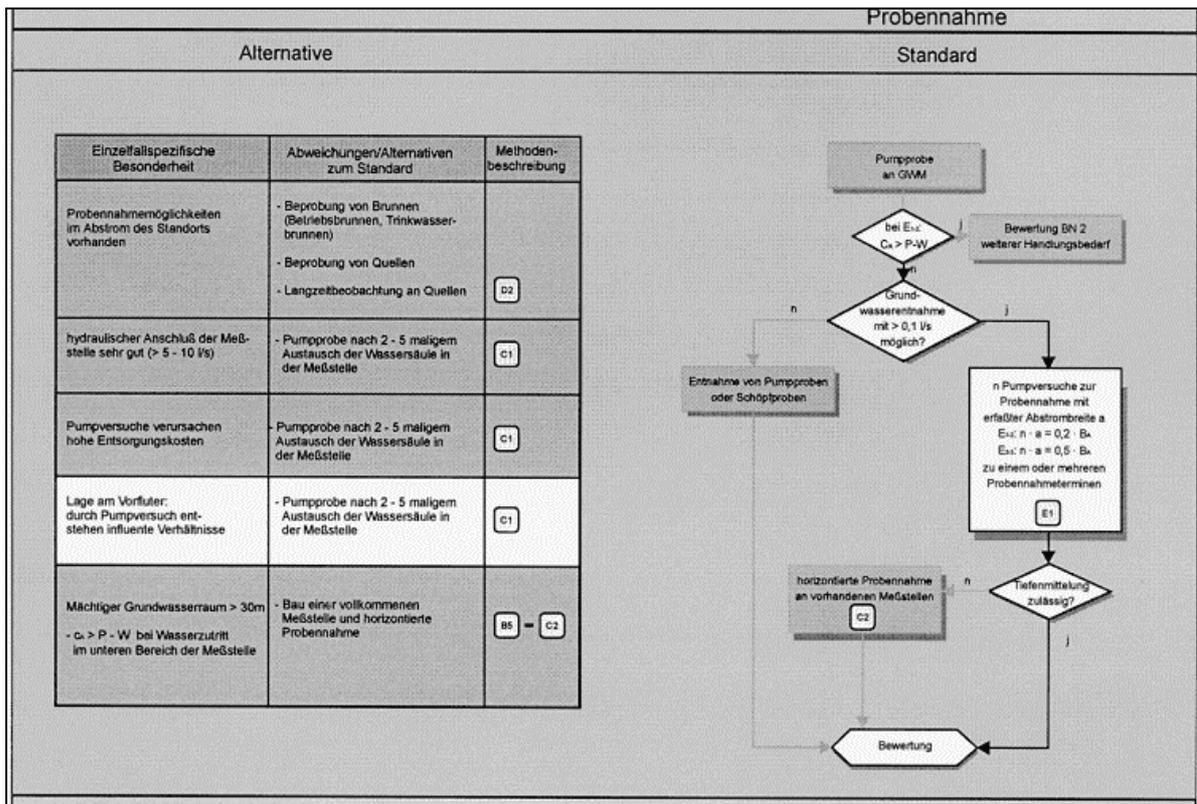


Diagramm

Orientierende Erkundung

Die Probennahme erfolgte jeweils am Ende der Kurzpumpversuche.

Durch die nachgewiesene Überschreitung des Prüfwertes wurde auf die Durchführung von Pumpversuchen zur Probennahme verzichtet.



Diagramm

Nähere Erkundung

Zur Absicherung der chemischen Befunde im quartären GWL wurden an den zwei abstromigen GWM Pumpproben entnommen.

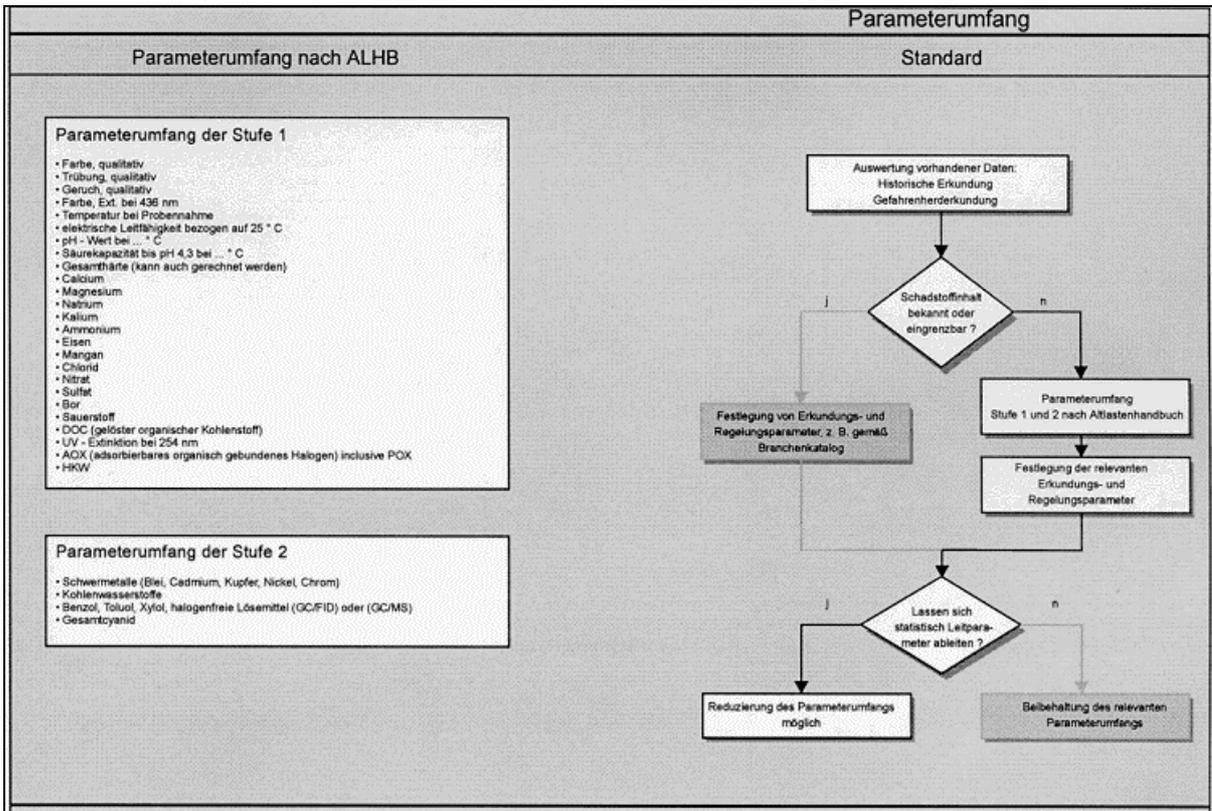
Aus den vier folgenden Gründen wurde auf eine hydraulische Erfassung von $0,5 B_A$ verzichtet.

- Die hydrogeologischen und chemischen Befunde erlauben eine Regionalisierbarkeit von punktuellen Meßwerten.
- Das Bekanntsein der genauen Lage der Schadensherde und eine durch Stichtagsmessungen abgesicherte Grundwasserfließrichtung minimieren die Unsicherheiten bei der Erfassung kontaminierter Teilströme.
- Während der Pumpversuche zur Erfassung von $0,5 B_A$ kann es zu einer großräumigen Verschleppung von Schadstoffen kommen.
- Während der Pumpversuche zur Erfassung von $0,5 B_A$ kann es zu influenten Verhältnissen und damit zu einer starken Verdünnung der Schadstoffkonzentrationen kommen.

Zur Ermittlung der Schadstoffkonzentrationen des Muschelkalk-Grundwassers wurden während der hydraulischen Kurzpumpversuche Proben entnommen.

Im Gegensatz zum homogenen Quartär-GWL wurden im heterogenen Muschelkalk-GWL Proben zu Beginn und zum Ende der Kurzpumpversuche entnommen.

8. Parameterumfang



Diagramm

Orientierende Erkundung

Da über die allgemeine Beschaffenheit des Grundwassers keine Kenntnisse vorhanden waren, wurde an allen Meßstellen eine Übersichtsanalyse der Parameterstufe 1 + 2 + 3 (PAK, Phenole) gemäß ALHB durchgeführt. Durch die Übersichtsanalysen kann eine hydrochemische Charakterisierung der Grundwässer aus Quartär und Muschelkalk vorgenommen werden.

In den zwei quartären GWM und im Löschwasserbrunnen wurden P-W-Wert-Überschreitungen für Naphthalin festgestellt.

Tiefengemittelte Probennahme c_A :

Naphthalin (P-W: 2 µg/l)

Meßstelle 1	78 µg/l
Meßstelle 2	202 µg/l
Löschwasserbrunnen	35 µg/l

Nähere Erkundung

Um hydrochemische Hinweise auf eine hydraulische Verbindung der Grundwässer im Quartär und im Muschelkalk zu bekommen, wurden die Proben aus den tieferen GWL ebenfalls anhand von Übersichtsanalysen der Parameterstufe 1 + 2 + 3 (PAK, Phenole) gemäß ALHB untersucht.

Für die Abreinigung des belasteten Grundwassers zur Einleitung in den Kanal wurde eine mobile Aktivkohleanlage eingesetzt.

Tiefengemittelte Probennahme c_A :

Naphthalin (P-W: 2 µg/l)

Quartär

Meßstelle 1	62 µg/l
Meßstelle 2	272 µg/l

Oberer Muschelkalk

	Anfang	Ende
Meßstelle 3	10 µg/l	8,1 µg/l
Meßstelle 4	< Nachweisgr.	1,3 µg/l
Löschwasserbrunnen	26 µg/l	---

9. Emissionsermittlung über Grundwassererkundung und Plausibilitätskontrolle

Orientierende Erkundung

Emissionsermittlung

Die Berechnung der E(A)-Werte für die Szenarien min/mittel/max erfolgt anhand der Werte aus der Tabelle "11. Hydrogeologische Parameter".

Emissionen E(A):

Naphtalin E_{\max} -W: 4,5 g/d

	min	mittel	max
E(A)	0,5 g/d	4,2 g/d	10,5 g/d

Die maximal zulässige Emission wird für das Max- Szenarium überschritten.

Plausibilitätskontrolle:

Die Werte für E(SH) fallen gegenüber den Werten für E(A) deutlich niedriger aus (vgl. Tabelle "11. Hydrogeologische Parameter").

Es ist anzunehmen, daß der Hauptaustrag nicht über Sickerwasser (GWN), sondern über die in-situ-Elution von Schadstoffen über im Grundwasser-/Grundwasserwechselbereich liegende Teerverunreinigungen stattfindet.

Nähere Erkundung

Emissionsermittlung:

Die Emissionsermittlung im quartären GWL erfolgt analog $E_{1,2}$ unter Berücksichtigung der zusätzlichen Analysenergebnisse. Es soll deshalb hier auf die Ermittlung nicht näher eingegangen und nur noch die Emission im Muschelkalk-GWL näher betrachtet werden.

Als Berechnungsgrundlage für den Muschelkalk-GWL dient eine als orientierend zu bezeichnende Datengrundlage, die sicherlich einer Absicherung durch weitere Erkundungsmaßnahmen im Rahmen von $E_{2,3}$ bedarf.

Die Erkundungsergebnisse belegen, daß trotz der gespannten Verhältnisse im Muschelkalk-GWL ein Eintrag von Schadstoffen aus dem darüberliegenden Quartär-GWL erfolgt.

Aus der abgesicherten Grundwasserfließrichtung und den analytischen Befunden konnte die Größe B_A abgeschätzt werden. Da in der östlichen GWM keine Verunreinigung im Ruhezustand festgestellt werden konnte, verläuft die östliche Grenze der Schadstofffahne zwischen

den zwei GWM. Die Westgrenze der Schadstoffahne wird mit dem westlichen Rand der Teergruben gleichgesetzt.

Anhand dieser geometrischen Überlegungen ergibt sich eine Breite von $B_A = 40$ m.

Emissionen E(A):

Naphtalin E_{\max} -W: 4,5 g/d

	min	mittel	max
E(A)	0,2 g/d	3,5 g/d	11,3 g/d

Plausibilitätskontrolle:

Die Emission von Schadstoffen in den tieferen Muschelkalk-GWL erfolgt durch eine Leckage über die verlehnte Verwitterungsschicht.

Die zwischen den GWL ausgetauschten Grundwassermengen können aus der Potentialdifferenz Δh , dem Leckage-Faktor B und der Leckagefläche A_L berechnet werden:

$$Q_L = A_L \cdot B \cdot \Delta h \quad \text{mit } B = k_f / d_s$$

$$Q_L = \text{Leckagerate [m}^3/\text{d]}$$

$$A_L = \text{Leckagefläche [m}^2\text{]}$$

$$B = \text{Leckagefaktor [1/s]}$$

$$\Delta h = \text{Potentialdifferenz [m]}$$

$$d_s = \text{Mächtigkeit der Leckage-Schicht [m]}$$

Mit den Annahmen eines k_f -Wertes von $1 \cdot 10^{-7}$ m/s, einer mittleren Mächtigkeit der verlehnten Verwitterungsschicht von $d_s = 3,0$ m und einer Leckagefläche von ca. 2.000 m² berechnet sich die in den tieferen GWL zusickernde Grundwassermenge zu

$$Q_L = 2.000 \text{ m}^2 \cdot (1 \cdot 10^{-7} \text{ ms}^{-1} / 3 \text{ m}) \cdot 3 \text{ m} \cdot 86400 \text{ s} = 17 \text{ m}^3/\text{d}$$

Mit einer mittleren Grundwasserkonzentration von 140 µg/l im quartären GWL ergibt sich demnach eine Emission in den tieferen GWL von

$$E(A) = Q_L \cdot c_A \cdot 10^{-3} = 2,4 \text{ g/d.}$$

Vergleicht man die Emission berechnet aus der Leckage mit der Emission berechnet aus dem Grundwasser, so zeigt sich eine gute Übereinstimmung.

10. Bewertung

Orientierende Erkundung

Anhand der Prüfwert-Überschreitungen ergibt sich ein weiterer Handlungsbedarf zur Erkundung des

- Schadensherdes
- quartären Grundwasserleiters
- Muschelkalk-Grundwasserleiters

Quartär

- Absicherung der hydrochemischen Werte

Muschelkalk

- Erkundung der GWL-Mächtigkeit
- Erkundung der Schadstoffbelastung im Abstrom
- Erkundung des Belastungstiefganges
- Ermittlung hydraulischer Kennwerte

Nähere Erkundung

Anhand der Prüfwertüberschreitungen sowohl im Quartär- als auch im Muschelkalk-GWL ergibt sich ein weiterer Handlungsbedarf.

Quartär-GWL

Anhand der vorliegenden abgesicherten Daten zur Hydraulik und Hydrochemie kann eine E_{3,4}-Bearbeitung durchgeführt werden.

Muschelkalk-GWL

Für den Muschelkalk-GWL ist im Rahmen der näheren Erkundung eine Absicherung der hydraulischen und hydrochemischen Daten durch eine Erfassung von 0,5 B_A in einer 2. Erkundungsphase notwendig.

Beweisniveau BN3 wurde für den Standort nicht erreicht.

11. Hydrogeologische Parameter

		BN1 / Planung E _{1,2} (vermutet)			BN2 (orientierend)			BN2 (orientierend)		
		min	mittel	max	min	mittel	max	min	mittel	max
Geometrie		Quartär			Quartär			Muschelkalk		
A _{SiWa} [m ²]			750			750				
B _A [m]			50			50		30	40	50
h _{GW} [m]			5			5			37	
A _A [m ²]	B _A · h _{GW}		250			250		1.110	1.480	1.850
h _{KGW} [m]										
A _{KGW} [m ²]	B _A · h _{KGW}									
Hydraulik										
Fließrichtung [°]			90			80			145	
T [m ² /s]		5,0 · 10 ⁻⁵	2,5 · 10 ⁻³	5,0 · 10 ⁻³	8,2 · 10 ⁻⁵	3,5 · 10 ⁻⁴	6,2 · 10 ⁻⁴	1,1 · 10 ⁻²	1,8 · 10 ⁻²	2,5 · 10 ⁻²
k _f [m/s]		1,0 · 10 ⁻⁵	5,0 · 10 ⁻⁴	1,0 · 10 ⁻³	1,6 · 10 ⁻⁵	7,0 · 10 ⁻⁵	1,2 · 10 ⁻⁴	3,0 · 10 ⁻⁴	4,9 · 10 ⁻⁴	6,8 · 10 ⁻⁴
I [-]			0,01			0,02			0,004	
n _f [-]			0,15			0,15			0,02	
a [m]	BEAR & JACOBS		10							
Q _{PV} [m ³ /s]			0,001							
t _{PV} [h]			18							
Volumenströme										
Q _A [m ³ /d]	k _f · A _A · I · 86400	2	108	216	7	30	52	115	251	435
Q _{SiWa} [m ³ /d]	$\frac{A_{SiWa} \cdot GWN}{365000}$		0,7			0,7				
Q _{KGW} [m ³ /d]	k _f · A _{KGW} · I · 86400									
Q _{SH} [m ³ /d]	= Q _{SiWa}		0,7			0,7				
Q _{ZT} [m ³ /d]	= Q _A - Q _{SH}	1	107	215	6	29	51			
GWN [mm/a]			320			320				
Emission										
c _Z [µg/l]										
c _{SH} [µg/l]					75	312	1.328			
c _A [µg/l]					78	140	202	1,3	14	26
E(SH) [g/d]	Q _{SH} · c _{SH} · 10 ⁻³				0,05	0,2	0,9			
E(A) [g/d]	(Q _A · c _A - Q _{ZT} · c _Z) · 10 ⁻³				0,5	4,2	10,5	0,2	3,5	11,3

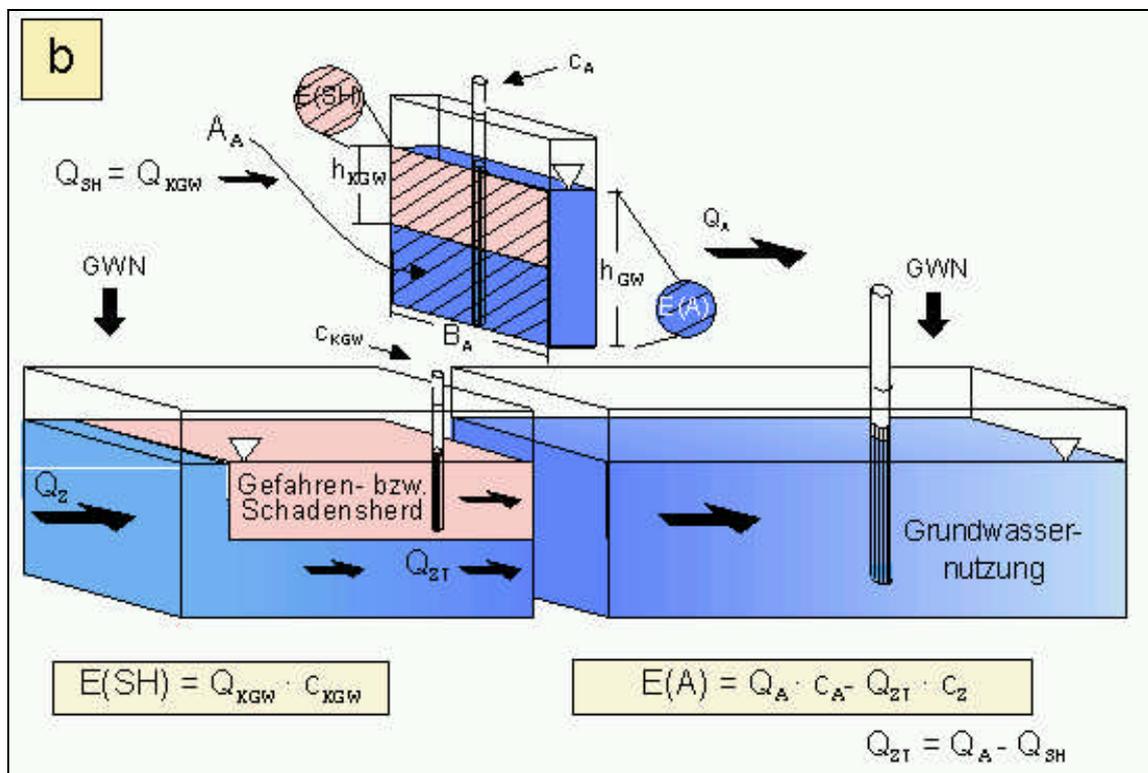
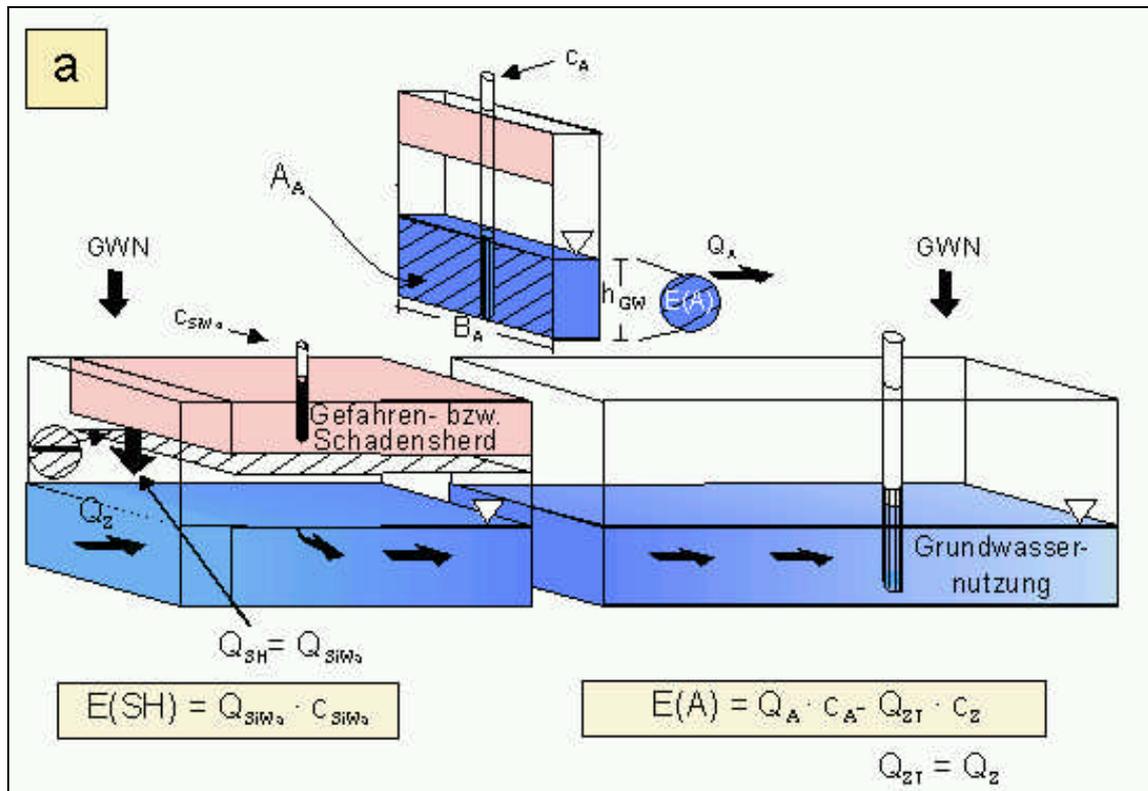
A. Anhang

1. Legende

Abkürzungsverzeichnis (Auszug)

A_A	Grundwasserquerschnittsfläche im unmittelbaren Abstrom des Gefahren- bzw. Schadensherdes $A_A = B_A \cdot h_{GW}$ [m^3]
B_A	Breite der Grundwasserquerschnittsfläche A_A [m]
c_A	Schadstoffkonzentration im Grundwasserabstrom eines Gefahren- bzw. Schadensherdes [$\mu g/l$]
c_{KGW}	Schadstoffkonzentration im Kontaktgrundwasser des Gefahren- bzw. Schadensherdes [$\mu g/l$]
c_{SiWa}	Schadstoffkonzentration im Sickerwasser des Gefahren- bzw. Schadensherdes [$\mu g/l$]
c_{SH}	Überbegriff für c_{SiWa} und c_{KGW} :
$c_{SH} = c_{SiWa}$	bei Lage des Gefahren- bzw. Schadensherdes in der ungesättigten Zone
$c_{SH} = c_{KGW}$	bei Lage des Gefahren- bzw. Schadensherdes in der gesättigten Zone
c_Z	Schadstoffkonzentration im Grundwasserzustrom [$\mu g/l$]
$E(A)$	Emission von Schadstoffen aus dem Gefahren- bzw. Schadensherd in das Grundwasser berechnet aus der Grundwassererkundung [g/d]
$E(SH)$	Emission von Schadstoffen aus dem Gefahren- bzw. Schadensherd in das Grundwasser berechnet aus der Gefahren- bzw. Schadensherderkundung [g/d]
GWN	Grundwasserneubildung [mm/a]
h_{GW}	Grundwassermächtigkeit [m]
h_{KGW}	Kontaktgrundwassermächtigkeit [m]
Q_A	Grundwasservolumenstrom über die Breite des Gefahren- bzw. Schadensherdes in dessen direktem Abstrom [m^3/d]. Q_A enthält Q_{SH}
Q_{KGW}	Kontaktgrundwasservolumenstrom über die Breite des Gefahren- bzw. Schadensherdes in dessen direktem Abstrom [m^3/d]
Q_{SiWa}	Sickerwasservolumenstrom, der dem Grundwasser nach Durchsickerung von kontaminiertem Material des Gefahren- bzw. Schadensherdes zuströmt [m^3/d]
Q_{SH}	Sickerwasservolumenstrom Q_{SiWa} bzw. Kontaktgrundwasserstrom Q_{KGW} , der nach Durchsickerung von bzw. Kontakt mit kontaminiertem Material dem Grundwasser zufließt [m^3/d]
Q_Z	Grundwasservolumenstrom über die Breite des Gefahren- bzw. Schadensherdes in dessen Zustrom [m^3/d]
Q_{ZT}	Teilstrom von Q_Z , der nicht den Gefahren- bzw. Schadensherd durchströmt [m^3/d]

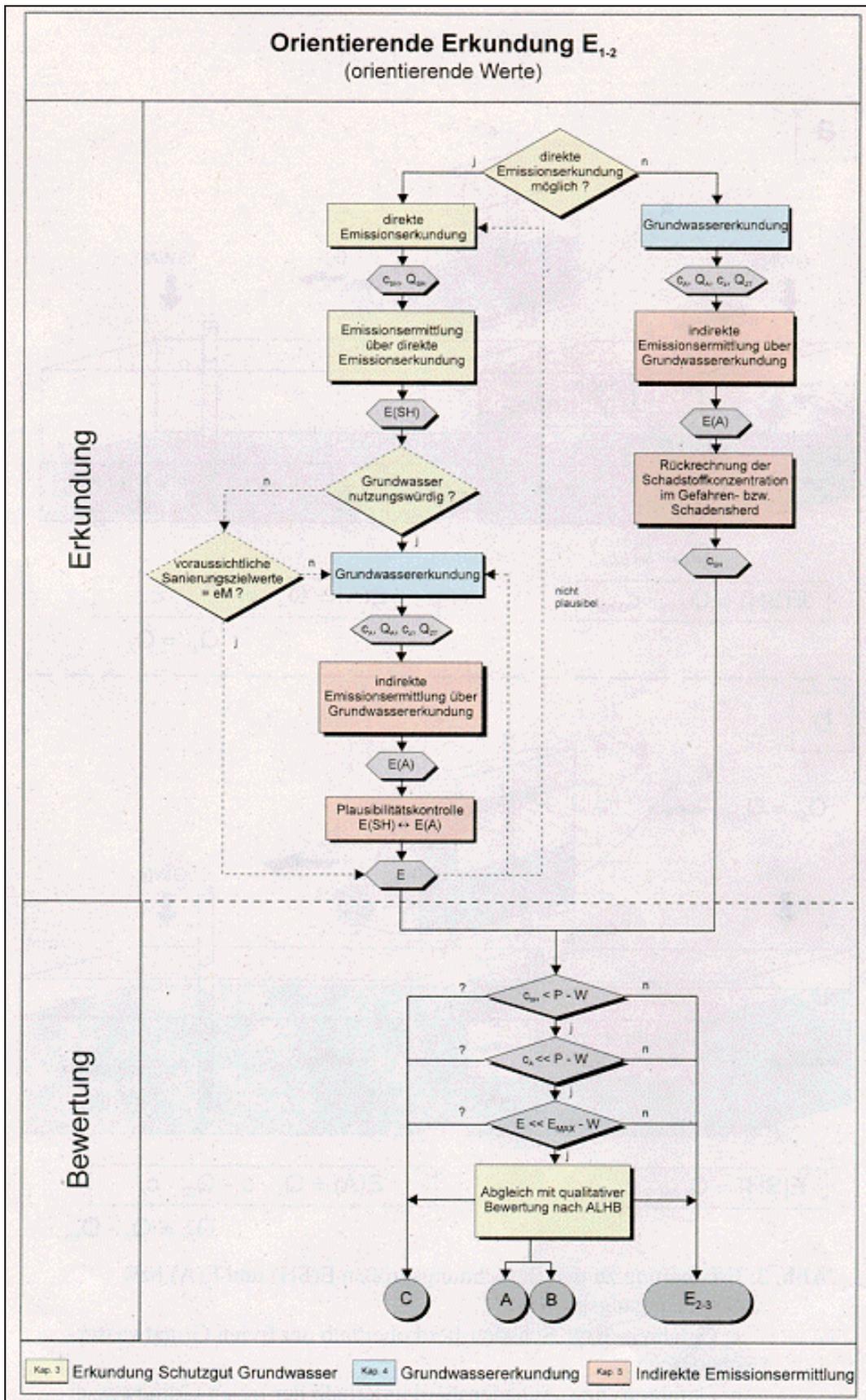
2. Diagramme



Erläuterungen zu den Berechnungsgrößen $E(SH)$ und $E(A)$ bzw. deren Eingangsgrößen

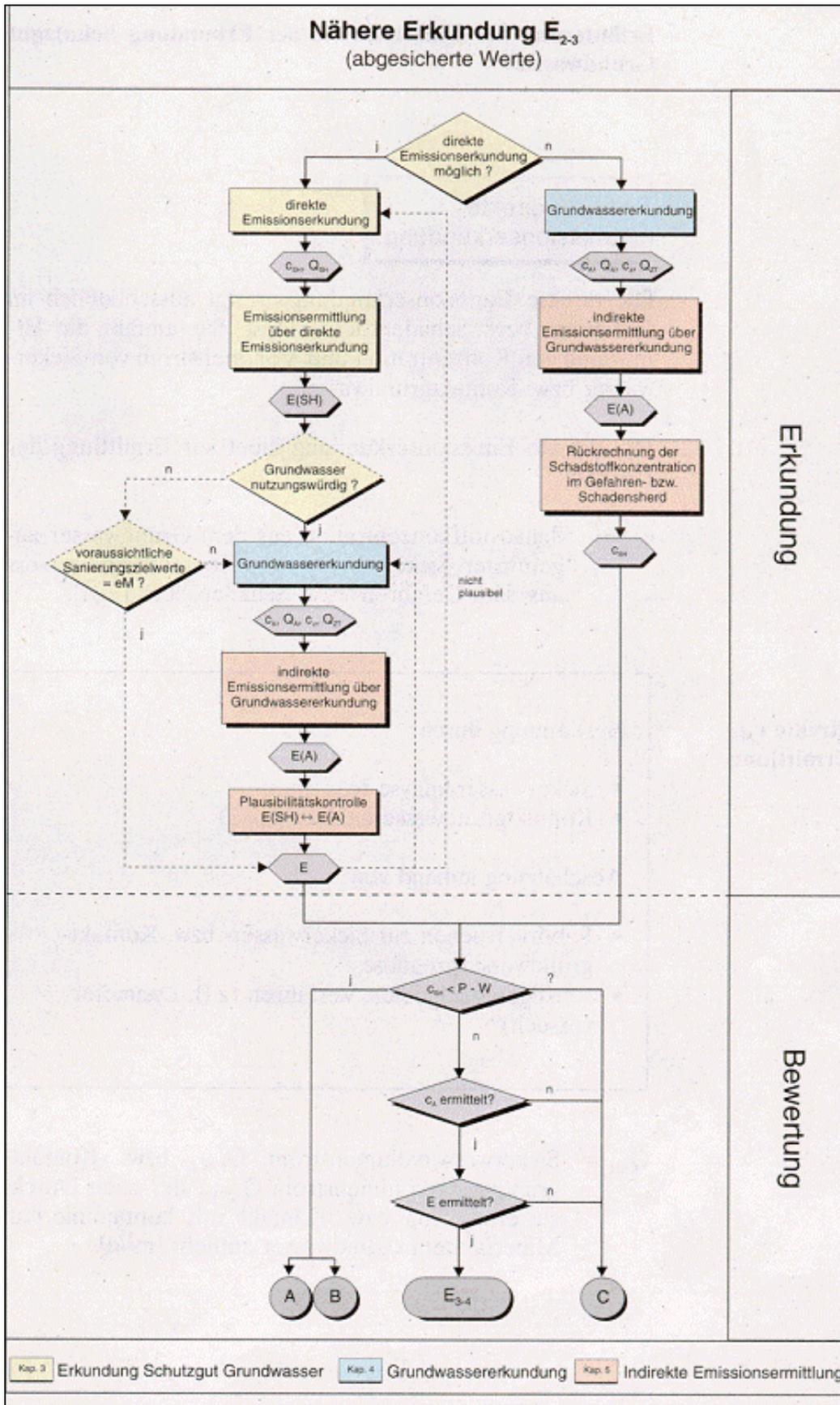
a: Gefahren- bzw. Schadensherd oberhalb der freien Grundwasseroberfläche

b: Gefahren- bzw. Schadensherd unterhalb der freien Grundwasseroberfläche



Strategiediagramm Erkundung Schutzgut Grundwasser

a: Orientierende Erkundung E_{1,2}



b: Nähere Erkundung E_{2,3}

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Einordnung des Leitfadens Erkundungsstrategie Grundwasser	4
Abb. 2:	Benutzung des Leitfadens Erkundungsstrategie Grundwasser	5
Abb. 3:	Erläuterung zu den Berechnungsgrößen E(SH) und E(A) bzw. deren Eingangsgrößen	10
	a: Gefahren- bzw. Schadensherd oberhalb der freien Grundwasseroberfläche	10
	b: Gefahren- bzw. Schadensherd unterhalb der freien Grundwasseroberfläche	10
Abb. 4:	Strategiediagramm Erkundung Schutzgut Grundwasser	11
	a: Orientierende Erkundung	11
	b: Nähere Erkundung	12
Abb. 5:	Erläuterung des 20%-/50%-Kriteriums	19
Abb. 6:	Vorgehensweise zur Aufstellung des Hydrogeologischen Arbeitsmodells	22
	a: Hydrogeologische Parameter	22
	b: Standard	23
Abb. 7:	Vorgehensweise zur Bestimmung der Anzahl Grundwassermeßstellen	27
	a: Alternative	27
	b: Standard	28
Abb. 8a:	Zylinderformel	30
Abb. 8b:	Darstellung der Ortskoordinaten zur Strömungsgleichung nach <i>BEAR & JACOBS</i>	31
Abb. 9:	Positionierung Grundwassermeßstellen	34
	a: Ermittlung von B_A	34
	b: Standard	35
Abb. 10:	Vorgehensweise bei Meßstellenbau und Festlegung von bohrlochgeophysikalischen Untersuchungen.	38
	a: Alternative	38
	b: Standard	39
Abb. 11:	Eignung von Bohrlochtests für verschiedene Durchlässigkeitsbeiwerte -	41
Abb. 12:	Vorgehensweise zur Bestimmung hydraulischer Kennwerte	43
	a: Alternative	43
	b: Standard	44
Abb. 13:	Vorgehensweise zur Probennahme	47
	a: Alternative	47
	b: Standard	48
Abb. 14:	Vorgehensweise zur Festlegung des Parameterumfangs	51
	a: Parameterumfang nach ALHB	51
	b: Standard	52
	Erläuterungen zu den Berechnungsgrößen E(SH) und E(A) bzw. deren Eingangsgrößen	154
	a: Gefahren- bzw. Schadensherd oberhalb der freien Grundwasseroberfläche	154
	b: Gefahren- bzw. Schadensherd unterhalb der freien Grundwasseroberfläche	154
	Strategiediagramm Erkundung Schutzgut Grundwasser	155
	a: Orientierende Erkundung E_{1-2}	155
	b: Nähere Erkundung E_{2-3}	156

Test 1:	Kostenrechnung	165
Test 1:	Hydrogeologische Parameter	166
Test 2:	Kostenrechnung	167
Test 2:	Hydrogeologische Parameter	168
Test 3:	Kostenrechnung	169
Test 3:	Hydrogeologische Parameter	170

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Fließzeiten berechnet nach BEAR & JACOBS und nach der Zylinderformel für erfaßte Abstrombreiten von $a = 10$ m und $a = 5$ m im Lockergestein	32
---------	---	----

Indexverzeichnis

2	20%-/50%-Kriterium	19, 25	hydrogeologisches Arbeitsmodell	21
A	Abstrombreite	24, 30, 33, 45	indirekte Emissionsermittlung	8, 14
	Abstrommeßstelle	24	Leitfragen	20
	Ausbautiefe		Parameterlisten	50
	Grundwassermeßstelle	36	Parameterstufen 1 + 2	50
B			Probennahme	45, 46
	Bewertung		Regelungsparameter	50
	Schutzgut Grundwasser	15	Vorgehensweise	18
	Bohrlochgeophysik		Erkundungsmethoden Grundwasser	
	Grundwassermeßstelle	36	Bohrlochtest	41
	Bohrlochtest		F	
	Grundwassererkundung	41	Fallbeispiele	
	Bohrverfahren		Erkundung Grundwasser	56
	Grundwassermeßstelle	36	Grundwassererkundung	56
C			G	
	chemische Parameter		Grundwassererkundung	
	Grundwassererkundung	50	20%-/50%-Kriterium	19, 25, 45
D			Bewertung	15
	Darcy-Gesetz	18	chemische Parameter	50
	direkte Emissionserkundung		direkte Emissionserkundung	8, 13
	Grundwassererkundung	8, 13	Emission	18
E			Erkundungsschritte	9
	Einbindetiefe		Fallbeispiele	56
	Grundwassermeßstelle	36	Grundlagen	6, 8
	Emission		Grundwassermeßstelle	24, 26, 32, 33, 36, 37
	Grundwassererkundung	18	hydraulische Kennwerte	40, 42
	Emissionserkundung, direkte		hydrogeologische Parameter	21
	Grundwassererkundung	8, 13	hydrogeologisches Arbeitsmodell	21
	Emissionsermittlung, indirekte		indirekte Emissionsermittlung	8, 14
	Grundwassererkundung	8, 14	Leitfragen	20
	Erkundung Grundwasser		Parameterlisten	50
	20%-/50%-Kriterium	19, 25, 45	Probennahme	45, 46
	Bewertung	15	Regelungsparameter	50
	chemische Parameter	50	Vorgehensweise	18
	direkte Emissionserkundung	8, 13	Grundwassererkundungsmethoden	
	Emission	18	Bohrlochversuch	41
	Emissionsermittlung	13	Grundwassermeßstelle	
	Erkundungsschritte	9	Allgemeines	24, 26, 32, 33, 36, 37
	Fallbeispiele	56	Ausbautiefe	36
	Grundlagen	6, 8	Bohrlochgeophysik	36
	Grundwassermeßstelle	24, 26, 32, 33, 36, 37	Bohrverfahren	36
	hydraulische Kennwerte	40, 42	Einbindetiefe	36
	hydrogeologische Parameter	21	gespanntes Grundwasser	37
			Grundwasserstockwerke	40
			homogener Grundwasserleiter	40

Lage am Vorfluter.....	40	Pumpversuch	
schwebendes Grundwasser	40	Allgemeines	40
tiefendifferenzierter Ausbau	37	Grundwasserergiebigkeit.....	41
H		Grundwasserstockwerke	42
hydraulische Kennwerte	40	Grundwasserverunreinigung	41
hydrogeologische Parameter		hohe Transmissivität	42
Allgemeines	21	Kluft-/Karstgrundwasserleiter.....	41
hydrogeologisches Arbeitsmodell		R	
Grundlagen	21	Regelungsparameter	
I		Grundwassererkundung	50
indirekte Emissionsermittlung		S	
Grundwassererkundung	8, 14	Schutzgut Grundwasser	
K		Bewertung	15
Kriterium, 20%-/50%	19, 25	Erkundung.....	9
P		T	
Parameterumfang		tiefendifferenzierter Ausbau	
Grundwassererkundung	50	Grundwassermeßstelle	37
Probennahme		Z	
Grundwassererkundung	45, 46, 49	Zustrommeßstelle.....	26
Pumpprobe.....	45	Zylinderformel	30

B. Anhang: Hydrogeologisches Arbeitsmodell

Kurzanleitung

Zur Verwendung der Excel-Tabelle klicken Sie auf den Datei-Namen:
arb_mod.xls!
Sie benötigen Microsoft Excel für Windows Version 5.0.

1 Anwendung des Hydrogeologisches Arbeitsmodells

1.1 Funktionen

Das Hydrogeologische Arbeitsmodell basiert auf dem Leitfaden Erkundungsstrategien Grundwasser der LfU. Es kann bei der Planung von Erkundungsmaßnahmen und bei der Darstellung der Ergebnisse eingesetzt werden. Plausibilitätsprüfungen sind anhand des Modells schnell und einfach durchführbar. Die Basis des Hydrogeologischen Arbeitsmodells ist eine Excel-Tabelle, somit können die Daten beliebig ausgedruckt und in andere Programme eingebunden werden. Diese Tabelle besteht aus zwei Teilen:

Teil I: Kostenrechnung

Die Kostenrechnung ist für die Planung von Erkundungsmaßnahmen gedacht. Basierend auf plausiblen Grunddaten wie B_h , h_{GW} , n_f und der Pumprate kann die kostengünstigste Variante von Meßstellenanzahl und Pumpversuchsdauer ermittelt werden, die ein den Forderungen des Leitfadens entsprechendes Erkundungsergebnis liefert. Durch die Variation von Eingangsparmetern kann außerdem geprüft werden, wie die Kosten von bestimmten Parametern abhängen.

Teil II: Hydrogeologische Parameter

Der zweite Teil liefert die Tabelle "Hydrogeologische Parameter" gemäß S. 28 des Leitfadens. Dieser Teil kann von einer groben Schätzung der Daten bis zur Näheren Erkundung eingesetzt werden. Die zu erfassenden Daten werden eingegeben, die Volumenströme und die Emissionen werden automatisch errechnet.

1.2 Voraussetzungen

Es ist Voraussetzung für den Einsatz des Hydrogeologischen Arbeitsmodells, mit dem Leitfaden Erkundungsstrategie Grundwasser vertraut zu sein.. Die fachlichen Grundlagen werden hier nicht näher erläutert. Alle Formeln, die zur Berechnung eingesetzt werden, sind dem Leitfaden zu entnehmen.

Das Hydrogeologische Arbeitsmodell wurde in Form einer Excel-Tabelle erstellt. Erforderlich ist die Excel-Version 5.0 für Windows. Excel-Kenntnisse werden vorausgesetzt. Programmfunktionen werden hier nicht erläutert.

2 Beschreibung

2.1 Grundsätzliche Hinweise

Die erforderlichen Daten werden direkt in die Zellen der Tabellen (Eingabefelder) eingetragen. Die Tabellen sind mit Ausnahme der Eingabefelder geschützt, so daß Formeln nicht verändert werden können. Die Eingabefelder sind in unterschiedlicher Form markiert:

- dicke Umrandung
- unterstrichen mit Gitternetzlinien. Geschützte Zellen sind weiß hinterlegt, so daß die Gitternetzlinien nicht sichtbar sind.
- Freie Felder in der Tabelle **Hydrogeologische Parameter**. Die Eingabefelder ergeben sich aus der Lage in der Tabelle. Solange noch keine Zahlen eingetragen sind, erscheint in Zellen mit Formeln eine Null. Hier kann nichts eingetragen werden.

Neben den Tabellen **Kostenrechnung** und **Hydrogeologische Parameter** beinhaltet die Datei außerdem noch eine Seite **Abkürzungen** und **Vorlagen**. Die Seite **Abkürzungen** beinhaltet ein Verzeichnis aller Abkürzungen. Dies kann ausgedruckt werden. Die Seite **Vorlagen** wird für die Ausführung einiger Makros benötigt und darf nicht verändert werden.

Die Datei ist schreibgeschützt. Sie kann geöffnet und geändert werden. Sollen diese Änderungen gespeichert werden, muß sie unter einem anderen Namen gespeichert werden. Wenn Sie "Speichern" wählen, erscheint zuerst ein Hinweis, daß die Datei schreibgeschützt ist und dann automatisch die Dialogbox "Speichern unter".

Die Druckeinstellungen sind für den Druck der einzelnen Seiten voreingestellt. Diese Einstellungen sollten nicht geändert werden.

2.2 Kostenrechnung

Die Tabelle **Kostenrechnung** enthält mehrere Eingabefelder, in die Daten eingefügt werden können. Mit Hilfe der "Tab"-Taste kann zwischen Eingabefeldern gesprungen werden. Im Abschnitt *Kosten* werden die zu erwartenden Grundkosten der Erkundungsmaßnahmen eingetragen. Diese sind in Bohrkosten und Erkundungskosten unterteilt. Dieser Abschnitt muß nicht vollständig ausgefüllt werden. Fallen z.B. keine Entsorgungskosten an, wird dieses Feld leer gelassen.

Im Abschnitt *Vorgaben* müssen zwei Felder ausgefüllt werden. Die gewünschte Erfassungsbreite ist standardmäßig auf 20% gesetzt (Orientierende Erkundung). Hier kann jedoch jeder Wert bis 100% eingesetzt werden.

Die Einbindetiefe der Meßstellen kann entweder anteilig in % eingegeben werden (Vorgabe 70%) oder als absoluter Wert in [m]. Bei sehr großen Grundwassermächtigkeiten muß nur die maßgebliche Grundwassermächtigkeit (max. 30m) durchteuft werden. In diesem Fall soll der absolute Wert in [m] eingegeben werden. Der Anteil in % wird dann errechnet. Voreingestellt ist die Eingabe des %-Anteils. Soll ein Absolutwert eingegeben werden, muß das Makro "Einbindetiefe absolut" ausgeführt werden. Dies steht unter dem Menu "Extras" und wird einfach mit der Maus angewählt.

Bei den *Grunddaten* werden plausible Werte eingetragen (Schätzwerte oder Ergebnisse früherer Erkundungen). Die mögliche Pumprate hängt von den Aquifereigenschaften ab und kann nicht beliebig erhöht werden. Sie sollte mit einem Hydrogeologen abgesprochen werden.

Der Abschnitt *Variation der Meßstellenanzahl* liefert die Erkundungskosten in Abhängigkeit von der Meßstellenanzahl. Im Eingabefeld *Minimale Meßstellenanzahl* kann eingetragen werden, wie viele Meßstellen mindestens im Abstrom eingerichtet werden sollen. Die Kostenrechnung bezieht sich nur auf Abstrommeßstellen. Zustrommeßstellen oder sonstige Beobachtungspegel gehen nicht in die Kostenbetrachtung ein.

Die Spalte t_{PV} zeigt die erforderliche Pumpdauer je Meßstelle an, bei der die erforderliche Erfassungsbreite bei der entsprechenden Meßstellenanzahl erreicht wird. Dieser Wert wird mit der Zylinderformel errechnet. Die Zylinderformel liefert Näherungswerte, die bei kurzer Pumpzeit und geringer Absenkung am besten der Realität entsprechen. Die Meßstellenanzahl ist daher so zu wählen, daß die Pumpversuchsdauer keine unrealistisch hohen Werte annimmt. Eine maximal realisierbare Pumpversuchsdauer bzw. Erfassungsbreite sollte mit einem Hydrogeologen abgesprochen werden.

Die Minimale Meßstellenanzahl sollte so gewählt werden, daß die kostengünstigste Erkundungsvariante ungefähr bei der mittleren dargestellten Meßstellenanzahl liegt.

Für den Ausdruck dieser Seite genügt es, das Menu "Datei"-"Drucken" anzuwählen.

2.3 Hydrogeologische Parameter

Die Tabelle Hydrogeologische Parameter entspricht im wesentlichen der Tabelle im Leitfaden.

Bei der Eingabe der Transmissivität T und des k_f -Werts gibt es zwei Möglichkeiten:

- Der k_f -Wert liegt vor, die Transmissivität soll berechnet werden. Dann muß das Makro "*T aus k_f* " im Menu "*Extras*" ausgeführt werden.
- Der Transmissivität liegt vor, der k_f -Wert soll berechnet werden (Voreinstellung). In diesem Fall muß das Makro " *k_f aus T* " ausgeführt werden.

Die Berechnung von $E(SH)$ erfolgt standardmäßig aus der Schadstoffkonzentration c_{SH} im Sickerwasser bzw. aus Eluatanalysen (hier c_{SH}^*). Liegen diese nicht vor, kann c_{SH} auch aus der Schadstoffkonzentration im Grundwasser rückgerechnet werden. Dies wird hier als c_{SH}^{**} bezeichnet. Er kann auch zur Plausibilitätskontrolle verwendet werden. $E(SH)^*$ wird aus c_{SH}^* berechnet (echter Meßwert), $E(SH)^{**}$ wird aus c_{SH}^{**} berechnet (theoretischer Wert).

Soll die Emission für weitere Schadstoffparameter errechnet werden, kann ein weiterer Block zur Emissionsberechnung unten angefügt werden. Hierzu wird das Makro "*Weiterer Parameter*" im Menu "*Extras*" ausgeführt. Dieser Vorgang kann mehrfach durchgeführt werden. Werden mehr als zwei Blöcke zur Emissionsberechnung dargestellt, paßt die Tabelle beim Ausdruck nicht auf eine Seite. Dann muß das Makro "*Druckbereich: 2 S*" im Menu "*Extras*" ausgeführt werden. Soll der Druckbereich wieder auf eine Seite gestellt werden, muß das Makro "*Druckbereich: 1 S*" ausgeführt werden. Der Druckbereich ist für den Druck einer Seite voreingestellt.

Beispiele:

Auftraggeber:

Test 1 = Fallbeispiel 5

Projekt:

Leitfaden S.131

Projektnummer/ Projektbezeichnung:

Kostenrechnung der Erkundungsmaßnahmen**E₁₋₂****Kosten****Bohrkosten:**

Baustelleneinrichtung pro Bohrung:

5.000 DM

Bohrkosten pro lfd Meter:

250 DM

Pumpversuchskosten:

Baustelleneinrichtung pro Pumpversuch:

2.500 DM

Pumpversuchskosten pro Stunde PV:

150 DM

Entsorgungskosten pro m³ abgepumptes Wasser:

5 DM

VorgabenGewünschte Erfassungsbreite [%] (bei E₁₋₂: 20%; bei E₂₋₃: 50%):

20%

Einbindtiefe der Grundwassermeßstellen [%] (von h_{GW}):

18%

Einbindtiefe der Grundwassermeßstellen [m]:

30

GrunddatenB_A [m]:

120

h_{GW} [m]:

170

n_f [-]:

0,01

GW-Flurabstand [m]:

50

Pumprate Q¹⁾ [m³/s]:

0,0005

Erforderliche Erfassungsbreite [m]:

24

Meßstellentiefe [m]:

80

Variation der MeßstellenanzahlMinimale Meßstellenanzahl:

(Meßstellen im Abstrom)

Meßstellenanzahl	Entnahmebreite je Meßstelle [m]	erforderl. t _{PV} ²⁾ [h]	Bohrkosten BE + DM/lfd [DM]	gesamte Pumpzeit [h]	Pumpversuchskosten BE + DM/h + Entsorg. [DM]	Gesamtkosten [DM]
1	24,0	427	25.000	427	70.434	95.434
2	12,0	107	50.000	214	38.967	88.967
3	8,0	47	75.000	142	30.145	105.145
4	6,0	27	100.000	107	26.983	126.983
5	4,8	17	125.000	85	26.087	151.087
6	4,0	12	150.000	71	26.322	176.322
7	3,4	9	175.000	61	27.205	202.205

¹⁾ Hier muß eine realistische Pumprate eingesetzt werden. Diese hängt von den Aquifereigenschaften ab.

²⁾ Da dieser Wert mit der Zylinderformel berechnet wird, wird die Erfassungsbreite bei zu hohem t_{PV} zu groß.

Test 1: Kostenrechnung

Auftraggeber:

Test 1 = Fallbeispiel 5

Projekt:

Leitfaden S.131

Projektnummer/ Projektbezeichnung:

Hydrogeologische Parameter			Stand: Ergebnis		E ₁₋₂	
			min	mittel	max	plausibel
Geometrie						
A _{Siwa}	[m ²]			2.000		
B _A	[m]			120		
h _{GW}	[m]	(u.U. maßgebliches h _{GW})		30		
A _A	[m ²]	B _A · h _{GW}	0	3.600	0	0
h _{KGW}	[m]					
A _{KGW}	[m ²]	B _A · h _{KGW}	0	0	0	0
Hydraulik						
Fließrichtung	[°]			100		
T	[m ² /s]			5,4E-05		
k _f	[m/s]		0,0E+00	1,8E-06	0,0E+00	0,0E+00
I	[-]			0,01		
n _f	[-]			0,01		
a	[m]	BEAR & JACOBS	0,0	14,9	0,0	0,0
Q _{PV}	[m ³ /s]			0,0005		
t _{PV}	[h]			29		
Volumenströme						
Q _A	[m ³ /d]	k _f · A _A · I · 86400	0,0	5,6	0,0	0,0
Q _{Siwa}	[m ³ /d]	(A _{Siwa} · GWN) / 365000	0,0	1,3	0,0	0,0
Q _{KGW}	[m ³ /d]	k _f · A _{KGW} · I · 86400	0,0	0,0	0,0	0,0
Q _{SH}	[m ³ /d]	Q _{Siwa} + Q _{KGW}	0,0	1,3	0,0	0,0
Q _{ZT}	[m ³ /d]	= Q _A - Q _{SH}	0,0	4,3	0,0	0,0
GWN	[mm/a]			230		
Emission für:			E _{max} [g/d] :		P-W [µg/l]:	
c _Z	[µg/l]					
c _{SH} *	[µg/l]	(aus Siwa, Eluat)		110703		
c _A	[µg/l]			9950		
c _{SH} ** (aus c _A)	[µg/l]	E(A) / (Q _{Siwa} · 10 ⁻³)	0	9.940	0	0
E(SH)** (aus c _A)	[g/d]	Q _{SH} · c _{SH} ** · 10 ⁻³	0	13	0	0
E(SH)*	[g/d]	Q _{SH} · c _{SH} * · 10 ⁻³	0	140	0	0
E(A)	[g/d]	(Q _A · c _A - Q _{ZT} · c _Z) · 10 ⁻³	0	56	0	0

Test 1: Hydrogeologische Parameter

Auftraggeber:

Test 2 = Fallbeispiel 1

Projekt:

Leitfaden S.73

Projektnummer/ Projektbezeichnung:

Kostenrechnung der Erkundungsmaßnahmen**E₁₋₂****Kosten****Bohrkosten:**

Baustelleneinrichtung pro Bohrung:

5.000 DM

Bohrkosten pro lfd Meter:

250 DM

Pumpversuchskosten:

Baustelleneinrichtung pro Pumpversuch:

2.500 DM

Pumpversuchskosten pro Stunde PV:

150 DM

Entsorgungskosten pro m³ abgepumptes Wasser:

5 DM

VorgabenGewünschte Erfassungsbreite [%] (bei E_{1,3}: 20%, bei E_{2,3}: 50%):

20%

Einbindetiefe der Grundwassermeßstellen [%] (von h_{GW}):

43%

Einbindetiefe der Grundwassermeßstellen [m]:

30

GrunddatenB_A [m]:

300

h_{GW} [m]:

70

n_f [-]:

0,2

GW-Flurabstand [m]:

4

Pumprate Q¹⁾ [m³/s]:

0,01

Erforderliche Erfassungsbreite [m]:

60

Meßstellentiefe [m]:

34

Variation der MeßstellenanzahlMinimale Meßstellenanzahl:

(Meßstellen im Abstrom)

Meßstellenanzahl	Entnahmebreite je Meßstelle [m]	erforderl. t _{PV} ²⁾ [h]	Bohrkosten BE + DM/lfdm [DM]	gesamte Pumpzeit [h]	Pumpversuchskosten BE + DM/h + Entsorg. [DM]	Gesamtkosten [DM]
3	20,0	122	40.500	367	128.451	168.951
4	15,0	69	54.000	275	100.713	154.713
5	12,0	44	67.500	220	85.071	152.571
6	10,0	31	81.000	183	75.476	156.476
7	8,6	22	94.500	157	69.336	163.836
8	7,5	17	108.000	137	65.357	173.357
9	6,7	14	121.500	122	62.817	184.317

¹⁾ Hier muß eine realistische Pumprate eingesetzt werden. Diese hängt von den Aquifereigenschaften ab.

²⁾ Da dieser Wert mit der Zylinderformel berechnet wird, wird die Erfassungsbreite bei zu hohem t_{PV} zu groß.

Test 2: Kostenrechnung

Auftraggeber:

Test 2 = Fallbeispiel 1

Projekt:

Leitfaden S.89

Projektnummer/ Projektbezeichnung:

Hydrogeologische Parameter		Stand: Ergebnis		E _{1,2}		plausibel
		min	mittel	max		
Geometrie						
A _{SiWa}	[m ²]		50.000			
B _A	[m]		300			
h _{GW}	[m]	(u.U. maßgebliches h _{GW})	30			
A _A	[m ²]	B _A · h _{GW}	0	9.000	0	0
h _{KGW}	[m]		10			
A _{KGW}	[m ²]	B _A · h _{KGW}	0	3.000	0	0
Hydraulik						
Fließrichtung	[°]		310			
T	[m ² /s]		5,0E-02			
k _f	[m/s]		0,0E+00	1,7E-03	0,0E+00	0,0E+00
I	[-]		0,001			
n _f	[-]		0,2			
a	[m]	BEAR & JACOBS	0,0	14,9	0,0	0,0
Q _{PV}	[m ³ /s]			0,01		
t _{PV}	[h]			29		
Volumenströme						
Q _A	[m ³ /d]	k _f · A _A · I · 86400	0,0	1296,0	0,0	0,0
Q _{SiWa}	[m ³ /d]	(A _{SiWa} · GWN) / 365000	0,0	20,5	0,0	0,0
Q _{KGW}	[m ³ /d]	k _f · A _{KGW} · I · 86400	0,0	432,0	0,0	0,0
Q _{SH}	[m ³ /d]	Q _{SiWa} + Q _{KGW}	0,0	452,5	0,0	0,0
Q _{ZT}	[m ³ /d]	= Q _A - Q _{SH}	0,0	843,5	0,0	0,0
GWN	[mm/a]			150		
Emission für:			E _{max} [g/d]:		P-W [µg/l]:	
c _Z	[µg/l]					
c _{SH} *	[µg/l]	(aus Siwa, Eluat)		860		
c _A	[µg/l]			388		
c _{SH} ** (aus c _A)	[µg/l]	E(A) / (Q _{SiWa} · 10 ⁻³)	0	9.940	0	0
E(SH)** (aus c _A)	[g/d]	Q _{SH} · c _{SH} ** · 10 ⁻³	0	4.498	0	0
E(SH)*	[g/d]	Q _{SH} · c _{SH} * · 10 ⁻³	0	389	0	0
E(A)	[g/d]	(Q _A · c _A - Q _{ZT} · c _Z) · 10 ⁻³	0	503	0	0

Test 2: Hydrogeologische Parameter

Auftraggeber:
Projekt:
Projektnummer/ Projektbezeichnung:

Test 3 = Fallbeispiel 3
Leitfaden S.105

Kostenrechnung der Erkundungsmaßnahmen

E₁₋₂

Kosten

Bohrkosten:

Baustelleneinrichtung pro Bohrung:
Bohrkosten pro lfd Meter:

5.000 DM
250 DM

Pumpversuchskosten:

Baustelleneinrichtung pro Pumpversuch:
Pumpversuchskosten pro Stunde PV:
Entsorgungskosten pro m³ abgepumptes Wasser:

2.500 DM
150 DM
5 DM

Vorgaben

Gewünschte Erfassungsbreite [%] (bei E_{1,2}: 20%; bei E_{2,3}: 50%):
Einbindetiefe der Grundwassermeßstellen [%] (von h_{GW}):
Einbindetiefe der Grundwassermeßstellen [m]:

10%
100%
10

Grunddaten

B_A [m]:
h_{GW} [m]:
n_r [-]:
GW-Flurabstand [m]:
Pumprate Q¹⁾ [m³/s]:
Erforderliche Erfassungsbreite [m]:
Meßstellentiefe [m]:

270
10
0,2
30
0,005
27
40

Variation der Meßstellenanzahl

Minimale Meßstellenanzahl: (Meßstellen im Abstrom)

Meßstellenanzahl	Entnahmebreite je Meßstelle [m]	erforderl. t _{PV} ²⁾ [h]	Bohrkosten BE + DM/lfm [DM]	gesamte Pumpzeit [h]	Pumpversuchskosten BE + DM/h + Entsorg. [DM]	Gesamtkosten [DM]
1	27,0	64	15.000	64	17.768	32.768
2	13,5	16	30.000	32	12.634	42.634
3	9,0	7	45.000	21	12.589	57.589
4	6,8	4	60.000	16	13.817	73.817
5	5,4	3	75.000	13	15.554	90.554
6	4,5	2	90.000	11	17.545	107.545
7	3,9	1	105.000	9	19.681	124.681

¹⁾ Hier muß eine realistische Pumprate eingesetzt werden. Diese hängt von den Aquifereigenschaften ab.

²⁾ Da dieser Wert mit der Zylinderformel berechnet wird, wird die Erfassungsbreite bei zu hohem t_{PV} zu groß.

Test 3: Kostenrechnung

Auftraggeber:
Projekt:
Projektnummer/ Projektbezeichnung:

Test 3 = Fallbeispiel 3
Leitfaden S.105

Hydrogeologische Parameter		Stand: Ergebnis		E ₁₋₂		plausibel
		min	mittel	max		
Geometrie						
A _{SiWa}	[m ²]			50.000		
B _A	[m]			270		
h _{GW}	[m]	(u.U. maßgebliches h _{GW})		10		
A _A	[m ²]	B _A · h _{GW}	0	2.700	0	0
h _{KGW}	[m]					
A _{KGW}	[m ²]	B _A · h _{KGW}	0	0	0	0
Hydraulik						
Fließrichtung	[°]			120		
T	[m ² /s]			1,6E-03		
k _f	[m/s]		0,0E+00	1,6E-04	0,0E+00	0,0E+00
I	[-]			0,004		
n _f	[-]			0,2		
a	[m]	BEAR & JACOBS	0,0	16,9	0,0	0,0
Q _{PV}	[m ³ /s]			0,005		
t _{PV}	[h]			25		
Volumenströme						
Q _A	[m ³ /d]	k _f · A _A · I · 86400	0,0	149,3	0,0	0,0
Q _{SiWa}	[m ³ /d]	(A _{SiWa} · GWN) / 365000	0,0	27,4	0,0	0,0
Q _{KGW}	[m ³ /d]	k _f · A _{KGW} · I · 86400	0,0	0,0	0,0	0,0
Q _{SH}	[m ³ /d]	Q _{SiWa} + Q _{KGW}	0,0	27,4	0,0	0,0
Q _{ZT}	[m ³ /d]	= Q _A - Q _{SH}	0,0	121,9	0,0	0,0
GWN	[mm/a]			200		
Emission für:			E _{max} [g/d]:		P-W [µg/l]:	
c _Z	[µg/l]					
c _{SH} *	[µg/l]	(aus Siwa, Eluat)		2741		
c _A	[µg/l]			494		
c _{SH} ** (aus c _A)	[µg/l]	E(A) / (Q _{SiWa} · 10 ⁻³)	0	9.940	0	0
E(SH)** (aus c _A)	[g/d]	Q _{SH} · c _{SH} ** · 10 ⁻³	0	272	0	0
E(SH)*	[g/d]	Q _{SH} · c _{SH} * · 10 ⁻³	0	75	0	0
E(A)	[g/d]	(Q _A · c _A - Q _{ZT} · c _Z) · 10 ⁻³	0	74	0	0

Test 3: Hydrogeologische Parameter

Anmerkung

Die Test-Beispiele wurden mit einer vorläufigen Version der Excel-Tabelle durchgerechnet. Abweichungen zur vorliegenden Version sind möglich!