

Innerstädtische Tunnelbauwerke als Strömungshindernis für das Grundwasser

Grundwasserkommunikationsanlagen zur Beherrschung von Aufstau und Sunk am Beispiel des City Tunnel Leipzig

Dipl.-Ing. W. Glitsch, DEGES GmbH, Berlin

Dipl.-Ing. C. Spang, Dr. Spang GmbH, Witten / Freiberg

1.	EINLEITUNG	3
2.	AUFSTAUBERECHNUNG	4
2.1	Analytische Berechnungsansätze	5
2.2	Numerische Grundwassermodelle	8
2.2.1	Grundlagen und Randbedingungen	9
2.2.2	Eingangsparameter	9
2.2.3	Berechnungsverfahren	10
2.2.4	Berechnungsergebnisse	10
3.	GRUNDWASSERKOMMUNIKATIONSANLAGEN	11
3.2	Varianten und Allgemeines	11
3.2	Entnahme- und Wiederversickerungsbrunnen als Vertikalbrunnen	12
3.3	Schächte mit Horizontalbrunnen und Rohrleitungsdüker	14
3.4	Flächenfilter mit Sammler- und Dükerleitungen	17
4.	BEMESSUNGSVERFAHREN	19
4.1	Grundwasserhydraulik	19
4.2	Vertikalfilterbrunnen	19
4.3	Vollkommene Sickerschlitze	21
4.4	Dränleitungen und Horizontalfilter	22
4.4.1	Fassungsvermögen und Ergiebigkeit	23
4.4.2	Versickerungsbrunnen	23
4.5	Überleitung des Grundwassers / Technische Hydraulik	24
4.6	Gang des Bemessungsverfahrens	25

5.	EINFLÜSSE AUF DIE LEBENSDAUER UND GEGENMASSNAHMEN	26
5.1	Wasserchemische Einflüsse und Randbedingungen	26
5.2	Chemische und mikrobiologische Verockerung	27
5.3	Verkalkung bzw. Versinterung	28
5.4	Korrosion	28
5.5	Hydromechanische Einflüsse	28
5.6	Biologische Einflüsse	29
5.7	Materialien und deren Eigenschaften	29
5.8	Reinigung von Filteranlagen	30
6.	CITY-TUNNEL LEIPZIG	30
6.1	Projektübersicht	30
6.2	Geologische und hydrogeologische Verhältnisse	32
6.3	Numerisches Grundwassermodell	34
7.	GRUNDWASSERKOMMUNIKATIONSANLAGEN AM CITY TUNNEL LEIPZIG	35
7.1	Planung der Grundwasserkommunikationsanlagen	35
7.1.1	Vorgaben der Planungsbehörden	35
7.1.2	Hydraulische Bemessung	36
7.2	Entwurf der Grundwasserkommunikationsanlage am City Tunnel Leipzig	36
7.3	GW-Kommunikation Südrampe und Bayerischer Bahnhof	38
7.4	GW- Kommunikationsanlage Haltepunkt Wilhelm- Leuschner- Platz	38
7.5	GW-Kommunikationsanlage Haltepunkt Markt	39
7.6	GW-Kommunikation Hauptbahnhof und Nord- u. Westrampe	40
7.7	Betrieb und Wartung der Grundwasserkommunikationsanlagen	41
8.	ZUSAMMENFASSUNG	42
9.	LITERATURVERZEICHNIS	43

1. EINLEITUNG

Lang gestreckte Bauwerke im Grundwasser, wie zum Beispiel Tunnel und unterirdische Stationen, die quer oder schräg zur Strömungsrichtung verlaufen, stellen ein Hindernis für die natürliche Grundwasserströmung dar. In der Regel kommt es anstromseitig zu einem Aufstau und abstromseitig zu einem Absenken des natürlichen Grundwasserspiegels (vgl. Abb. 1.1). Bei einer übermäßigen Beeinflussung der Grundwasserstände sind verschiedenartige, negative Beeinflussungen der Bausubstanz, der Ökologie und der Wasserwirtschaft zu erwarten.

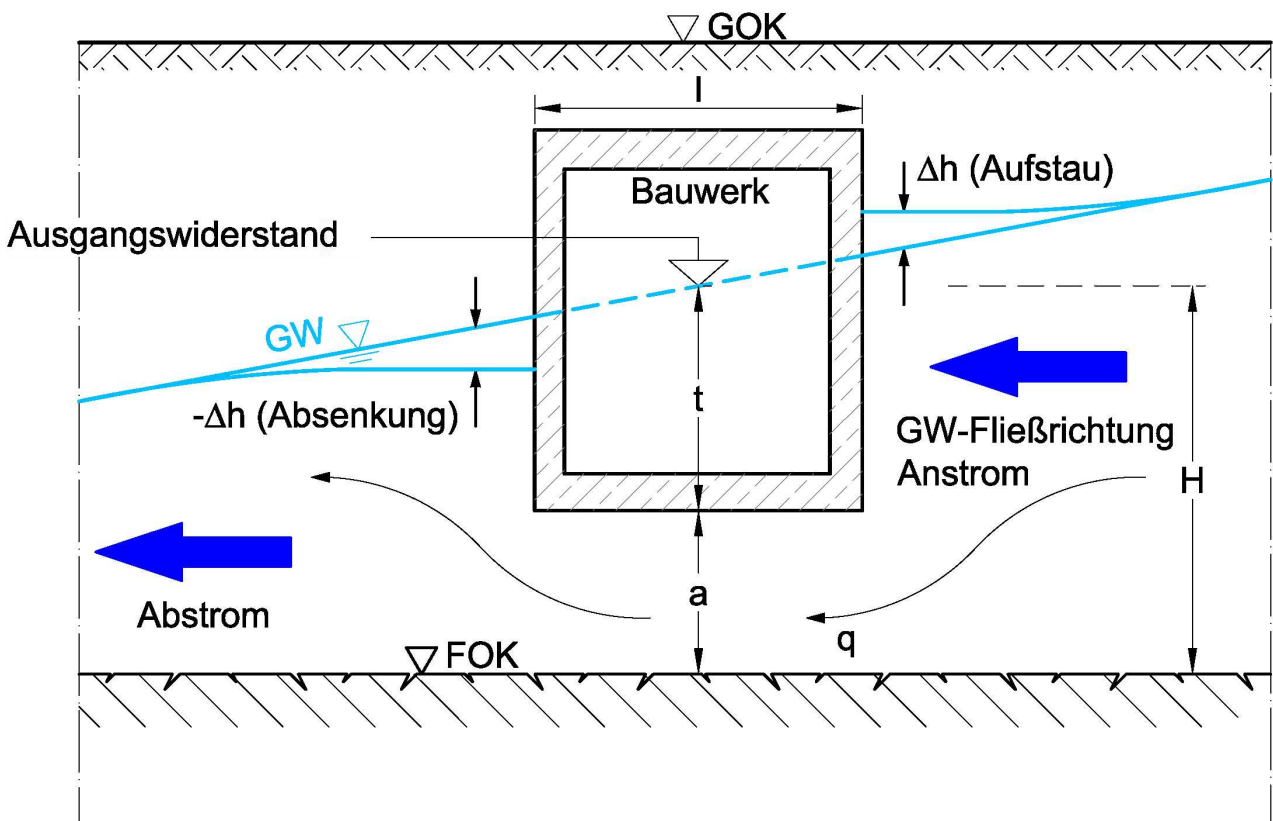


Abb. 1.1: Aufstau und Sunk an einem Hindernis in der Grundwasserströmung (Prinzipskizze)

Alle Veränderungen an der baulichen Substanz im innerstädtischen Bereich können, soweit sie in den Grundwasserkörper hineinragen, eine unerwünschte Veränderung des Grundwasserregimes bewirken. Hier sind nicht nur langgestreckte Bauwerke, also Tunnel für Bahn- und Straßenverkehr zu nennen, sondern auch einzelne Bauwerke können über die gegenseitige Beeinflussung bzw. durch Akkumulation der Einzeleinflüsse einen nicht mehr zu vernachlässigenden Einfluss auf die Grundwasserströmung ausüben.

Durch einen Aufstau kann über eine potentielle Vernässung von Bauwerken im Umfeld der Baumaßnahme eine Gefährdung der bestehenden Bausubstanz gegeben sein. Auf der Abstromseite

kann die übermäßige Absenkung des Grundwasserspiegels unter ungünstigen Bedingungen Setzungen verursachen. Das Tiefbaupotential der benachbarten Flächen wird eingeschränkt. Für zukünftige Bauwerke in Nachbarschaft des aktuellen Bauvorhabens werden Einschränkungen in der Bauweise die Folge sein. Eine Störung des Grundwasserregimes kann auch mit einer unerwünschten Verminderung des nutzbaren Grundwasserdargebotes zur Wassergewinnung einhergehen.

Werden durch das Bauwerk unzulässig hohe Beeinträchtigungen des Grundwassers prognostiziert, muss zur Vermeidung eines Anstieges bzw. der Absenkung des Grundwasserspiegels im Rahmen der technischen Möglichkeiten die natürliche Grundwasserströmung durch eine künstlich geschaffene Grundwasserkommunikationsanlage ersetzt werden. Zusätzlich sind im Fall eines zu erwartenden, schädlichen Aufstaus alle baulichen Maßnahmen zu prüfen, die eine übermäßige Verbauung des Fließquerschnitts von vorne herein vermeiden (Reduzierung Querschnitt, Optimierung Tiefenlage, etc.). Ziel einer Grundwasserkommunikation ist die annähernde Beibehaltung der natürlichen Strömungsverhältnisse im Vergleich zu den ungestörten Verhältnissen.

Vor Planung und Bemessung einer Grundwasserkommunikationsanlage ist der Einfluss des Bauwerks auf das Grundwassergeschehen detailliert zu untersuchen. Hierzu kann bei komplexen Verhältnissen neben den verschiedenen analytischen Berechnungsverfahren zur Aufstauermittlung auch ein numerisches Grundwassermodell zum Einsatz kommen. Mit Hilfe dieser Berechnungen und Untersuchungen werden Aussagen über die Notwendigkeit und den Umfang von Ausgleichsmaßnahmen getroffen. Je nach technischer Ausgestaltung der Anlage erfordert die Dimensionierung der eigentlichen Grundwasserkommunikationsanlage den Einsatz verschiedener Berechnungsverfahren der Grundwasser- und technischen Hydraulik sowie chemische Untersuchungen des Grundwassers.

2. AUFSTAUBERECHNUNG

Zur Prüfung des Einflusses der in das Grundwasser eintauchenden Bauwerke auf die Grundwasserströmung ist zunächst eine Aufstauberechnung erforderlich. Diese kann entweder mit analytischen Ansätzen oder mit numerischen Berechnungsverfahren ausgeführt werden. Ohne entsprechende Kenntnis des Untergrundes und eine ausreichende Datengrundlage ist allerdings weder eine Aufstauberechnung ausführbar noch ist die ggf. erforderliche Grundwasserkommunikationsanlage zu planen oder zu bemessen. Neben einer geotechnischen Baugrunderkundung ist daher auch eine großräumige hydrogeologische Erkundung des Projektgebietes mit anschließender Modellbildung erforderlich.

2.1 Analytische Berechnungsansätze

Vor der Entscheidung über die Notwendigkeit einer Grundwasserkommunikation und der Festlegung deren baulicher Ausgestaltung, ist das Ausmaß des maximalen Aufstaus bzw. die Auswirkung auf das Grundwassergeschehen zu bestimmen. Zur Aufstauberechnung wurden einige analytische Formeln entwickelt. Auch wenn diese nur unter einfachen Gegebenheiten anwendbar sind, werden bereits eine Reihe möglicher Fälle von praktischem Interesse abgedeckt. Hier sind insbesondere die Arbeiten von SCHNEIDER (1988 bis 1995) zu erwähnen.

Als Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Lösungsverfahren ist unter anderem ein einheitliches Gefälle bei konstanter Durchlässigkeit über das betrachtete Gebiet erforderlich, weitere Vereinfachungen sind hauptsächlich geometrischer Natur. Für langgestreckte Bauwerke ohne Lücken findet sich in SCHNEIDER (1981) ein Berechnungsansatz. Dabei lässt sich entweder ein Zylinder oder eine endliche Platte ohne Breite, die wahlweise senkrecht und schräg angeströmt werden kann, berechnen (vgl. Abb. 2.1 / Gleichung 2.1).

$$h = \pm \frac{i \cdot \cos \delta \sqrt{2}}{2} \cdot \sqrt{\sqrt{(x^2 - y^2 + t^2) + 4x^2 y^2} + x^2 - y^2 + t^2} + i \cdot y \cdot \sin \delta$$

Gleichung 2.1: Aufstau / Sunk nach SCHNEIDER (1981)

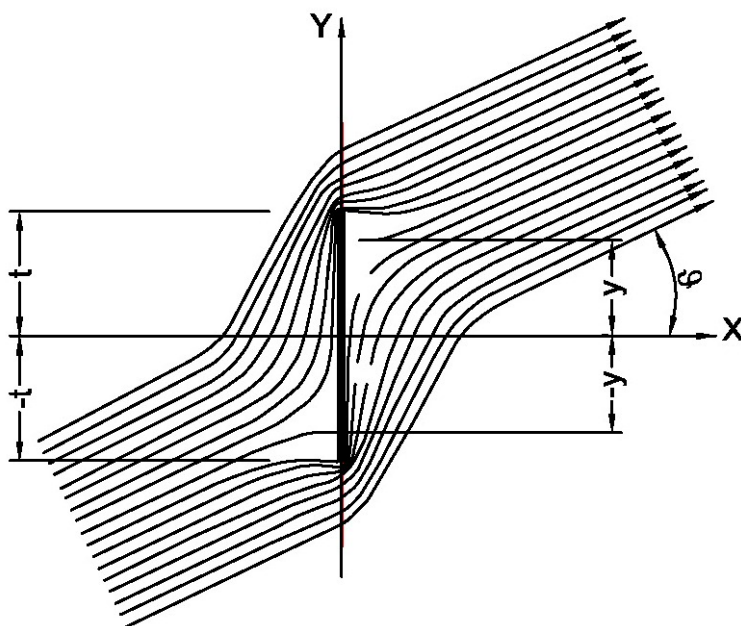


Abb. 2.1: Potentiallinien an einem Hindernis in der Grundwasserströmung

Daneben gibt es eine Lösung für langgestreckte Bauwerke mit abschnittswisen Durchbrüchen SCHNEIDER (1982) (vgl. Abb. 2.2). Es wird angenommen, dass das Bauwerk eine unendliche Länge bei vernachlässigbarer Breite aufweist und unten in den Grundwasserstauer einbindet. Es können in gleichbleibenden Abständen Lücken endlicher Ausdehnung im Bauwerk in ihrer Auswirkung auf den Aufstau und den Sunk am Bauwerk berechnet werden.

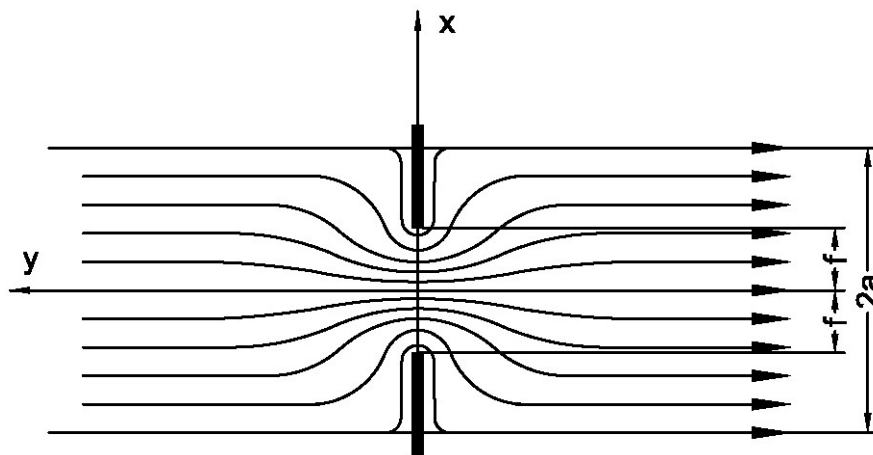


Abb. 2.2: Potentiallinien an einer Öffnung in einem Bauwerk

Gleichung 2.2 gibt den Aufstau bzw. Sunk vor der Mitte einer Spaltöffnung im Abstand y vom Bauwerk an. Mit Gleichung 2.3 kann entsprechend der Aufstau vor bzw. der Sunk hinter dem Bauwerk in der Mitte zwischen zwei Spaltöffnungen, wiederum im Abstand y von der Bauwerksachse berechnet werden.

$$\Delta h = \pm \frac{I \cdot 2a}{\pi} \cdot \ln \frac{\sqrt{\sin^2 \frac{\pi \cdot f}{2a} + \sinh^2 \frac{\pi \cdot y}{2a}} + \sinh \frac{\pi \cdot y}{2a}}{\sin \frac{\pi \cdot f}{2a}} + I \cdot y(m)$$

Gleichung 2.2: Aufstau / Sunk vor der Mitte der Spaltöffnung nach SCHNEIDER(1982)

$$\Delta h = \pm \frac{I \cdot 2a}{\pi} \cdot \ln \frac{\cosh \frac{\pi \cdot y}{2a} + \sqrt{\cosh^2 \frac{\pi \cdot y}{2a} - \sin^2 \frac{\pi \cdot f}{2a}}}{\sin \frac{\pi \cdot f}{2a}} + I \cdot y(m)$$

Gleichung 2.3: Aufstau / Sunk vor der Mitte zwischen 2 Spaltöffnungen nach SCHNEIDER (1982)

In SCHNEIDER (1983) wird die gleichzeitige Um- und Unterströmung eines Bauwerks behandelt.

In SCHNEIDER (1995) wird eine Lösung für die Umströmung eines endlichen Bauwerks mit elliptischem Grundriss, das wahlweise in Richtung der x- oder y-Achse der Ellipse angeströmt werden kann, vorgestellt. Eine Verallgemeinerung auf rechteckige Querschnitte und auf eine schräge Anströmung des Bauwerks ist möglich. Es wird vorausgesetzt, dass das Bauwerk in den Grundwasserstauer einbindet. Für einen beliebigen Punkt (x,y) kann der Wasserspiegel über die folgende Gleichung berechnet werden. Eine Absenkung gegenüber dem Nullhorizont ist positiv definiert, ein Aufstau negativ.

$$h(x) = I(x) \left(x + \frac{x_0^2 - t^2}{4t} \cdot \ln \frac{(x+t)^2 + y^2}{(x-t)^2 + y^2} \right)$$

Gleichung 2.4: Wasserspiegel im Nahbereich eines beliebigen Bauwerks nach SCHNEIDER (1995)

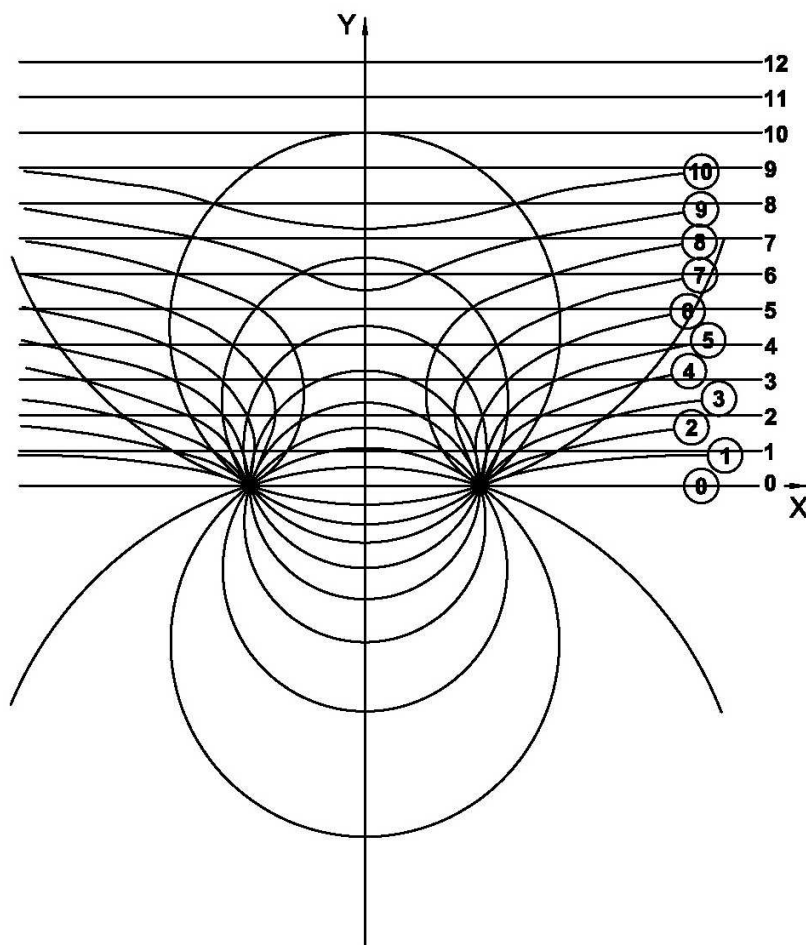


Abb. 2.3: Potentiallinien eines in Richtung der y-Achse umströmten Bauwerks

Die Abbildung 2.3 zeigt für die Umströmung eines elliptischen Bauwerks, die Grundwasserspiegel der ungestörten Grundwasserströmung, den Aufstau und Sunk am Bauwerk sowie als resultierende aus beiden Größen die Potentiallinien am umströmten Bauwerk. Abbildung 2.4 veranschaulicht wie die Ergebnisse aus der Berechnung für das elliptische Bauwerk auf den Fall des rechteckigen Bauwerks umgeformt werden können.

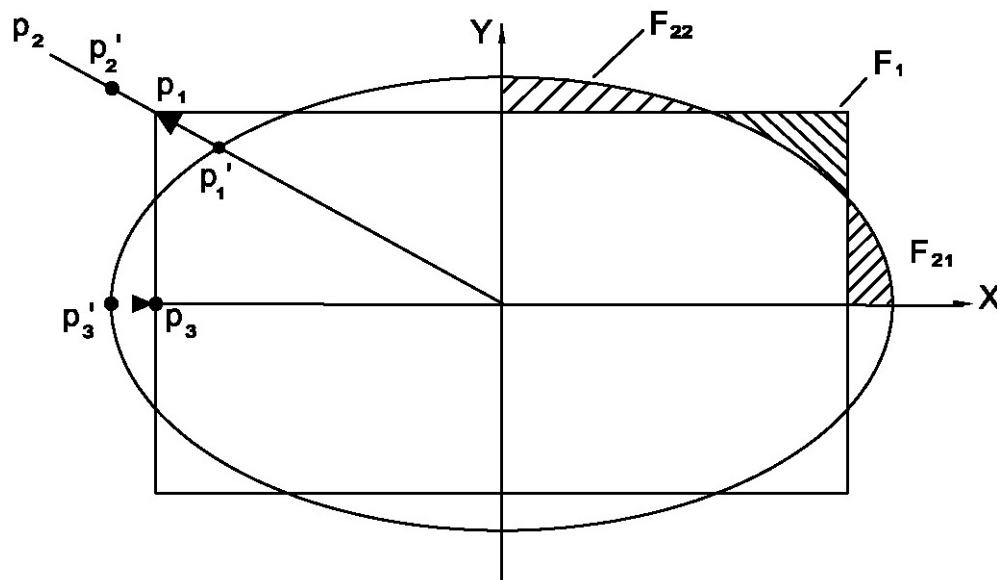


Abb. 2.4: Elliptischer Ersatzkörper für ein Bauwerk in Rechteckform nach SCHNEIDER

2.2 Numerische Grundwassermodelle

Bei komplexeren Verhältnissen sind detailliertere Aussagen nur über numerische Grundwassermodelle zu erhalten. Dies ist allerdings nur mit erheblich höherem Aufwand für Erkundung und Modellierung möglich. Gerechtfertigt ist dieser Aufwand nur, wenn die Projektgegebenheiten entsprechend hochwertige Berechnungsergebnisse erfordern und bei einer Datenlage, die es erlaubt, ein aussagekräftiges Grundwassermodell zu erstellen und zu kalibrieren. Neben der Berechnung von Aufstau und Sunk infolge der Baumaßnahmen kann ein Grundwassermodell weitere Fragestellungen von wasserwirtschaftlichen und bautechnischem Interesse beantworten, die durch analytische Formeln und einfache Handrechnungen nicht ohne weiteres zu lösen sind.

Eine ausführliche Erläuterung der Grundwassermodelltechnik würde den Rahmen für diesen Beitrag sprengen, deshalb beschränken sich die Erläuterungen auf Anmerkungen zu Funktionsweise und Einsatz von Grundwassermodellen und insbesondere deren Anwendungsgebiete und Einsatzgrenzen. Erstellung und Betrieb eines entsprechenden Grundwassermodells sind darüberhinaus Sache eines auf diesem Gebiet erfahrenen Geologen oder Ingenieurs, da entsprechende Erfahrungen im Bereich der Modellierung essentiell für die Beurteilung der Rechenergebnisse sind.

2.2.1 Grundlagen und Randbedingungen

Grundlage der Modellierung einer Grundwasserströmung sind das verallgemeinerte DARCY'sche Gesetz und die Kontinuitätsbedingung, aus denen sich die Differentialgleichung für die dreidimensionale, gesättigte, instationäre Sickerströmung herleiten lässt. Deren eindeutige Lösung erfordert die Vorgabe von Anfangsbedingungen über das ganze Modellgebiet und die vollständige Beschreibung des Randes durch Randbedingungen. Die Randbedingungen können in Abhängigkeit von der Art der Randeinflussfaktoren unterschiedliche Formen annehmen.

Mit der Vorgabe der Standrohrspiegelhöhe werden z. B. bekannte Grundwasserstände, die sich durch die zu untersuchenden Maßnahmen voraussichtlich nicht ändern oder bekannte Absenkungen von Grundwasserhaltungen in das Modell eingeführt. Vorgegebene Zu- und Abflüsse als Randbedingungen beschreiben bekannte, über den Gebietsrand ein- und austretende Grundwasserströme und Brunnenentnahmen im Modell. Einen Sonderfall stellt die natürliche Randbedingung, also eine undurchlässige Berandung oder Grundwasserscheide, dar. Leakage Randbedingung erfassen die Exfiltration in Oberflächengewässer bzw. im umgekehrten Fall die Infiltration aus Oberflächengewässern. Der Quell- bzw. Senkenterm ergibt sich als Funktion der Potentialunterschiede zwischen Grundwasser und Gewässer.

An die Diskretisierung des Modellgebietes sind verschiedene Anforderungen zu richten. Einerseits ist die Geometrie des Bauwerks mit genügender Genauigkeit nachzubilden. Auch erfordern die teilweise steilen Gradienten im Umkreis des Bauwerks ein feines, hoch aufgelöstes Netz. Andererseits ist ein ausreichend großes Modellgebiet erforderlich, um Randeinflüsse auf die Prognose der Bauwerksumströmung zu vermeiden.

2.2.2 Eingangsparameter

Auch bei sorgfältiger Datenerhebung und Datenaufbereitung werden einzelne Parameter unbekannt bleiben oder nur mit eingeschränkter Genauigkeit bekannt sein. Im Rahmen einer Kalibrierung werden diese Parameter innerhalb vorgegebener Vertrauensbereiche so eingeregelt, dass ein durch Messungen dokumentierter Zustand des Grundwassersystems durch das Modell nachvollzogen werden kann. Dies kann entweder durch einen automatischen Optimierungsalgorithmus oder durch ein „trial and error“-Verfahren erfolgen.

In der Regel zählen Standrohrspiegelhöhen zu den zuverlässigsten Daten, die in einem Grundwasserleiter zur Verfügung stehen, während k_f -Werte in der Regel nur in ihrer Größenordnung bekannt sind. Meistens werden k_f -Werte innerhalb ihrer Vertrauensbereiche variiert, mit dem Ziel, die

Abweichung zwischen gemessenen und gerechneten Grundwasserstände zu minimieren. Allerdings führt dieses Vorgehen nur dann zum Erfolg, wenn Entnahmen innerhalb des Untersuchungsgebiets bekannt sind und in der Berechnung berücksichtigt werden. Ansonsten könnten verschiedene k_f -Werte-Kombinationen, die sich jeweils nur um einen Faktor unterscheiden, ein identisches Gleichbild ergeben, auch wenn sich diese Berechnungen bei den zu- und abfließenden Wassermengen und den Grundwassergeschwindigkeiten unterscheiden würden.

2.2.3 Berechnungsverfahren

Zur numerischen Lösung der Differentialgleichung stehen prinzipiell **Finite Differenzen** und **Finite Elemente** Verfahren zur Verfügung. Beim Finite Differenzen Verfahren wird das Gebiet, für das die Gleichung gelten soll, zunächst in eine endliche (finite) Zahl von Gitterpunkten zerlegt. Dies geschieht meist durch ein Gitter von senkrecht aufeinander stehenden Linien; den Gitterpunkten entsprechen dann die Kreuzungspunkte. Die Ableitungen an den Gitterpunkten werden dann durch Differenzen approximiert. Die partiellen Differentialgleichungen werden so in ein System von Differenzgleichungen umformuliert.

Beim Finite Elemente Verfahren wird das Berechnungsgebiet in eine beliebig große Anzahl Elemente unterteilt, innerhalb derer Ansatzfunktionen definiert sind. Das Integral wird durch eine Summe über die einzelnen Integrale der Finiten Elemente ersetzt. Da die Ansatzfunktionen nur auf wenigen Elementen ungleich Null sind, ergibt sich ein dünnbesetztes, lineares Gleichungssystem, dessen Lösung letztlich die numerische Lösung der betrachteten Differentialgleichung stellt.

2.2.4 Berechnungsergebnisse

Der Aufstau und Sunk am Bauwerk wird über den Vergleich bzw. die Differenzenbildung einer Simulation des Ausgangszustandes ohne Bauwerk mit einer zweiten Simulation, in der das Bauwerk berücksichtigt ist, ermittelt. Das sich beide Simulationen nur in der Berücksichtigung des Bauwerks unterscheiden, werden Fehler und Ungenauigkeiten mit denen beide Simulationen in gleicher Weise behaftet sind, über die Differenzenbildung eliminiert. Die Aufstau- und Sunkberechnung ist demnach mit einer höheren Genauigkeit möglich als die Berechnung der Standrohrspiegelhöhen.

Neben der eigentlichen Aufstauberechnung liefert ein numerisches Grundwassermodell weiterhin Aussagen über die Überleitmengen unter verschiedenen Randbedingungen. Auch die Veränderungen der Standrohrspiegelhöhen im weiteren Umkreis der Baumaßnahme und verschiedenste Bilanzgrößen, wie zum Beispiel Veränderungen von Vorflutverhältnissen, sind ableitbar.

3. GRUNDWASSERKOMMUNIKATIONSANLAGEN

3.1 Vermeidung von Grundwasseraufstau

Grundsätzlich ist nach rechnerischer Prüfung eines möglichen Grundwasseraufstaus (vgl. Kap. 2) die Entscheidung zwischen aktiver und passiver Aufstauvermeidung zu treffen bzw. ist zu prüfen ob der Aufstau mit einer passiven Maßnahme wie z.B. einer Anpassung des Bauablaufs oder des Bauwerks ausreichend verringert werden kann. Eine passive Maßnahmen sind aus wirtschaftlichen Gründen in der Regel einer aktiven Maßnahme vorzuziehen.

Die Möglichkeiten einer passiven Aufstauvermeidung sind vielfältig und entsprechend projektspezifisch. Es ist z.B. zu prüfen, ob über einen teilweisen oder vollständigen Rückbau des Baugrubenverbau ein ausreichender Fließquerschnitt wieder herstellbar ist. Zum anderen besteht die Möglichkeit, bei der Konstruktion von vornherein auf einen ausreichenden verbleibenden Fließquerschnitt im Grundwasserleiter (Anpassung der Gradienten, Bauwerksabmessungen, Lage zur Strömungsrichtung etc.) zu achten. Als Abhilfe kann zum Beispiel auch eine Spundwand, soweit sie nicht Bestandteil des endgültigen Bauwerks ist, wieder gezogen werden. In festen bzw. dauerhaften Baugrubenverbauen wie zum Beispiel überschnittenen Bohrpfahlwänden oder Schlitzwänden können unterhalb der Bauwerkssohle Lücken gelassen werden, die bauzeitlich vereist werden um einen wasserdichten Abschluss zu gewährleisten ULRICH (1984). Auch chemische Verfestigungen von Lücken im Baugrubenverbau, die im Anschluss an die Baumaßnahme aufgebohrt werden, sind denkbar. Eine andere Möglichkeit ist das Aufbohren unbewehrter Pfähle in überschnittenen Bohrpfahlwänden oder unbewehrten Segmenten von Schlitzwänden. Hier ist eine Vielzahl von Möglichkeiten bzw. Varianten denkbar, die bis heute nur zum Teil praktisch erprobt wurden.

Die aktiven Maßnahmen zur Aufstauvermeidung beruhen alle auf dem gleichen Prinzip eines künstlich geschaffenen Ersatzströmungsweges für das anströmende Grundwasser und werden daher als Grundwasserkommunikationsanlagen bezeichnet.

3.2 Übersicht Grundwasserkommunikationsanlagen

Für die Auswahl einer Variante bzw. einer Kombination mehrerer Varianten sind u.a. die hydrogeologischen, hydrochemischen Verhältnisse, die Art des Bauwerkes sowie das Verhältnis zwischen Investitions- und Betriebskosten zu betrachten. Zur Auswahl einer Variante von Grundwasserkommunikationsanlagen und zur Dimensionierung ist die Ermittlung des tatsächlichen Aufstaus / Sunks ebenfalls von entscheidender Bedeutung. Zur Auswahl stehen derzeit grundsätzlich folgende Varianten:

- Entnahme- und Wiederversickerungsbrunnen als Vertikalbrunnen;
- Schächte mit Horizontalbrunnen und Rohrleitungsdüker außerhalb des Bauwerkes;
- Horizontalbrunnen mit Rohrleitungsdüker, in das Bauwerk integriert;
- Flächenfilter, mit oder ohne Sammler- und Dükerleitungen.

Gerade bei Baumaßnahmen in hochdurchlässigen Aquiferen wird man bestrebt sein über eine wasserdichte Baugrubenumschließung eine offene Wasserhaltung zu vermeiden. Hohe Entnahmemengen führen gerade bei längeren Bauzeiten zu hohen Kosten. Zudem ist eine tiefe und weitreichende Grundwasserabsenkung oft auch aus anderen Gründen unerwünscht. Wenn nicht mit einem dichten Sohlabschluss der Baugrube gearbeitet wird, führt dies über die notwendige Einbindung des Baugrubenabschlusses in den Grundwasserstauer zu einer vollständigen Sperrung des Fließquerschnittes.

Im Folgenden sollen die wesentlichen Möglichkeiten zur Herstellung einer künstlichen Grundwasserkommunikation vorgestellt und in ihren Vor- und Nachteilen erläutert werden. Die Bewertung der einzelnen Grundwasserkommunikationssysteme für eine konkrete Baumaßnahme ergibt sich hinsichtlich der Baubarkeit, der Herstellungskosten, der Dauerhaftigkeit, der Störanfälligkeit, der Betriebs- und Wartungskosten sowie der Zugänglichkeit/Erhaltung und Sanierbarkeit. Darüber hinaus sind Aspekte wie die Auftriebssicherung des Bauwerks sowie Grunderwerb/Gestattung im Zusammenhang mit den geotechnischen Randbedingungen zu berücksichtigen.

Die Vor- und Nachteile jeder der Varianten sind in den folgenden Kapiteln kurz qualitativ zusammengestellt. Die Bewertung bzw. eine Quantifizierung kann nur im Einzelfall unter Berücksichtigung der projektspezifischen Randbedingungen erfolgen. Zur Beurteilung muss eine detaillierte Vorplanung im Rahmen einer Machbarkeitsstudie erfolgen.

3.2 Entnahme- und Wiederversickerungsbrunnen als Vertikalbrunnen

Eine Variante zur Beherrschung des Grundwasseraufstaus beruht auf Entnahme und Wiederversickerung von Grundwasser mit Vertikalbrunnen. Auf der Anstromseite des Bauwerks werden Brunnen errichtet, aus denen mittels Tauchpumpen das Wasser schwimmergesteuert gehoben und über Rohrleitungen auf eine Versickerungsbrunnengallerie im Abstrom des Bauwerks verteilt wird (Abbildung 3.1). Grundsätzlich ist für die Versickerung bei gleichen geotechnischen Verhältnissen mindestens die doppelte Anzahl an Brunnen wie auf der Entnahmeseite erforderlich.

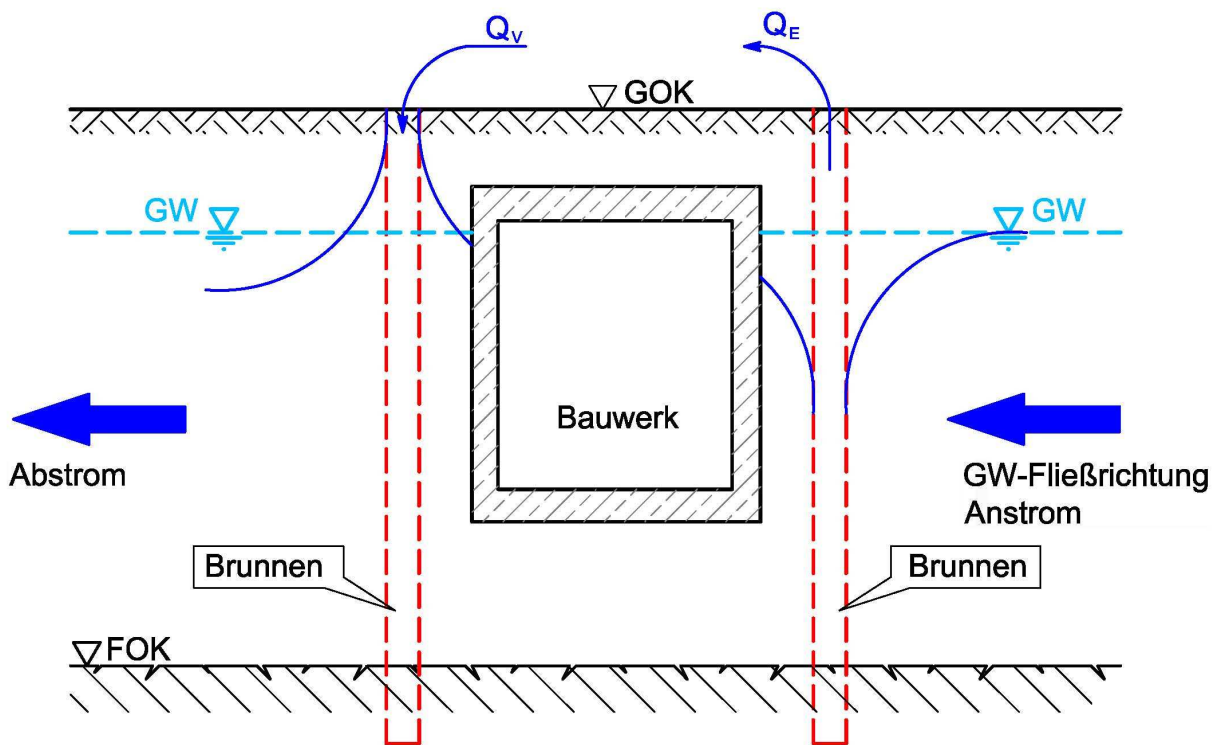


Abb. 3.1: Prinzipskizze einer Anlage aus Entnahme- und Wiederversickerungsbrunnen als Vertikalbrunnen

Vorteile Variante mit Vertikalbrunnen

- Die Grundwasserkommunikationsanlage kann unabhängig vom Bauwerk errichtet werden;
- Vertikalbrunnen sind von der Tagesoberfläche einfach zu warten;
- Geforderte maximale Aufstauhöhen können genau eingehalten werden;
- Die Herstellung der Vertikalbrunnen ist auch im Hinblick auf abgestufte Filterkiesschüttungen vergleichsweise einfach;
- Die Brunnen können außerhalb eventueller Verpreßkörper für eine Rückverankerung des Baugrubenverbaus hergestellt werden;
- Bei Ausfall eines Brunnens kann mit relativ wenig Aufwand ein Ersatzbrunnen hergestellt werden.
- Funktionsstörungen in Folge von Verockerungen, Versandung und Verschleimung durch Bakterien können durch regelmäßige Wartung der Brunnen vermieden werden.

Nachteile Variante mit Vertikalbrunnen

- Für den Betrieb der Grundwasserkommunikationsanlagen sind Tauchpumpen erforderlich; es entstehen hohe permanente Betriebskosten;

- Bei einem innerstädtischen Verlauf der Trasse kann die Festlegung der Brunnenstandorte schwierig sein;
- Die Brunnen müssen durch Rohrleitungen verbunden werden, hierfür sind Leitungsverlegungen, u.a. in öffentlichen Verkehrsflächen vorzusehen;
- Das offene System hat einen negativen Einfluss auf den GW-Chemismus (Verockerung etc.);
- Bei Neigung zu Verockerung ist mit sehr geringer Lebensdauer der Versickerungsanlage (1-5 Jahre) zu rechnen.

Im Bezug auf die Versickerungsleitung muss bei den Vertikalbrunnen beachtet werden, dass die Versickerung üblicherweise über den gesamten Grundwasserleiter erfolgt, und somit zumindest zum Teil in der ungesättigten Bodenzone stattfindet. Damit steht jederzeit Sauerstoff zur Reaktion zur Verfügung, wodurch eine hohe Verockerungs- und Verbaunungsgefahr besteht und somit die Versickerungsleistung erheblich einschränken kann. Durch technisch aufwendige Verfahren kann die Gefahr verringert werden.

Zusammenfassend ist eine Grundwasserkommunikationsanlage mit Vertikalbrunnen in den meisten Fällen ausführbar und kann ohne erhöhten technischen Aufwand hergestellt werden. Beschränkend sind aber gerade in innerstädtischen Lagen der Platzbedarf und der entsprechende Bedarf an Grunddienstbarkeiten oder Flächenerwerb. Die Installation ist abgesehen vom Flächenbedarf daher insgesamt günstig, der Betrieb aber störanfällig, wartungsintensiv und teuer.

3.3 Schächte mit Horizontalbrunnen und Rohrleitungsdüker

In einer weiteren Variante der Grundwasserkommunikation werden statt Vertikalbrunnen Horizontalbrunnen verwendet. Es werden dazu in die maßgebenden Grundwasserleiter Horizontalbrunnen gebohrt. Diese können sowohl parallel zum Tunnel oder Bauwerk, als auch radial oder senkrecht dazu hergestellt werden. Nach SCHNEIDER (1988) sind Längen bis zu 100 m technisch herstellbar. Zwei Untervarianten sind möglich. Die Horizontalfilterbrunnen können direkt vom Bauwerk aus gebohrt werden oder aus Schächten, die entweder als Ausbuchtungen im Grundriss des Bauwerks vorgesehen werden oder unabhängig vom Bauwerk abgeteuft werden.

Das in den Horizontalbrunnen gefasste Wasser wird durch ein geschlossenes Rohrleitungssystem gesammelt und über einen Düker unterhalb des Bauwerks von der Anstrom- auf die Abstromseite übergeleitet. Der Grundwasserstrom durch die Kommunikationsanlage beruht allein auf der Druckdifferenz zwischen An- und Abstromseite. Da das Grundwassergefälle in der Regel vergleichsweise gering ist muss die Förderleistung der Horizontalbrunnen sehr hoch sein.

Die einzelnen Brunnen sind über Schieber einzeln verschließbar herzustellen, um:

- Die Anlage gemäß der Leistung der Einzelstränge auf das gewünschte Absenkziel einstellen zu können;
- Die Wartung von Einzelsträngen ohne Funktionsverlust der Gesamtanlage vornehmen zu können.

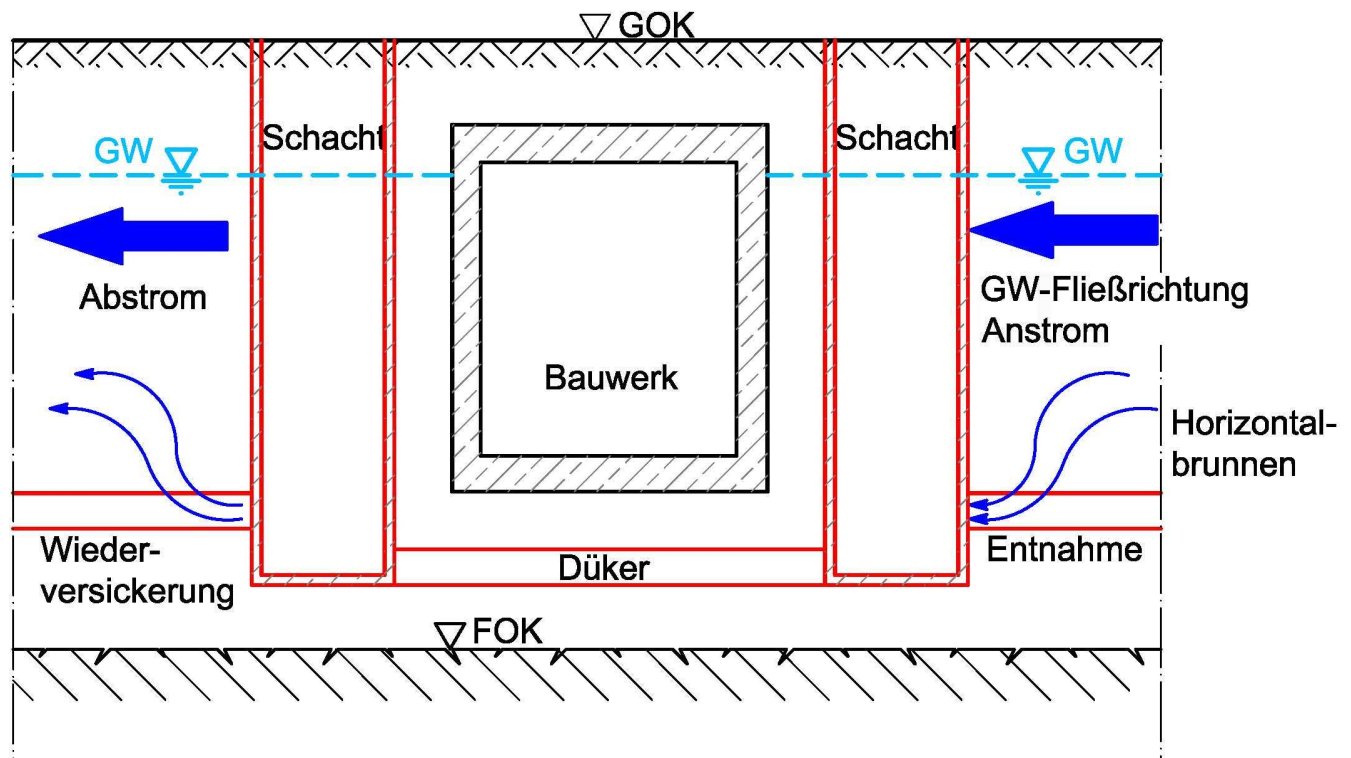


Abb. 3.2: Prinzipskizze einer Kommunikationsanlage aus Schächten mit Horizontalbrunnen und einem Rohrleitungsdüker

Vorteile Variante mit Horizontalbrunnen

- Es ist eine gezielte Grundwasserentnahme aus den relevanten Grundwasserleitern möglich;
- Bei den technisch möglichen Bohrlängen können die Filter außerhalb des Einflussbereiches von Verpreßkörpern angeordnet werden;
- Das System ist in sich geschlossen und kommt ohne Sauerstoffzutritt aus (GW-Chemismus, Verockerung etc. deutlich weniger problematisch);
- Keine direkten Betriebskosten und keine mechanisch beanspruchten Bauteile;
- Es sind nur zusätzliche Flächen direkt im Anschluss an das Bauwerk sowie Grunddienstbarkeiten für die Horizontalbrunnen erforderlich.

Nachteile Variante mit Horizontalbrunnen

- Wegen der erforderlichen Schächte ist das System teuer in der Herstellung;
- Aufgrund der geringen Potentialdifferenz sind große Filterlängen erforderlich;
- Die Bauausführung ist aufwendig und technisch anspruchsvoll;
- Die Wartung ist aufwendiger als bei Vertikalbrunnenanlagen.

Im Bezug auf die Versickerungsleitung muss bei den Horizontalbrunnen neben dem geschlossenen System gewährleistet werden, dass die Versickerung in der gesättigten Bodenzone stattfindet. Damit wird die Reaktion mit Sauerstoff verhindert und die Verockerungs- und Verbaunungsgefahr erheblich vermindert.

Zusammenfassend ist eine Grundwasserkommunikationsanlage mit Horizontalbrunnen ebenfalls in den meisten Fällen ausführbar, kann aber nur mit hohem technischem Aufwand hergestellt werden. Der Platzbedarf und der entsprechende Bedarf an Grunddienstbarkeiten oder Flächenerwerb sind gegenüber der Variante mit Vertikalbrunnen deutlich geringer. Die Installation ist daher insgesamt teuer, der Betrieb aber unanfällig und wenig wartungsintensiv und somit günstig. Gerade die geringen Betriebskosten sind für die zumeist öffentlichen Betreiber ein wichtiger Gesichtspunkt.

Zur beschriebenen Variante mit Horizontalbrunnen sind folgende zwei Untervarianten möglich und haben jeweils folgende Vorteile:

Herstellung der Horizontalfilterbrunnen aus getrennten Schächten:

- Die Grundwasserkommunikationsanlage kann innerhalb der Baugrube für das Bauwerk hergestellt werden; sie ist nach dessen Herstellung unabhängig zu betreiben/zu warten;
- Bei Ausfall oder Leistungsminderung einzelner Horizontalbrunnen können diese aus dem Schachtbauwerk heraus ohne Beeinträchtigung des Bauwerks erneuert werden;
- Auch die Wartung kann über Schachtbauwerke von der Tagesoberfläche aus erfolgen.

Horizontalfilterbrunnen werden direkt vom Bauwerk aus gebohrt:

- Die Grundwasserkommunikationsanlage kann innerhalb des Bauwerks hergestellt werden, es sind keine zusätzlichen Bauwerke erforderlich;
- Wegen des Verzichts auf die Herstellung von zusätzl. Schächten ist das System preiswerter;
- Es ergibt sich kein zusätzlicher Auftrieb;
- Die Horizontalfilteranlagen werden vom Tunnel / Bauwerk aus hergestellt. Hierdurch sind keine zusätzlichen Baugrubenverbauten erforderlich

Nachteilig ist das Risiko der Flutung des Bauwerks die eine Beeinträchtigung der Nutzung und eventuelle Bauschäden zur Folge hat und allgemein als sicherheitstechnisches Risiko an zu sehen ist. Infolge des geringen zur Verfügung stehenden hydraulischen Potentials kann sich die Notwendigkeit erheblicher Längen der Filterstränge ergeben. Dies führt in Verbindung mit der verfügbaren Fläche und anderer Anforderungen aus dem Bereich Wasserqualität, Bauablauf, Einbindung der Anlagen in die Bauwerke etc. zu engen konstruktiven Vorgaben.

Diese Vorgaben müssen projektspezifisch beim Entwurf der Grundwasserkommunikationsanlagen gelöst werden. Hierbei sind besonders die geotechnischen / geologischen Randbedingungen im Hinblick auf die Bohrtechnik genauestens zu untersuchen und auszuwerten.

3.4 Flächenfilter mit Sammler- und Dükerleitungen

Die dritte Variante einer Grundwasserkommunikationsanlage kommt ohne Filterbrunnen aus. Die Grundwasserkommunikation erfolgt hier über senkrechte, bauwerksparallele Flächenfilter aus Mineralkornmisch, die über einen Sohlfilter flächig miteinander verbunden sind. Das Grundwasser strömt durch diesen Flächenfilter allein in Folge des Druckhöhenunterschiedes zwischen An- und Abstromseite. Zusätzlich können in diesen Flächenfilter Sammler- und Dükerleitungen aus Edelstahl oder HDPE-Rohren eingelegt werden, die die Strömungswiderstände verringern. Diese können über Schächte von der Tagesoberfläche gespült bzw. gewartet werden. Flächenfilter selbst sind nicht wartungsfähig.

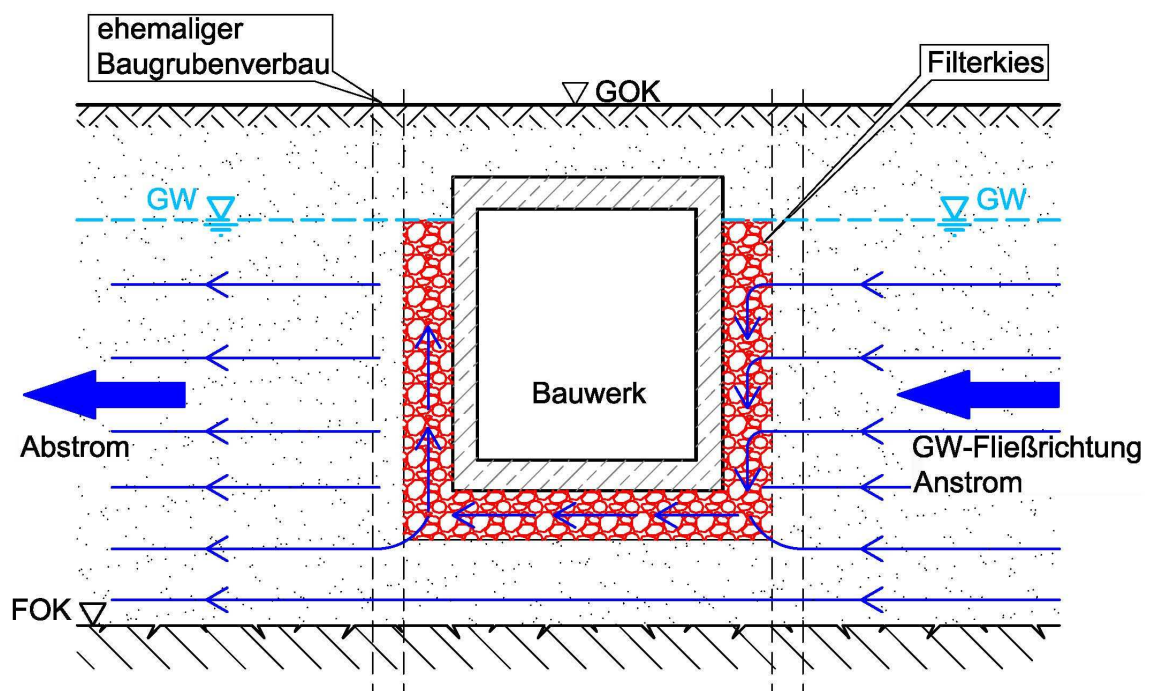


Abb. 3.3: Prinzipskizze einer Anlage mit Flächenfiltern, Sammler- und Dükerleitungen

Vorteile Variante mit Flächenfilter

- Die Herstellung von Flächenfiltern ist technisch relativ einfach und kontrollierbar;
- Bei Flächenfilteranlagen ohne zusätzliche Rohrleitungen entstehen keine Betriebs- und Wartungskosten;
- Bei zusätzlichen Sammler- und Dükerleitungen wären Spül- und Reinigungsintervalle der Leitungen möglich;
- Keine punktuelle Entnahme und Versickerung des Grundwassers. Ein lokales Versagen des Filterkörpers kann oft durch die Gesamtanlage ausgeglichen werden.

Nachteile Variante mit Flächenfilter

- Der Baugrubenaushub muss tiefer ausgeführt werden, daraus ergibt sich ein zusätzlicher Auftrieb;
- Der Baugrubenverbau muss entsprechend den maßgebenden Grundwasserleitern geöffnet werden, zwischen dem anstehenden Baugrund und dem Flächenfilter ist ein filterfester Anschluss herzustellen;
- Der Baugrubenverbau kann nicht in das Bauwerk integriert werden. Für die Herstellung des Bauwerks ist deshalb eine zweihäuptige Schalung erforderlich;
- Hohe Herstellungskosten;
- Ein Ersatz eines abgestuften Filterkörpers ist, falls erforderlich, sehr aufwendig;
- Bei einem Flächenfilter ohne Rohrleitungssystem ist keine Wartung möglich, Funktionseinschränkungen infolge von Verockerungen, Verschleimungen etc. sind nicht reversibel;
- Eine Wartung ist auch bei eingebauten Dükern und Sammlerleitungen nur für diese möglich. Die Ortung von Schadstellen ist so aber zumindest möglich.

Zusammenfassend ist eine Grundwasserkommunikationsanlage ohne Filterbrunnen als Sonderfall anzusehen, der nur unter bestimmten Voraussetzungen ausgeführt / hergestellt werden kann. Die Installation ist, da Sie nicht in das spätere Bauwerk integriert werden kann, insgesamt teuer. Eine nachhaltige Wartung der Anlage ist nur eingeschränkt möglich, bei einem Ausfall der Anlage entstehen hohe Kosten. Der Betrieb kann bei entsprechend günstigem Grundwasserchemismus (vgl. Kap. 5) günstig sein, da keine weiteren Betriebskosten (Strom etc.) entstehen.

Eine Variante zu dieser Konstruktion ist die Herstellung einer Flächendrainage mittels überschnittener Großbohrungen, die anschließend mit Filterkies verfüllt werden und damit einen zusammenhängenden Filterkörper bilden. Dies hebt einige der erwähnten Nachteile auf. Die Konstruktion des

Filterkörpers kann unabhängig vom eigentlichen Bauwerk erfolgen. Der Baugrubenverbau kann erhalten bleiben, damit ist auch eine Integration des Verbaus in das endgültige Bauwerk möglich.

4. BEMESSUNGSVERFAHREN

4.1 Grundwasserhydraulik

Zur Dimensionierung der Grundwasserkommunikationsanlagen ist eine genaue Kenntnis der überzuleitenden Wassermenge erforderlich. Zum vollständigen Ausgleich der Baumaßnahme muss diejenige Wassermenge übergeleitet werden, die im Ausgangszustand ohne Bauwerk den Bereich des Grundwasserleiters durchfließt. Diese berechnet sich aus dem Bauwerksquerschnitt senkrecht zur Strömungsrichtung, dem natürlichen Ausgangsgefälle und der Aquiferdurchlässigkeit (k_f -Wert). Insbesondere bei hoch durchlässigen Aquiferen ergeben sich große Wassermengen bei geringem Gefälle. Bei geringen Aquiferdurchlässigkeiten ergeben sich andererseits steile Absenktrichter bzw. Aufstaukegel bei punktueller oder linienhafter Grundwasserfassung und –wiederversickerung.

Ein technisches Ersatzsystem kann sich unter diesen Anforderungen eventuell sehr aufwendig gestalten. Wird ein gewisser Aufstau und Sunk zugelassen, verringert sich durch die damit erzwungene teilweise Umströmung des Bauwerks einerseits die überzuleitende Wassermenge, andererseits steht eine größere Potenzialdifferenz zwischen Entnahme und Wiederversickerung zur Verfügung. Der quantitative Zusammenhang zwischen zulässigem Aufstau und überzuleitender Wassermenge lässt sich nur durch eine detaillierte Modellberechnung beantworten.

Je nach technischer Ausgestaltung der Anlagen zu Grundwasserfassung und Grundwasserversickerung kommen verschiedene Bemessungsverfahren zur Anwendung.

4.2 Vertikalfilterbrunnen

Vertikalbrunnen werden über die DUPUIT-THIEMschen Brunnenformeln berechnet. Diese sind geschlossene analytische Lösungen der rotationssymmetrischen Brunnenanströmung, die unter anderem von folgenden Voraussetzungen ausgehen:

- Die Brunnenanströmung erreicht einen stationären Zustand;
- Es handelt sich um eine gesättigte Sickerströmung;
- Im Einzugsbereich befinden sich außer dem Brunnen keine sonstigen Quellen und Senken; insbesondere werden keine Grundwasserneubildung oder flächigen Wasserverluste durch Verdunstung berücksichtigt;
- Der Untergrund ist homogen und isotrop;

- Der Brunnen ist über die ganze Mächtigkeit des Grundwasserleiters verfiltert (vollkommener Brunnen). Allerdings können unvollkommene Brunnen durch eine Korrektur der zuströmenden Wassermenge berücksichtigt werden;
- Das Wasser tritt im gesamten Bereich der benetzten Filterfläche des Brunnens mit gleicher waagerechter Geschwindigkeit ein;
- Das Wasser fließt dem Brunnen von allen Seiten gleichmäßig zu. Es bildet sich ein konzentrischer, parabelförmiger Absenktrichter um den Brunnen.

$$Q = \frac{\pi \cdot k \cdot (H^2 - h^2)}{\ln R - \ln r}$$

Gleichung 4.1: Fördermenge eines vollkommenen Vertikalbrunnens

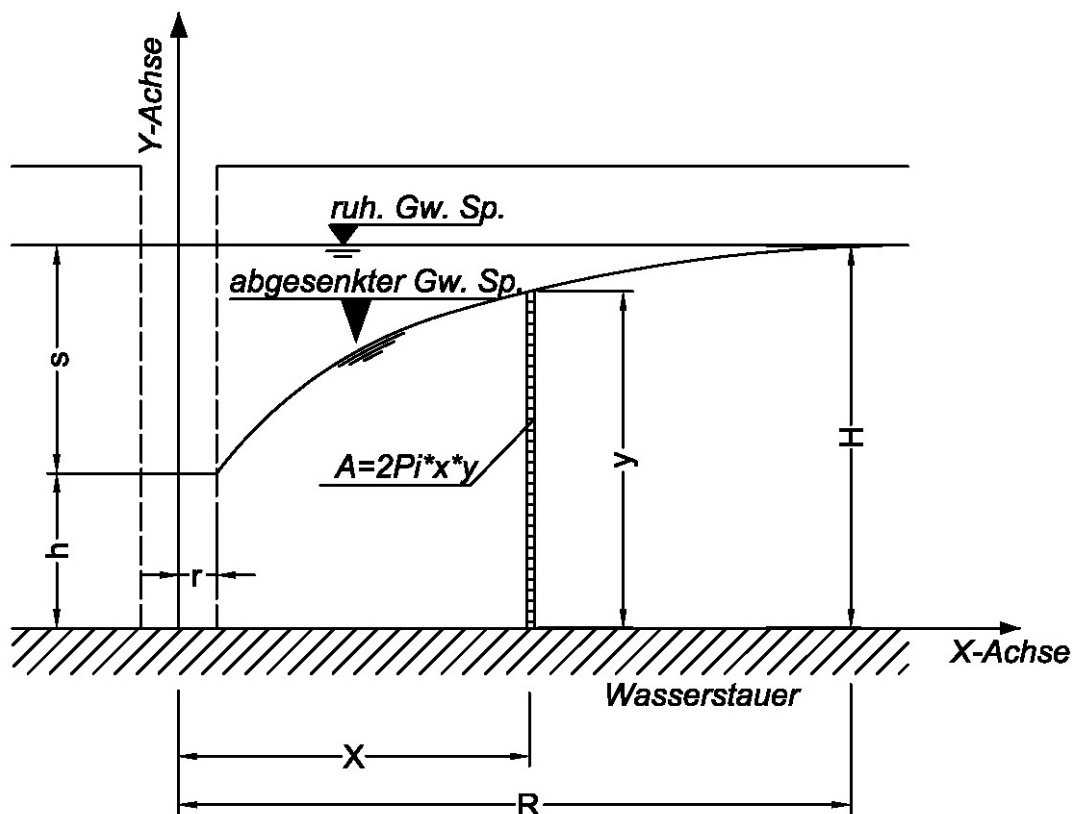


Abb. 4.1: Radialsymmetrische Anströmung eines vollkommenen Vertikalbrunnens

Bei gleichzeitigem Betrieb von mehreren Brunnen laufen die Absenktrichter der einzelnen Brunnen ineinander über, überlagern und addieren sich. Die Fördermengen und Absenkungen der Einzelbrunnen beeinflussen sich gegenseitig. Es ist leicht vorstellbar, dass bei vorgegebener Entnahmemenge die Absenkungen in den Einzelbrunnen des Brunnenfeldes grösser sind, als wäre nur ein Brunnen alleine in Betrieb. Umgekehrt werden bei vorgegebenen Absenkungen die Entnahmen

der Einzelbrunnen geringer im Vergleich zum alleine betriebenen Einzelbrunnen. Deshalb können die Werte nicht unabhängig von einander berechnet werden.

Nach FORCHHEIMER lässt sich aus der Überlagerung der Gleichung nach DUPUIT-THIEM die Absenkung in einem beliebigen Punkt des Grundwasserleiters infolge des Betriebes mehrerer Brunnen ermitteln. Ist nach den Absenkungen in den einzelnen Brunnen bei bekannten Entnahmen oder umgekehrt nach den Entnahmemengen bei bekannter (vorgegebener) Absenkung gefragt, lässt sich ein Gleichungssystem aus n Gleichungen für n Brunnen herleiten und lösen.

Die Reichweite lässt sich nur aus empirischen Ansätzen bestimmen. Neben der Bedeutung für den formelmäßigen Zusammenhang zwischen Absenkung und Entnahme ist die Kenntnis vor allem auch für die Beurteilung der Überlagerung der einzelnen Fassungen wichtig. Daneben ist zu prüfen, ob die Fassungsanlagen den gesamten Anstrombereich erfassen und damit flächendeckend ein Aufstau vermieden werden kann.

In der Regel werden bei großen und sehr tiefen Absenkungen sowie bei langfristigen Maßnahmen höhere Reichweiten beobachtet. Hier wären neben den rein grundwasserhydraulischen Ansätzen auch hydrologische Überlegungen in die Berechnung einzubeziehen. Auf Dauer kann bei einer Grundwasserabsenkung nicht mehr Wasser gefördert werden, als sich im Zuflussgebiet neu bildet. Jede Fördermenge, die die natürliche Grundwasserneubildung übersteigt, greift den Grundwasservorrat an und führt zu einer sich ständig ausweitenden Absenkung. Dies lässt sich auch aus der Wasserhaushaltsgleichung ableiten. Erste Ansätze, diese Problematik zu berücksichtigen, können bei HERTH & ARNDTS (1994) nachgelesen werden.

4.3 Vollkommene Sickerschlitz

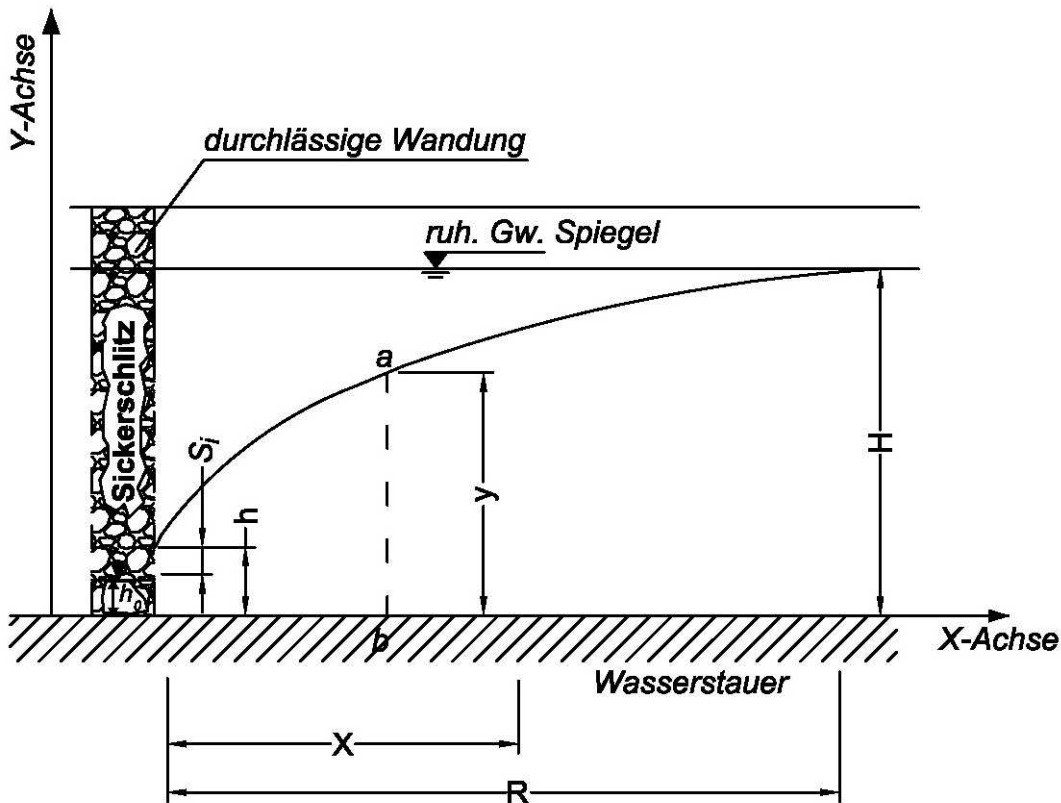
Für linienhafte Entnahmen über vollkommene Sickerschlitz also Flächenfilter gelten die Ausführungen zu den vollkommenen Vertikalbrunnen analog. Es wird somit auf die vorstehenden Ausführung und die weiterführende Literatur verwiesen.

$$Q = \frac{k}{2} \cdot \frac{(H^2 - h^2)}{R}$$

Gleichung 4.2: Fördermenge eines vollkommenen Sickerschlitzes

Mit Gleichung 4.2 lässt sich die Fördermenge eines vollkommenen Sickerschlitzes (entsprechend einem Flächenfilter) in Abhängigkeit von der Absenkung ermitteln. Die berechnete Fördermenge

gilt dann allerdings nur für den Zufluss von einer Seite pro laufenden Meter Sickerschlitz. In Abbil-



dung 4.2 ist das Prinzip dargestellt.

Abb. 4.2: Anströmung eines vollkommenen Sickerschlitzes

4.4 Dränleitungen und Horizontalfilter

Bei unvollkommenen Brunnen und Sickerschlitzten erhöht sich durch den Zufluss von unten die Wassermenge. Dies kann durch die Multiplikation der berechneten Entnahmemenge mit einem Korrekturfaktor berücksichtigt werden. Je tiefer der Grundwasserspiegel abgesenkt wird und je flacher eine Fassung ist, desto mehr wächst der Einfluss des Zuflusses aus den Schichten unter der Sohle der Fassungsanlage.

Zur Bemessung von Horizontalfassungsträngen reicht der Ansatz für die vollkommenen Sickerschlitzte deshalb nicht aus. Aus den Modellversuchen von Chapmann (1956) wurde die folgende empirische Formel entwickelt. Dieses Berechnungsverfahren kann vor allem größere Flächendrainagen für ständige Absenkungsanlagen berechnen.

$$q = \left(0.73 + 0.27 \cdot \frac{T - t_0}{T} \right) \cdot \frac{k}{2 \cdot R} \cdot (T^2 - t_0^2)$$

Gleichung 4.3: Fördermenge eines unvollkommenen Sickerschlitzes

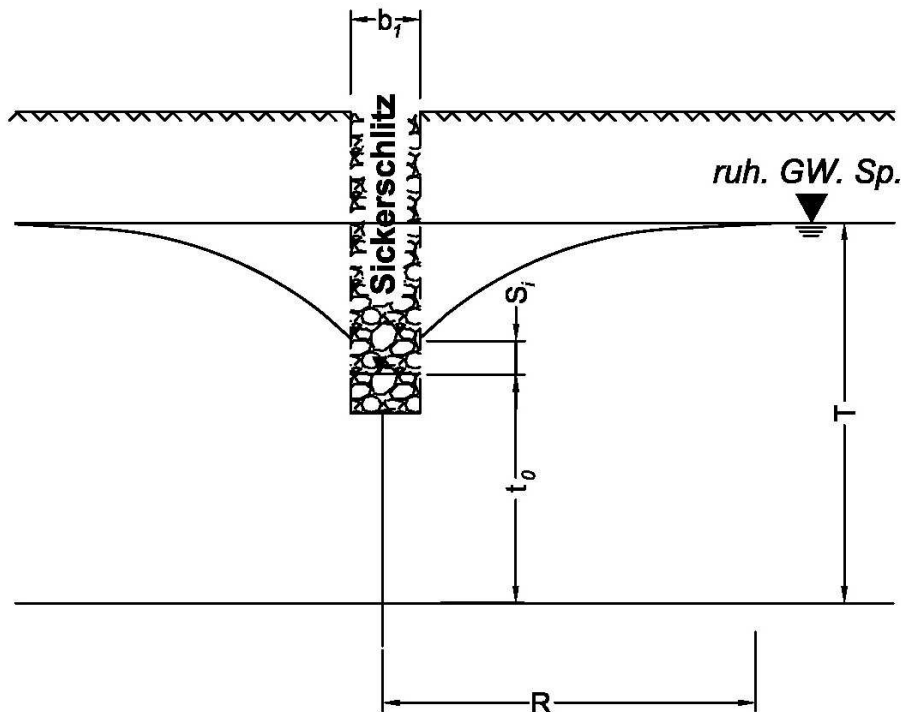


Abb. 4.3: Anströmung eines unvollkommenen Sickerschlitzes

4.4.1 Fassungsvermögen und Ergiebigkeit

Alle Grundwasserfassungen werden nach den zwei Kriterien **Fassungsvermögen** und **Ergiebigkeit** bemessen. Das Fassungsvermögen ist die Wassermenge q , die in einem Brunnen bei einer bestimmten Absenkung höchstens gefördert werden kann, ohne den Brunnen durch Versandung vorzeitig unbrauchbar zu machen. Die Ergiebigkeit eines Brunnens ist hingegen diejenige Wassermenge, die dem Brunnen bei einer bestimmten Absenkung aus dem Aquifer zufließt.

Bei Grundwasserkommunikationsanlagen, die nur mit dem natürlichen Gefälle ohne zusätzliche Pumpen arbeiten, stellt sich insofern ein Sonderfall ein, als dass das Fassungsvermögen in der Regel nicht bemessungsrelevant ist. Aufgrund des geringen Druckunterschiedes zwischen Grundwasser und Fassung sind die Eintrittsgeschwindigkeiten über die Filterflächen sehr gering.

4.4.2 Versickerungsbrunnen

Der Aufstaukegel um einen Versickerungsbrunnen bildet sich in der gleichen Art wie der Absenktrichter in einem Entnahmebrunnen aus. Zu Berechnung von Versickerungsbrunnen können die gleichen Formeln verwendet werden. Dabei wird die Wassermenge zur Versickerung mit einem negativen Vorzeichen versehen, der Wasserstand im Brunnen liegt entsprechend über dem Ruhewasserspiegel.

Während sich beim Absenktrichter um einen Entnahmebrunnen durch die fortschreitende Ausdehnung mit der Zeit für die Bemessung einer Baugrubenentwässerung eine zusätzliche Sicherheit ergibt, ist die fortschreitende Erhöhung des Aufstaukegels bei konstanter Versickerungsleistung ein Effekt, der einer genaueren Untersuchung bedarf. Soll eine bestimmte Wassermenge versickert werden, ist zum Nachweis der Funktionsfähigkeit der Versickerung über die geplante Betriebsdauer der Anlage eine instationäre Berechnung erforderlich.

Nach HERTH & ARNDTS (1994, 105ff.) ist der k_f Wert für die Berechnung der Versickerung nur mit einem Viertel des k_f Wertes des Aquifers anzusetzen. Dies bezieht sich sowohl auf die Berechnung der Ergiebigkeit als auch auf die Ermittlung des Fassungsvermögens und stellt eine maßgebende Größe für die Varianten mit Filterbrunnen dar.

4.5 Überleitung des Grundwassers / Technische Hydraulik

Die Überleitung des gefassten und wieder zu versickernden Grundwassers erfolgt bei den meisten der vorgestellten Varianten über Düker und Rohrleitungen. Diese und die damit verbundenen Einbauten wie Schieber, Krümmer etc. sind hydraulisch nachzuweisen. Da bei hohen Wassermengen und geringen Potentialunterschieden auch diese technischen Elemente einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf das Gesamtsystem der Grundwasserkommunikationsanlage haben können.

Erfahrungen aus der Bemessung zeigen, dass hier teilweise abstrus anmutende Querschnitte erforderlich sind, um die Wassermengen bei den geringen zur Verfügung stehenden Druckunterschieden überleiten zu können. Eine regelrechte Bemessung über die üblichen Berechnungsverfahren der Rohr- und Gerinnehydraulik ist also vorzunehmen.

Hier gibt es eine Reihe von Bemessungshilfen in Form von Tabellen und Nomogrammen. Zum Beispiel das in Abb.4.4 gezeigte für den Strömungswiderstand in glatten Rohren. Falls aufgrund der Rohreigenschaften und der technisch eher ungewöhnlichen Dimensionierung bei geringen Durchflussmengen keine Bemessungshilfe zur Verfügung steht, bleibt die Möglichkeit über die Formeln nach Gaukler, Manning, Strickler und Benutzung des Moody Diagramms die Berechnung selber vorzunehmen (WENEDHORST 1996).

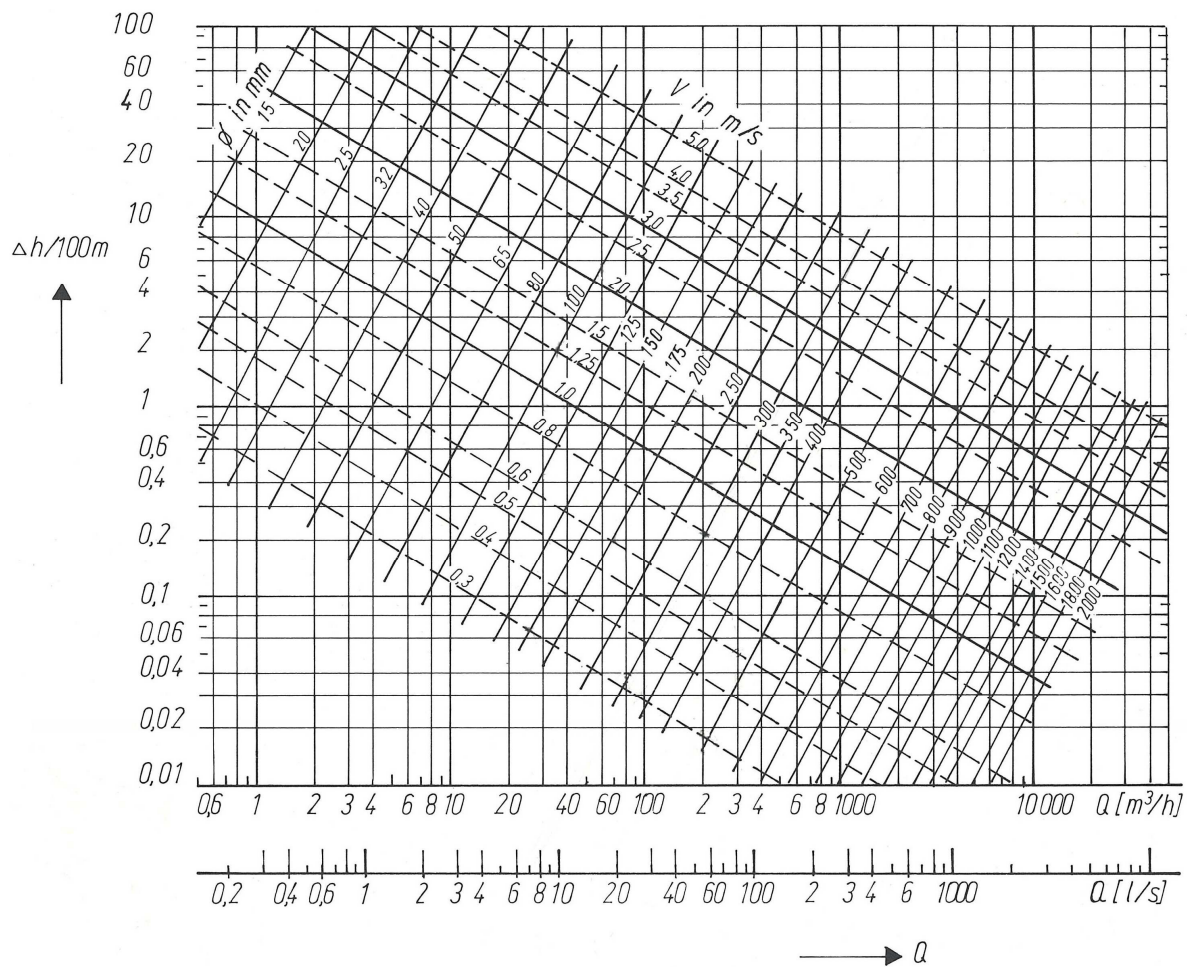


Abb. 4.4: Strömungswiderstand in glatten Röhren bei Förderung von kaltem Wasser (aus HERTH & ARNDTS 1994)

Örtlich konzentrierte Verluste an Einbauten wie Krümmern, Verzweigungen und Schiebern sind zusätzlich zu berücksichtigen. Eintrittsverluste in Filterrohre können beim Hersteller erfragt werden. Auch der Fließwiderstand in Horizontalfilterbrunnen, die teilweise eine erhebliche Länge haben können, ist nachzuweisen.

4.6 Gang des Bemessungsverfahrens

Zunächst ist eine Aufstauberechnung notwendig um zu beurteilen, ob eine Grundwasserkommunikation erforderlich ist. Dann ist die überzuleitende Wassermenge zu bestimmen. Der vorhandene Potentialunterschied zwischen Fassung und Wiederversickerung addiert sich aus dem natürlichen Grundwassergradienten multipliziert mit dem Abstand zwischen Entnahme und Versickerung und der maximal zulässigen Aufstauhöhe.

Anschließend kann nach der Entscheidung für eine Variante der Grundwasserkommunikation im Rahmen einer vertieften Machbarkeitsstudie mit Vorplanungscharakter die Bemessung der Fassungs- und der Versickerungsanlagen erfolgen. Diese können nicht spiegelbildlich dimensioniert werden, d.h. die Berechnung für die Versickerungsanlage unterscheidet sich nicht nur um das Vorzeichen von der Berechnung der Fassungsanlage. Die Versickerung ist aus verschiedenen Gründen problematischer und erfordert eine größere Sicherheitsreserve bei der Bemessung. Auf Basis des verbleibenden Potentialgefälles ist die Überleitung von einer Bauwerksseite auf die andere unter Berücksichtigung aller technischen Einbauten zu entwerfen.

5. EINFLÜSSE AUF DIE LEBENSDAUER UND GEGENMASSNAHMEN

5.1 Wasserchemische Einflüsse und Randbedingungen

Der Wasserchemismus und die Wasserinhaltsstoffe haben einen erheblichen Einfluss auf Funktionstüchtigkeit und Lebensdauer einer Grundwasserkommunikationsanlage. Insbesondere Verockerung, Verbraunung, Versinterung und Verschleimung können die Funktionstüchtigkeit einer Grundwasserkommunikationsanlage gefährden.

Sind negative Auswirkungen der Grundwasserzusammensetzung auf die geplante Anlage zu befürchten, ist eine Konstruktionsweise, die eine Revision und Wartung der Anlage zulässt anzuraten. Dazu können zum Beispiel in Horizontalbrunnen, Dükern und anderen Rohrleitungen durch separate Schieber oder Kugelventile verschließbare Reinigungsöffnungen vorgesehen werden, die gleichzeitig für Kontrollen (Kamerabefahrungen etc.) genutzt werden können. Für den ungestörten Betrieb einer Filteranlage sind nachfolgende Faktoren zu berücksichtigen.

- Chemische Verockerung durch Eisen- und Manganionen, mit der Bildung von Eisenhydroxid und Manganoxid (Braunstein) durch erhöhte Sauerstoffzufuhr infolge turbulenter Strömungsverhältnisse;
- Mikrobiologische Verockerung durch eisen- manganoxidierende Bakterien;
- Verschleimung von Filteranlagen durch mikrobiologische Tätigkeit schleimbildender Bakterien; Voraussetzung ist die Entstehung geeigneter Milieubedingungen: Belüftung infolge turbulenter Strömungsverhältnisse, Veränderung des Nährstoffangebotes beim Fördern von Grundwasser, Temperaturveränderungen;
- Verkalkung (Ausscheidung/Ausfällung von Calciumkarbonat) durch Veränderung des Lösungsgleichgewichtes infolge von Luftzutritt, Temperaturveränderungen, pH-Wertverschiebungen;
- Verschlammung, Versandung durch Subrosion im Umfeld der Anlage;
- Korrosion der Filtermaterialien.

Zur Minimierung derartiger Erscheinungen können verschiedene Maßnahmen getroffen werden:

- Hydraulische Verbindungen zwischen Grundwasserleitern mit unterschiedlichen Eigenschaften (Redoxpotential, Fe-, O₂-Gehalt) sind generell problematisch und daher zu vermeiden (undichte Muffen, fehlende oder korrodierte Dichtungsringe);
- Zur Vermeidung von chemischen Veränderungen des Grundwassers ist für Filterrohre, Düker und andere Einbauelemente das gleiche Material zu verwenden. Aus Gründen der mechanischen Stabilität und Lebensdauer ist Edelstahl zu empfehlen;
- Vermeidung von Turbulenzen durch geeignete Materialwahl und konstruktive Vorsorgemaßnahmen insbesondere bei der Anbindung von Fassungsanlagen an Sammelschächte;
- Unterbindung von Belüftung und Entspannung durch Gewährleistung von ständiger Benetzung der Filterstränge und luftdichtem Verschluss des gesamten Leitungssystems.
- Für eine verstärkte Kontrolle und Reinigung, sind Reservebrunnen vorzuhalten, die bei Bedarf zugeschaltet werden können. Überschlägig sollte von einem Mehrbedarf von ca. 50% ausgegangen werden, so dass jeder zweite Brunnen einen Reservebrunnen erhält. Durchmesser DN 200 – 250 sind für die Brunnenregenerierungstechnik problemlos zugänglich (auch Düker und Horizontalfilterstränge).

5.2 Chemische und mikrobiologische Verockerung

Ab einem Eisen (II)- und Mangan(II)-Gehalt von 0,2 mg/l ist mit der Gefahr von chemischen Verockerungen zu rechnen. Anhand der Ergebnisse der chemischen Laboruntersuchungen sind besonders in den tertiären Grundwasserleitern Verockerungserscheinungen zu erwarten. Der Zeitpunkt des Auftretens kann aufgrund der vielen Einflussfaktoren, die eine Verockerung begünstigen, nicht genau eingeschätzt werden. Verockerungserscheinungen können z.T. erst nach einer längeren Zeitspanne beobachtet werden.

Turbulenzen und Druckunterschiede, die zu einem Austragen von Sauerstoff und Kohlendioxid führen, sind zu vermeiden. An Drainagen findet generell eine Belüftung des Grundwassers (Oxidation von Fe und Mn) statt. Aber auch an Brunnen, die nicht in Betrieb sind, ist schon eine Verockerung in Form von Auswachsungen im Filterbereich beobachtet worden, da ein GW-Aufschluß mit freier Oberfläche eine Störung des natürlichen Zustandes darstellt. Als konstruktive Vorsorgemaßnahmen können z. B. Schächte mit gering gespannten Verhältnissen, die einen Kontakt mit der Luft ausschalten, konzipiert werden.

Die mikrobiologische Verockerung setzt das Vorhandensein von Eisen-Manganbakterien voraus. Werden im Filter große Wassermengen durchgesetzt, ergeben sich günstige Lebensverhältnisse

für Fe-Bakterien (z. B. *Gallionella ferruginea*). Eisenbakterien metabolisieren große Fe-Massen um ihren Energiebedarf abzudecken. Eine Mindestfracht ($> 0,2 \text{ mg/l Fe}^{2+}$, jedoch $< 15 \text{ mg/l}$) scheint für sie notwendig zu sein. Spülbohrungen, die mit Bentonit- oder zellulosehaltigen CMC-Zuschlagstoffen ausgeführt werden, begünstigen einen Keimbefall. Geotextilien können durch günstige Substrateigenschaften quasi als Biorasen fungieren. Sie tragen damit indirekt zur Verminderung der Leistung der Anlage bei.

5.3 Verkalkung bzw. Versinterung

Ab einer Hydrogenkarbonathärte größer 100 mg/l CaO ist generell die Gefahr der Verkalkung gegeben. In der Umgebung kalkhaltiger Sedimente (z. B. Muschelschluff, Geschiebemergel) können während der Bauphase Grenzflächeneffekte wie Verkalkung und ggf. Vergipsung auftreten. Aber auch in Verbindung mit Baumaßnahmen kann eine Verkalkung durch die chemische Beeinflussung von Beton im frischen Zustand induziert oder beschleunigt werden. Während der Betonierphasen kann sich außerdem das Brunnenwasser trüben. Besonders sorgfältig sind Angaben zur mineralogischen Beschaffenheit des Filtermaterials zu prüfen. Eine Ausscheidung von Kalk wird durch die Ausgasung von Kohlendioxid bei Temperaturerhöhung, Druckerniedrigung und/oder Senkung des pH-Wertes begünstigt.

5.4 Korrosion

Für den Betrieb von Brunnenanlagen sind auch die Eigenschaften bezüglich der Korrosion von Rohren zu beachten (z. B. Korrosion von Cu-Dichtungsringen in Pumpen). Mit Edelstahl- oder Kunststoffrohren können Korrosionsschäden durch gelöstes CO_2 unterbunden werden. Prinzipiell ist es wichtig die gesamte Anlage aus dem gleichem Material zu erstellen.

5.5 Hydromechanische Einflüsse

Je nach Korngrößenverteilung des Aquifers ist eine Versandungsgefahr vorhanden. Bei Verfilterung in schluffigen Bereichen besteht die Gefahr, dass sich die Filter zusetzen. Als Schutz bzw. vorbeugende Maßnahme z. B. gegenüber tertiären Fließsanden können doppelte Filtersandpackungen (Stufenfilter) und Filtertresen aus Metallgewebe verwendet werden. Sicherheitsnachweise (geometrisches und hydraulisches Kriterium) für $\eta = 2$ werden empfohlen. Unter Umständen kann über eine Saugstromsteuerung das Grundwasser bestimmter Grundwasserleiter gezielt gehoben werden.

5.6 Biologische Einflüsse

In Filterrohre eingedrungene Haarwurzeln können auf Dauer die Filterfunktion beeinträchtigen. Aus diesem Grund ist ein Anbau von Pflanzen mit starker Neigung zur Ausbildung von tiefen Wurzeln in der Umgebung der Filteranlagen zu vermeiden. Durch eine entsprechend tiefe Anordnung kann dieser Einfluss weitgehend ausgeschaltet werden.

5.7 Materialien und deren Eigenschaften

Die Lebensdauer und die Wartungsempfindlichkeit der Anlagen kann durch geeignete Materialauswahl erheblich beeinflusst werden. Es werden daher im Folgenden kurz einige Materialien vorgestellt. Für weitergehende Informationen wird auf entsprechende Literatur verwiesen.

Zur Lebensdauer von PVC liegen nur Hochrechnungen vor. Nach allgemeinen Erfahrungen ist die Lebensdauer von PVC auf 20 bis 25 Jahre begrenzt. Die Verwendung von PVC ist darüberhinaus in manchen Regionen grundsätzlich zu genehmigen. Je nach Beanspruchung (Temperatur, Zug oder Druck) sollte die Lebensdauer von PE 50 bis 70 Jahre betragen. Unterschiedliche Festigkeitseigenschaften ergeben sich als Funktion der Zeit und Temperatur.

Der Einsatz von Geotextilien ist bezüglich einer Bewertung der Langzeitstabilität ungünstig, da eine mögliche Verockerung bzw. Versinterung der Öffnungen nicht ausgeschlossen werden kann. Außerdem sind eingebaute Geotextilien für die Wartung schwer zugänglich. Obwohl sich Keramikfilter bzw. Filterelemente aus Steingut in der Bergbaupraxis bewährt haben, werden diese derzeit nicht mehr hergestellt und stehen damit aktuell nicht zur Verfügung.

Aufgrund der Lebensdauer, Korrosionsbeständigkeit und Festigkeit (z. B. gegenüber einer Hochdruckbehandlung) haben Edelstahl-Vollrohre und –Filterrohre deutliche Vorteile gegenüber anderen Materialien. Weitere Materialien der Rohre können PE, HDPE, PTFE sein. Sehr günstige Reinigungseigenschaften weisen Edelstahl-Wickeldrahtfilter (Öffnungen in Wasserstrahlrichtung, Tiefenwirkung in der Filterpackung, feine Abstufung der Schlitzweiten möglich) auf. Steinzeugrohre aus dem Kanalbau sind als Längs- und Querrohre einsetzbar.

5.8 Reinigung von Filteranlagen

Der Wartung der eingesetzten Elemente bei den vorgestellten Grundwasserkommunikationsanlagen mit Filterbrunnen kommt eine erhöhte Bedeutung zu. Es werden daher im Folgenden kurz einige Verfahren vorgestellt.

- **Mechanische Verfahren:** Bürsten, Spülen und Abpumpen (Entschlammern und Entsandern)
- **Hydromechanische Verfahren:** Wasserstrahl, Hochdruck-Wasserstrahl, Ultraschall, Sprengschocken;
- **Chemische Verfahren:** Entkrusten mit Salzsäure, Ameisen-, Citronen- und Neutralisationsprodukten, abschnittsweise Behandlung mit Packer, Erzeugung von Kurzschlußströmungen/Zirkulationswalzen, Entseuchen: Keimabtötung mit hypochlorithaltiger Lösung.
- **Fe-OH-Schlämme/Schleime:** Gallertartiger Konsistenz kann gut mechanisch gereinigt werden. Durch Dehydratation geht der Eisenschlamm in eine feste Form über. Es erfolgt die Bildung von Krusten (Vererzung), die nur noch erschwert chemisch gereinigt werden können. Eine Vererzung sollte durch regelmäßige Inspektionen (TV-Kamerabefahrung, Analysenprogramm) und vorbeugende Maßnahmen (mechanische und chemische Reinigung) vermieden werden. Konstruktive Vorsorgemaßnahmen sind für die Regenerierung zu konzipieren.

6. CITY-TUNNEL LEIPZIG

6.1 Projektübersicht

Das Projekt City-Tunnel Leipzig ist der zentrale Baustein für die Neuordnung des Eisenbahnnetzes im Großraum Leipzig. Mit dem City-Tunnel wird eine durchgängige Nord-Süd-Verbindung zwischen den beiden Kopfbahnhöfen Bayerischer Bahnhof (Süden) und Leipzig Hauptbahnhof (Norden) unter der Innenstadt von Leipzig geschaffen (Abb. 6.1).

Die Gesamtlänge der neu herzustellenden Bahnverbindung beträgt ca. 5,3 km, die Länge der Tunnelstrecke einschließlich der Rampen ca. 3,9 km. Es werden eine oberirdische Station, der Haltepunkt Semmelweisstraße, sowie vier unterirdische Stationen: Bayerischer Bahnhof, Wilhelm-Leuschner-Platz, Markt und Hauptbahnhof errichtet (Abb. 6.2).

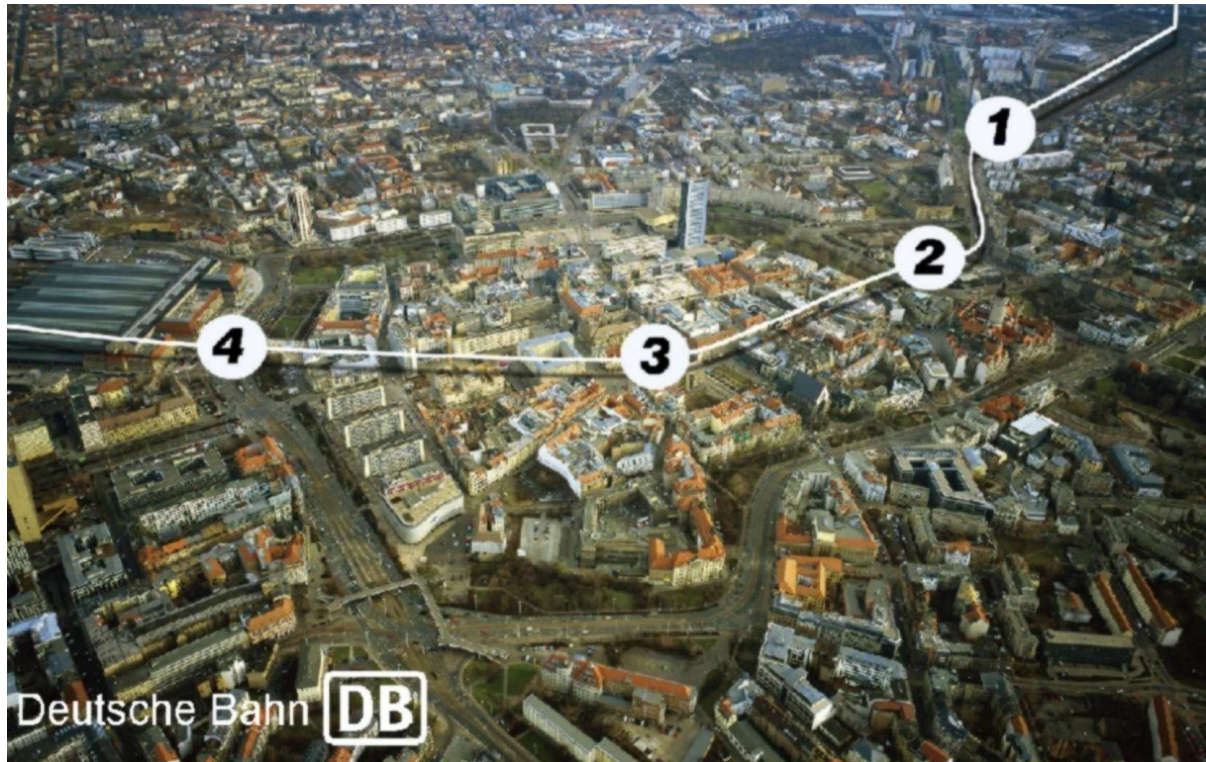


Abb. 6.1: Verlauf des City-Tunnels durch Leipzig; Haltepunkte: 1 - Bayerischer Bahnhof, 2 - Wilhelm-Leuschner-Platz, 3 - Markt, 4 - Hauptbahnhof

Die Stationen werden zweischalig in offener Bauweise, die Tunnelröhren unter der Innenstadt einschalig im Schildvortrieb hergestellt. Im Süden und Norden erfolgt die niveaufreie Einbindung ins vorhandene Streckennetz mittels Rampen und Überwerfungsbauwerken.

Die Tunnelstrecke im Innenstadtbereich, die in großen Teilen unter dichter, mehrgeschossiger Bebauung verläuft, besteht aus zwei Röhren mit einem Außendurchmesser von 9 m und einer Länge von jeweils ca. 1,4 km. Der Vortrieb der Röhren erfolgt mit einem Hydroschild mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust und beginnt jeweils am Nordkopf der Station Bayerischer Bahnhof und endet am Südkopf der Station Hauptbahnhof.

Sowohl die Tunnelröhren als auch die Stationen und Rampenbauwerke liegen fast durchgängig unterhalb des Grundwasserspiegels und können unter ungünstigen Randbedingungen ein Strömungshindernis darstellen. Während die Tunnelröhren in durchlässigen Schichten liegen und damit Umströmungen gewährleistet sind, kann es insbesondere im Bereich der Haltepunkte und Rampen zu einem unerwünschten Aufstau des Grundwasserspiegels kommen. Deshalb sind diese Bereiche in geohydraulischer Hinsicht besonders zu untersuchen. Wenn sich durch geeignete bauliche Maßnahmen ein unverträglicher Aufstau nicht vermeiden lässt, werden im Bereich der Haltepunkte und Rampen Grundwasserkommunikationsanlagen (GWK-Anlagen) installiert.

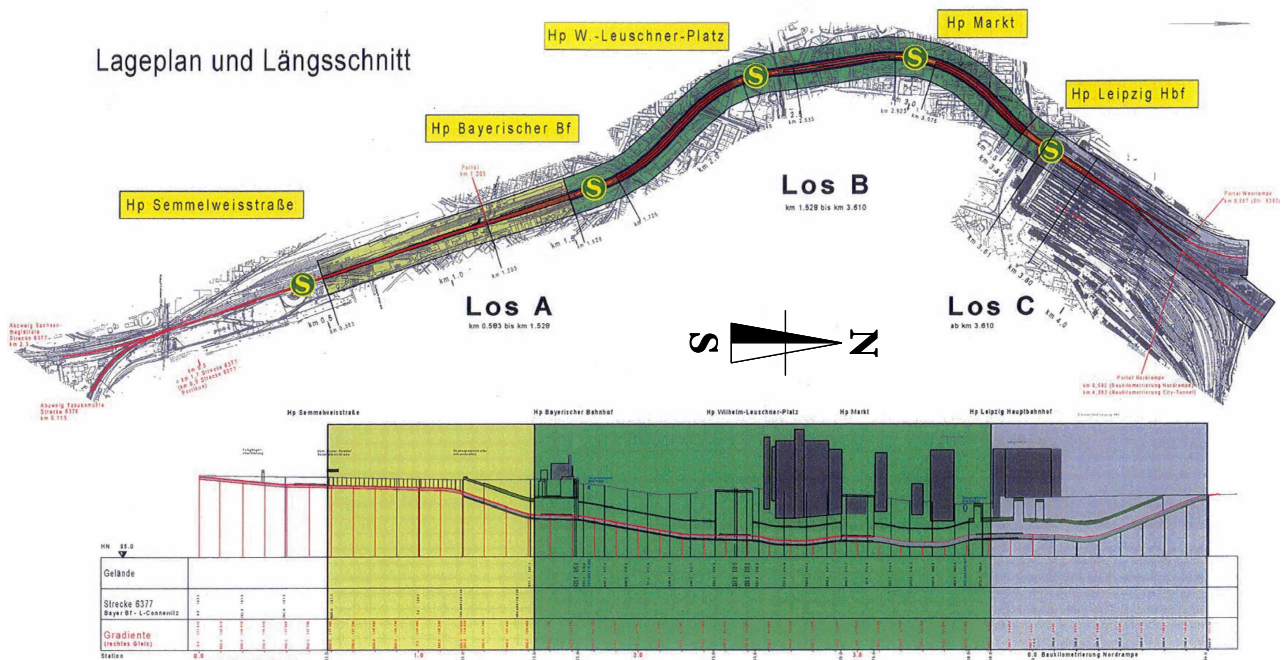


Abb. 6.2: Draufsicht und Längsschnitt – Tunnelstrecke einschl. Rampen

6.2 Geologische und hydrogeologische Verhältnisse

Seit 1997 wurden in mehreren Erkundungs- und Untersuchungsphasen die geotechnischen und hydrogeologischen Untersuchungen für das Bauvorhaben geplant, durchgeführt und ausgewertet. Im Zuge der Aufstauberechnung und dem Entwurf der GWK- Anlagen wurden die Erkundungsarbeiten zur Ermittlung geohydraulischer Parameter im Bereich der geplanten Haltepunkte und Rampen verdichtet.

Der Baugrund im Stadtgebiet besteht im Wesentlichen aus quartären und tertiären Lockersedimenten. Insgesamt wurden anhand der Lithologie 13 quartäre und 10 tertiäre Schichten auskartiert (Abb. 6.3). Besonders im Süden und im mittleren Abschnitt werden unter den Auffüllungen bis 10 m mächtige, pleistozäne Geschiebemergel mit Bändertonen in ihrer Basis angetroffen. Es folgen ca. 17 m mächtige Flussschotter der Weißen Elster (S 12). Im Nordteil hingegen lagern unter den Auffüllungen und den Auesedimenten ca. 10 m mächtige Flussschotter der Mulde.

Unter den Flussschottern liegt im Zentrum der Trasse die bis ca. 9 m mächtige Folge des Bitterfelder Flözkomplexes. Sie besteht aus Mittelsanden mit Braunkohlenschluff- und -tonlagen sowie in Senken abgelagerten, geringmächtigen Braunkohlenflözresten.

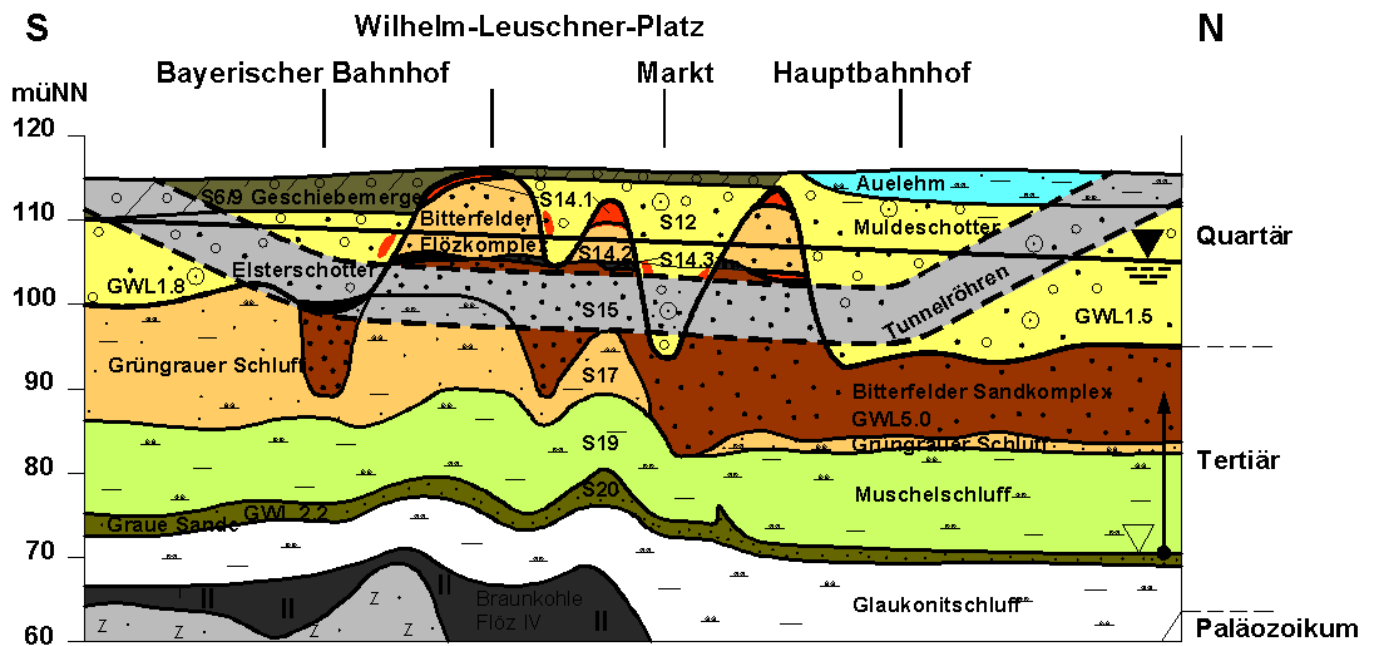


Abb. 6.3: Schematisches geologisches Modell der Gesamttrasse City Tunnel Leipzig

Die darunter folgenden tertiären Schichten bestehen im Zentral- und Nordteil aus Fein- und Mittelsanden des Bitterfelder Sandkomplexes (S15) mit einer Mächtigkeit von 7 m bis 16 m. Ihnen schließt sich, besonders im Süd- und Zentralteil, der bis 15 m mächtige Grüngraue Schluff an. Schließlich ist entlang der gesamten Tunneltrasse die markante Schichtenfolge des so genannten Muschelschluffes als regionalgeologisch bedeutender Stauer mit 4 m bis 8 m Mächtigkeit ausgebildet.

Schicht	GWL	Anzahl der Bodenproben	k _r -Wert in m/s		
			Min.	Max.	Pumpversuch
S 12	1.8	80	2,5 × 10 ⁻⁵	2,0 × 10 ⁻²	2,1 × 10 ⁻⁴
S 15	5.0	108	2,5 × 10 ⁻⁸	8,4 × 10 ⁻⁴	3,6 × 10 ⁻⁵

Abb. 6.4: Durchlässigkeitsbeiwerte der oberen Grundwasserleiter um den Haltepunkt Markt

Die Hauptgrundwasserleiter im Stadtgebiet von Leipzig werden durch pleistozäne Flussschotterterrassen und tertiäre Sande gebildet. Durch tiefgründige Erosions- und starke Akkumulationsprozesse stehen die meisten Grundwasserleiter untereinander in direkter Verbindung. Die einzelnen Aquifere weisen unterschiedliche Durchlässigkeitsbeiwerte auf. Beispielhaft für den mittleren Abschnitt der Tunneltrasse um den Haltepunkt Markt sind sie für die oberen Grundwasserleiter in Abbildung 6.4 zusammengestellt.

Die generelle Fließrichtung in den pleistozänen Grundwasserleitern ist an alte Flussläufe gebunden, die in nordwestliche Richtung entwässern (Abb. 6.5). Das tertiäre Grundwasser fließt in nördliche Richtung. Der regionale Grundwasserstand der oberen Grundwasserleiter GWL 1.8/GWL 5.0 liegt bei 105 m bis 111 m NN. Die Grundwasserstände passen sich dem Hauptvorfluter Weiße Elster an. Am Markt werden derzeit Grundwasserstände zwischen 105,3 m NN und 106,0 m NN festgestellt. Am Haltepunkt Wilhelm-Leuschner-Platz liegen die Wasserstände zwischen 107,1 m NN und 107,6 m NN.

6.3 Numerisches Grundwassermodell

Zur Feststellung der Auswirkungen der Baumaßnahme auf die geohydraulischen Verhältnisse und in Vorbereitung des Planfeststellungsverfahrens wurde ein numerisches 3-D-Strömungsmodell aufgebaut und kalibriert. Dem Grundwassermodell wurde der Simulator PCGEOFIM[®] zugrunde gelegt, der auf der numerischen Lösung der Differentialgleichung für die Geofiltration basiert. Im Weiteren wurde das Modell fortgeschrieben, präzisiert und dem jeweiligen Planungs- und Erkundungsstand angepasst. Es erfasst aktuell ca. 30 km² (Abb. 6.5).

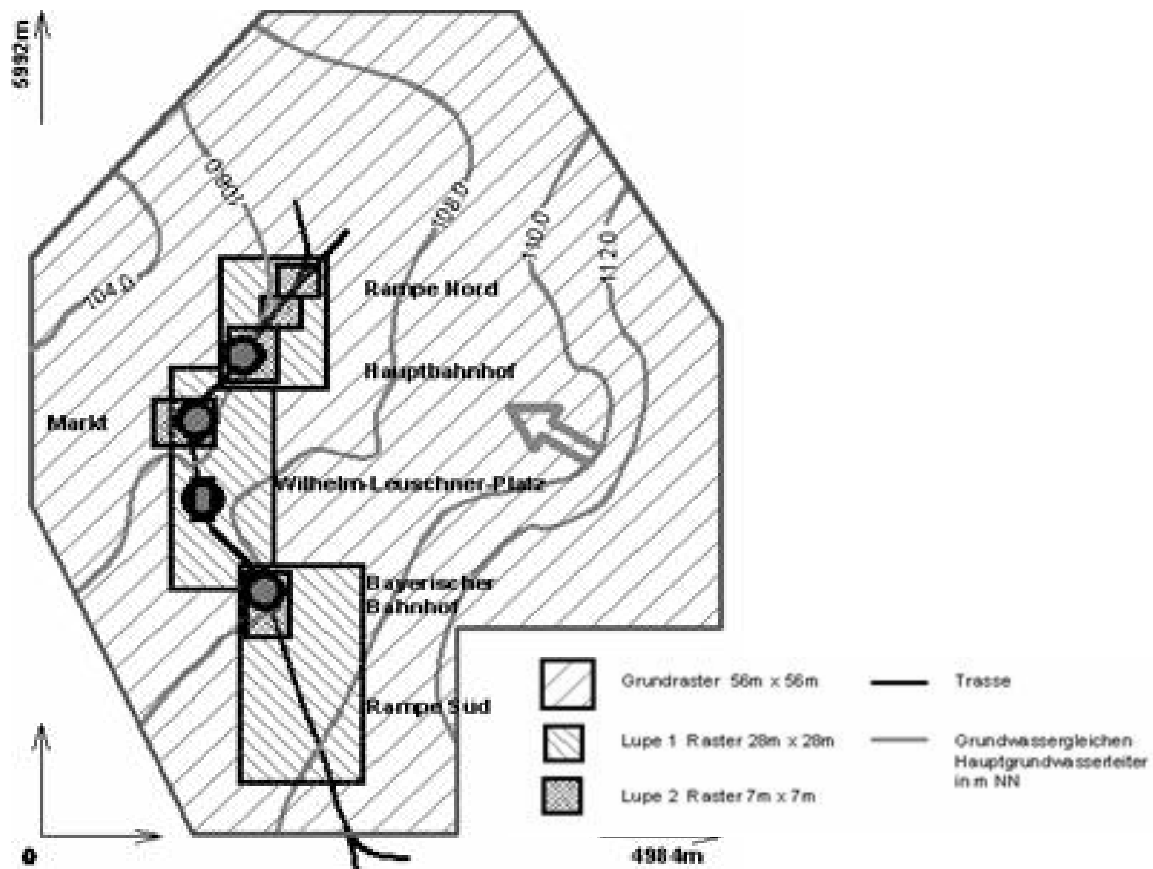


Abb. 6.5: Geohydraulisches Modellgebiet mit den Isolinien der Hauptgrundwasserleiter GWL 1.8 / GWL 5.0

Die Ergebnisse der Modellberechnungen werden im durch Isolinien der durch die Verbauzustände induzierten Grundwasserstände dargestellt. Die Veränderungen der Grundwasserstände (Aufstau- bzw. Absenkungserscheinungen) in Bezug auf die jeweilige Nullvariante (Begutachtungswasserstand ohne Bau des City-Tunnels) wurden flächenhaft visualisiert.

Für die Prognose der künftigen Grundwasserverhältnisse ist auch die Veränderung der Industriestruktur und die Neuorientierung nach 1990 von Bedeutung. Durch die Stilllegung der großen Tagebaue im Süden von Leipzig und der durch die Flutung gegebenen hydraulischen Verbindung der angeschnittenen Grundwasserleiter sowie die starke Reduzierung der Grundwasserentnahmen durch die Industrie ist ein allgemeiner Grundwasseranstieg zu verzeichnen. In dessen Folge ist eine Vernässung von Kellern in Leipzig festgestellt worden. Etwa seit dem Jahr 2001 ist keine weitere signifikante Erhöhung der Grundwasserstände im GWL 1.8 und 5.0 mehr zu verzeichnen. Der Grundwasserspiegel im oberen GWL hat inzwischen wieder die Stände der zwanziger Jahre des 20. Jahrhunderts wieder erreicht.

Ergebnis der Modellierung war neben der Prognose der erwarteten Aufstauhöhen an den Haltepunkten auch die Abschätzung der überzuleitenden Wassermengen, mit denen die Vorgaben der Planfeststellung eingehalten werden konnten.

7. GRUNDWASSERKOMMUNIKATIONSANLAGEN AM CITY TUNNEL LEIPZIG

7.1 Planung der Grundwasserkommunikationsanlagen

7.1.1 Vorgaben der Planungsbehörden

Der Aufstau an Bauwerken sowie die Umleitung von Grundwasserströmen stellen wasserrechtliche Tatbestände dar. Nach dem Planfeststellungsbeschluss ist der Aufstau auf maximal 0,1 m gegenüber dem Zustand vor dem Bau zu begrenzen. Eine Festlegung von absoluten Aufstaubeträgen konnte zum Zeitpunkt der Erarbeitung des Planfeststellungsbeschlusses nicht erfolgen, weil nicht absehbar war, wie sich der Grundwasserwiederanstieg im Stadtgebiet weiter entwickeln würde. Darüber hinaus wurden die Aufstaubeträge an allen Stationen auch einzelfallbezogen nach folgenden Kriterien bewertet:

- potentielle zusätzliche Vernässung von Gebäuden im Umfeld der Baumaßnahme;
- Einschränkung des Tiefbaupotentials.

Die Bewertung der Aufstaubeträge ist getrennt für den Bauzustand und für den Endzustand zu betrachten. Dies konnte für den Bau- und Endzustand zu unterschiedlichen Ausgleichsmaßnahmen führen.

7.1.2 Hydraulische Bemessung

Die permanenten GWK-Anlagen bestehen aus vertikalen Sammelschächten, Horizontalbrunnen und Rohrleitungen, über die das Grundwasser auf der Anstromseite gefasst, unter dem Bauwerk hindurch geleitet und auf der Abstromseite wieder in das Grundwasser eingespeist wird. Das auf der Entnahmeseite anfallende Wasser aus den Horizontalbrunnen wird durch ein geschlossenes Rohrleitungssystem über einen Düker unter dem Bauwerk von der Anstrom- auf die Abstromseite geleitet. Die Strömung in der Kommunikationsanlage erfolgt allein durch den geringen natürlichen Gradienten mit der maximal zulässigen Aufhöhung auf der Anstromseite von 10 cm. Das Wasser muss nicht gepumpt werden.

Die Bemessung der Horizontalfassungen erfolgt nach der Formel, die von CHAPMANN (1956) auf Basis von Modellversuchen für unvollkommene Sickerschlitzte entwickelt wurde. Die Modelluntersuchung hat für jedes Bauwerk die Wassermenge prognostiziert, die überzuleiten ist, um den Aufstau auf 0,1 m zu begrenzen. Aus dieser Wassermenge und der zur Verfügung stehenden Potentialhöhe ergibt sich die erforderliche Stranglänge der Horizontalfilter. Da sich aus dem zulässigen Aufstau zuzüglich des Gefälles zwischen Entnahme und Rückgabe nur wenige Dezimeter hydraulische Potentialdifferenz ergeben, sind insgesamt vergleichsweise lange Horizontalbrunnen für Entnahme und Wiederversickerung erforderlich.

7.2 Entwurf der Grundwasserkommunikationsanlage am City Tunnel Leipzig

Auf der Basis vorhandener Erfahrungen von anderen U-Bahn-Baumaßnahmen in Deutschland, bei denen GWK-Anlagen ausgeführt worden waren und chemischer und bakteriologischer Untersuchungen wurde für die Grundwasserkommunikation des City-Tunnel Leipzig ein geschlossenes System von Horizontalbrunnen, die von tiefreichenden Schächten aus hergestellt und gewartet werden, vorgeschlagen. Die Horizontalbrunnen (Innendurchmesser 100 mm) wurden mit Längen bis zu 100 m geplant und auf der Entnahmeseite parallel zum Bauwerk und auf der Versickerungsseite möglichst fächerförmig angeordnet.

Die Horizontalbrunnen wurden als Edelstahl-Wickeldrahtfilter ausgeführt. Dieses Filtermaterial weist aufgrund seines Filteraufbaus eine hohe Sicherheit gegen Verstopfung und eine im Vergleich zu anderen Filtermaterialien sehr gute Reinigungsmöglichkeit und Spülbarkeit auf. Außerdem ist es mechanisch sehr stabil und unempfindlich gegen Korrosion. Die Schlitzweite kann in sehr kleinen Abstufungen variiert und somit den örtlichen Bedingungen angepasst werden. Hydraulisch ist, nachdem die Horizontalbrunnen vollständig unterhalb des Grundwassers liegen, ein Gefälle der Stränge zur Entnahmestelle nicht erforderlich.



Abb. 7.1: Schacht einer Grundwasserkommunikationsanlage

Die GWK-Schächte bestehen aus Schlitzwandlamellen und wurden als außenliegende Vorsprünge an den Stationsrohbau angebaut. Sie haben eine lichte Weite von mindestens 4 m und sind innen rechteckig in Stahlbeton ausgeführt. Aus diesen Schächten heraus wurden die Horizontalbrunnen gebohrt (Abb. 7.1).

Zunächst waren bereichsweise kreisrunde Schächte mit überschnittenen Bohrfahlwänden geplant. Im Rahmen der Optimierung der GWK wurden diese Schächte nicht ausgeführt. Dabei ist zu beachten, dass die Ausführung der Dükerverlegung technisch aufwendig ist, da die Bohrarbeiten durch die Schächtwände in den anstehenden Baugrund geführt werden müssen und dabei gegen den Wasserdruck gebohrt werden müssen.

Die Düker wurden so angeordnet, dass sie gereinigt werden können. Über Revisionsöffnungen sind die Kontrolle und die Spülbarkeit der Horizontaldränagen auf Dauer gewährleistet. Bei nachlassender Leistung besteht die Möglichkeit, von den Schächten an vorbereiteten Positionen weitere Horizontaldränagen herzustellen.

7.3 GW-Kommunikation Südrampe und Bayerischer Bahnhof

Im Bereich des Bayerischen Bahnhofs und der Südrampe konnte entgegen ersten Planungen sowohl im Bauzustand als auch im Endzustand vollständig auf eine Grundwasserkommunikationsanlage verzichtet werden. Wegen der großen Abstände zur Bebauung wurde nachgewiesen, dass keine Gefahr von Vernässungen im Umfeld der Station Bayerischer Bahnhof und der Südrampe besteht.

Einen positiven Einfluss hatte zudem die Anhebung der Gradienten im Südbereich um ca. 2 m gegenüber der Ursprungsplanung. Damit konnte eine Unterströmung der Südrampe ohne unzulässigen Aufstau im Endzustand sichergestellt werden. Zudem kam im Bereich der Südrampe ein Sondervorschlag zur Ausführung, der statt der ausgeschriebenen Schlitzwände mit rückverankerten Unterwasserbetonsohlen als temporären Baugrubenverbau bis zu 30 m Länge, im Hochfrequenzrüttelverfahren einvibrierte Spundbohlen vorsah, die nach der Herstellung der Südrampe zu über 90 % wieder gezogen wurden. Somit verblieben außer dem endgültigen Bauwerk keine Baubehelfe im Boden, die absperrende Strömungshindernisse darstellen. Die Herstellung der Baubehelfe erfolgte abschnittsweise, so dass auch im Bauzustand die Grundwasserkommunikation gewährleistet war.

Auch im Bereich der Station Bayerischer Bahnhof ist eine Unterströmung möglich, da die als Baugrubenverbau eingebrachten Schlitzwände nicht bis in den Grundwasserstauer reichen und somit geohydraulisch verträglich sind. Im Südbereich konnte somit durch detaillierte Untersuchungen und durch flankierende bauliche Maßnahmen auf eine Grundwasserkommunikationsanlage verzichtet werden.

7.4 GW- Kommunikationsanlage Haltepunkt Wilhelm- Leuschner- Platz

Am Haltepunkt Wilhelm- Leuschner- Platz binden die die Station umfassenden Schlitzwände in den Grundwasserstauer ein und stellen auf einer Länge von ca. 180 m ein Strömungshindernis dar. Auf eine bauzeitliche GWK-Anlage konnte dennoch verzichtet werden, da im Umgebungsreich der Station keine Vernässungsgefahr von Gebäuden bestand.

In Summe wurden mit Stand 12/2006 ca. 0,6 m Aufstau und Absenk festgestellt. Die Berechnungen zum Grundwasseraufstau hatten in etwa 0,3 m Aufstau prognostiziert. Geht man von gleichen Anteilen Aufstau und Absenk zu beiden Seiten des Bauwerkes aus, stimmen die Prognosewerte sehr gut mit den realen Ereignissen überein.

Für den Endzustand wurden am Wilhelm-Leuschner-Platz sowohl auf der Anstrom- als auch auf der Abstromseite je 2 vertikale Schächte mit Rechteckquerschnitt und Innenabmessungen von 4,65 m x 4,30 m und Tiefen von ca. 27 m hergestellt. Die jeweils gegenüberliegenden Schächte auf der Anstrom- und Abstromseite sind mit einem unter der Stationssohle liegenden Dükerrohr DN 300 verbunden.

Aus den Schächten heraus wurden sowohl auf der Anstrom- als auch auf der Abstromseite im Bereich der Bitterfelder Sande je 2 Bohrungen DN 140 mm ausgeführt. Die Längen auf der Anstromseite betragen bis zu 47 m, auf der Abstromseite ca. 22 m. Je Schacht ist Platz für Ersatzbohrungen vorgesehen. Die überzuleitende Gesamtwassermenge beträgt ca. 0,2 m³/h und ist damit vergleichsweise gering.

Es wurden gesteuerte Verdrängungsbohrungen nach dem Pilotbohrverfahren ausgeführt. Dabei wird das Pilotrohr gesteuert durch einen Theodoliten mit CCD- Kamera bis zum Zielpunkt durch den Boden gepresst. Richtung und Neigung werden dabei permanent überwacht. Nach Erreichen des Zielpunktes wird der Innenpilot zur Bohranlage hin zurückgezogen. Die Steuerspitze, die mit dem Außenpilotrohr verbunden ist, verbleibt im Boden. Es wurden dann die Edelstahlfilterrohre DN 100 (Außendurchmesser 114 mm) eingeschoben und die Verrohrung gezogen. Mit Rücksicht auf die feinkörnigen Partien des Bitterfelder Sandkomplexes wurde die Schlitzweite der Edelstahlwickeldrahtfilter mit 0,3 mm sehr klein gewählt.

7.5 GW-Kommunikationsanlage Haltepunkt Markt

Die umfassenden Schlitzwände der Station Markt binden wie die beim Haltepunkt Wilhelm-Leuschner- Platz in den Grundwasserstauer ein und bilden ein durchgehendes Strömungshindernis auf ca. 160 m Länge. Hinzu kommt die strömungshemmende Wirkung der sich anschließenden Tunnelröhren, die aber für sich betrachtet durch die geringe Querschnittsfläche und die Lage im Verhältnis zu den Grundwasserleitern keinen unzulässigen Aufstau erwarten ließen.

Für den HP Markt haben sich die prognostizierten Aufstauerscheinungen der Modellrechnung bisher ebenfalls sehr gut bestätigt. Seit Juli 2006 ist die Baugrube vollständig geschlossen. Am Südkopf sind geringe Aufstaubeträge in etwa der zulässigen Höhe von 0,1 m nachgewiesen worden. So konnte auch hier für den Bauzustand wegen auszuschließender Vernässungsgefahr im Umfeld der Station auf eine temporäre GWK-Anlage verzichtet werden.

Für die permanente GWK-Anlage wurde wegen beengter geometrischer Verhältnisse nur jeweils ein Vertikalschacht auf der An- und Abstromseite angeordnet. Die Schächte wurden im nördlichen

Bereich der Station hergestellt. Die gesamte überzuleitende Wassermenge wurde mit ca. 2,9 m³/h ermittelt.

Zur Fassung des aus südöstlicher Richtung anströmenden Grundwassers ist ein quasi stationsparalleler Horizontalbrunnen mit einer Länge von 97,5 m mit Ausbau in den Bitterfelder Sanden und einer Schlitzweite des Edelstahlwickeldrahtfilters DN 100 mm von 0,3 mm vorgesehen. Bohrlängen von 100 m Länge mit Ausbau als Horizontalbrunnen stellen die obere Grenze für dieses Verfahren dar. Die wesentlich kürzeren Pilotbohrungen (maximale Länge 25 m) in östliche und nordöstliche Richtung werden im Flussschotter mit Schlitzweiten von 0,4 mm ausgebaut. Auf der Versickerungsseite sind Horizontalbrunnen im Flussschotter mit Maximallängen von 42 m geplant.

7.6 GW-Kommunikation Hauptbahnhof und Nord- u. Westrampe

Mit Stand 1/2007 waren die Umfassungswände (Schlitzwände) und die Decke des HP Hauptbahnhof bis zur Vorderkante des Bahnhofsgebäudes hergestellt. Aus 3 Vertikalbrunnen wurden bauzeitig ca. 30 m³/h Grundwasser aus dem Anstrom entnommen und direkt in den Vorfluter eingeleitet. Damit wurde der zulässige Grundwasseraufstau auf den Betrag von 0,1 m begrenzt und eine zusätzliche Vernässung des bereits vorgeschädigten Bahnhofsgebäudes vermieden. Mit der Grundwassermodellierung war für diesen Bauabschnitt eine Überleitmenge von 35 m³/h prognostiziert worden.

Unabhängig von den vorgesehenen Maßnahmen für die permanente Grundwasserkommunikationsanlage im Bereich Hauptbahnhof – Willy-Brandt-Platz wurde wegen der bereits vorhandenen Vernässung des Hauptbahnhofes durch den Nutzer für den Mittelbau des Hauptbahnhofes eine Bauwerksdränage geplant. Diese in der Ursprungsplanung nicht berücksichtigte gegenseitige Beeinflussung beider Maßnahmen wurde im Rahmen neuer Berechnungsszenarien mit dem Grundwassermodell nachgebildet. Die Ergebnisse zeigten, dass bei Inbetriebnahme der geplanten Bauwerksdränage eine permanente Grundwasserkommunikation nicht mehr erforderlich ist, da der Gradient im Anstrombereich durch die Dränage deutlich abgesenkt wird. Bis zur Inbetriebnahme der Dränage wurde die Bauwasserhaltung zur Aufstauvermeidung weiter betrieben. Mittlerweile ist die Dränage am Hauptbahnhof in Betrieb und die gehobenen Grundwässer werden dauerhaft dem Vorfluter Parthe zugeführt.

Der mittlere Bereich der Station unter dem Quergebäude des Hauptbahnhofes ist bauzeitig durch in Längsrichtung der Station verlaufende Bodenvereisungswände abgeschottet. Bauzeitig wird durch die in Betrieb genommene Dränage am Hauptbahnhof ein Aufstau verhindert, im Endzustand ist nach dem Auftauen des Frostkörpers eine Unterströmung der Station gewährleistet. Im

Bereich der Nordrampe kamen veränderte Verbaulösungen zur Ausführung, die die dauerhafte Abriegelung des oberen Grundwasserleiters gegenüber der Ursprungsplanung erheblich vermindern.

Neben Baudocks mit temporären Spundwänden analog der Südrampe, kamen überschnittene Bohrpfähle zum Einsatz, die im Fußbereich alternierend eingekürzt sind und somit Strömungsfenster gewährleisten. Weiterhin gibt es Baugruben mit Schlitzwänden und Unterwasserbetonsohlen. Bauzeitig stellen die Verbauwände auf voller Länge der Nord- und Westrampe Strömungshindernisse dar. Es sind deshalb derzeit 12 temporäre Vertikalbrunnen in Betrieb, die zur Aufstauvermeidung insgesamt ca. 80 m³/h fördern und in die Parthe ableiten.

Im Endzustand, nach Ziehen der Spundbohlen, Einbau von Kiesfiltern als Flächenfilter und weiteren baulichen Maßnahmen können die permanenten Maßnahmen zur Grundwasserkommunikation deutlich reduziert werden. Derzeit wird an der Optimierung der Lösung gearbeitet. Die Auswertung der Ergebnisse des Grundwassermonitorings bietet die Möglichkeit, die GWK-Anlage den im Feld beobachteten Aufstauerscheinungen optimal anzupassen, ggf. ist es sogar möglich, gänzlich auf eine permanente GWK-Anlage im Bereich der Nord- und Westrampe zu verzichten. Dazu ist mit einem Monitoringprogramm nachzuweisen, dass keine negativen Auswirkungen auf Grundwasserstände außerhalb der Bahnanlage vorliegen.

7.7 Betrieb und Wartung der Grundwasserkommunikationsanlagen

GWK-Anlagen bedürfen einer kontinuierlichen Wartung (vgl. Kap. 4. und 5.). Zunächst ist daher die Durchführung einer quartalsweisen Inspektion im ersten Jahr, später halbjährlich (Analyseprogramm Sandfreiheit des Wassers, Dokumentation von Eintrittsverlusten in Peilrohren, Kamerabefahrung) erforderlich. Die Überwachung der Funktionsfähigkeit der permanenten Grundwasserkommunikation wird durch Pegel erfolgen.

Die Pegel sind bereits hergestellt und mit Datenloggern ausgerüstet. Täglich werden 4 Messwerte erfasst und ausgelesen. Die Funktionsfähigkeit der Anlage lässt sich aus dem zwischen An- und Abstrom ermittelten Grundwassergefälle nachweisen. Für den Haltepunkt Wilhelm-Leuschner-Platz ist in der Abbildung 7.1 die Auswertung der erfassten Daten für ein Pegelpaar dargestellt.

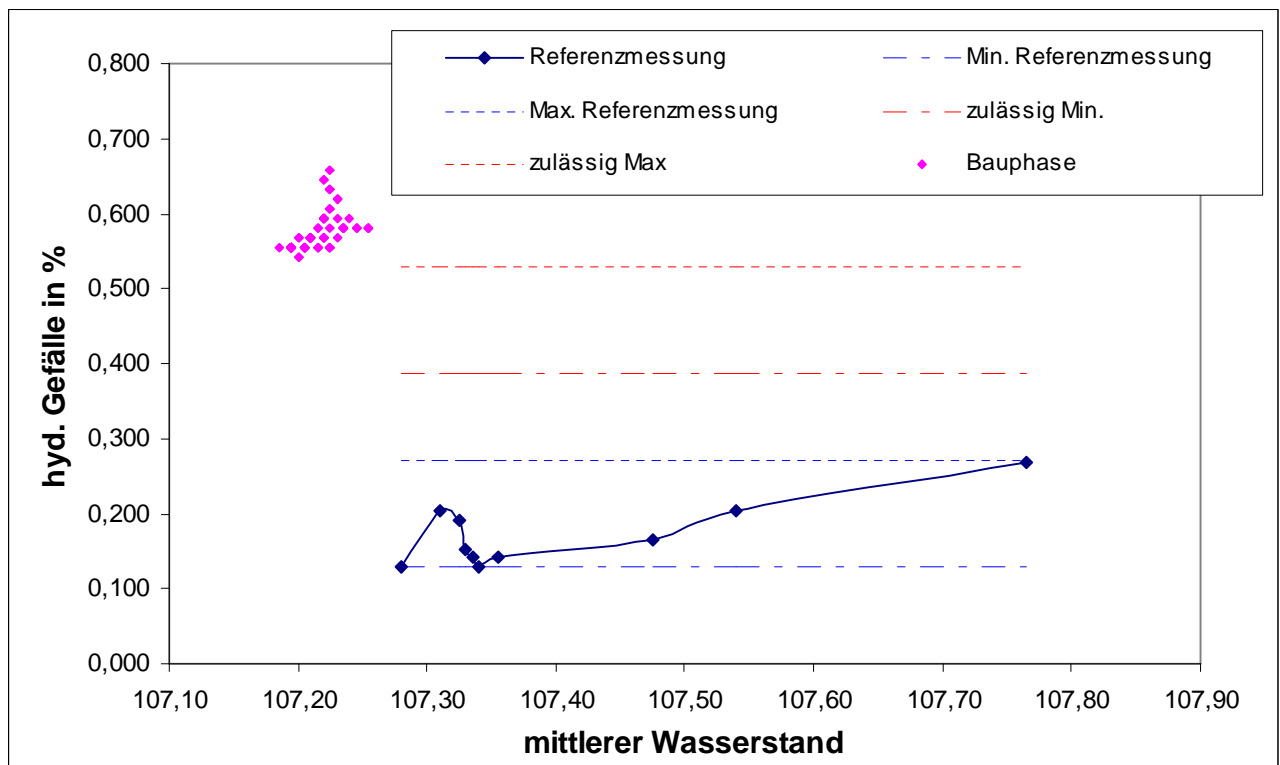


Abb. 7.2: Ergebnisse der Aufstaubewertung Stand 1/2007

Die fertig gestellten GWK-Schächte erhalten eine Schachtabdeckung mit Öffnungen, über die im Bedarfsfall ein Bohrgerät für die Neuerstellung von Horizontalbohrungen abgelassen werden kann. Über eine weitere Öffnung ist der Schacht für Personal für Wartungs- und Prüfzwecke zugänglich.

8. ZUSAMMENFASSUNG

Im Beitrag wurde zunächst die Aufstauproblematik eingeführt (Kapitel 1). Nachfolgend wurde ein Überblick über die rechnerische Ermittlung des Aufstaus / Sunks gegeben, der sich durch in das Grundwasser eintauchende Bauwerke ergibt (Kapitel 2). Nach der Einführung in verschiedene Varianten baulicher Anlagen zur Grundwasserkommunikation sowie deren Vor- und Nachteile (Kapitel 3) wurden die Bemessungsansätze für die Anlagen erläutert (Kapitel 4). Die entscheidenden Randbedingungen zur wirtschaftlichen Planung und Ausführung einer künstlichen Grundwasserkommunikationsanlage wurden im Anschluss dargestellt (Kapitel 5). Nach einer kurzen Einführung in das Projekt City Tunnel Leipzig (Kapitel 6) wurden als Planungs- und Ausführungsbeispiel die am City-Tunnel derzeit in Ausführung befindlichen Grundwasserkommunikationsanlagen vorgestellt (Kapitel 7 und 8).

Mit einem komplexen Grundwassermodell auf Grundlage detaillierter und verdichteter Erkundungen, das über die Bauzeit fortgeschrieben und an die örtlichen und aktuellen Erkenntnisse angepasst wurde, konnten die geohydraulischen Verhältnisse gut vorhergesagt und Planungssicherheit geschaffen werden, um Optimierungen bei der Wahl der GWK-Anlagen zu erzielen. Durch ein flächendeckendes Grundwassermonitoring und Grundwassermanagementsystem konnte auch noch während der Ausführung auf veränderte Verhältnisse und Beeinflussung durch andere Baumaßnahmen reagiert werden. Auf diese Weise ist es gelungen, die GWK-Anlagen optimal an die örtlichen Verhältnisse anzupassen und dauerhafte, wirtschaftliche und wartungsarme GWK-Anlagen sowohl im Bauzustand als auch im Endzustand zu planen, zu bauen und zu betreiben.

In Leipzig wurde, wenn nicht durch bauliche Optimierung gänzlich auf Grundwasserkommunikationsanlagen verzichtet werden konnte, die Entscheidung für ein System aus Horizontalbrunnen getroffen. Die permanente Grundwasserkommunikation für den Endzustand besteht aus vertikalen Sammelschächten, Horizontalbrunnen und Rohrleitungen, über die das Grundwasser auf der Anstromseite gefasst, unter dem Bauwerk hindurch geleitet und auf der Abstromseite wieder in das Grundwasser eingespeist wird. Die Strömung in der Kommunikationsanlage beruht in diesem Fall allein auf der natürlichen Druckdifferenz zwischen Anstrom- und Abstromseite.

9. LITERATURVERZEICHNIS

Grundwasserkommunikation und Tunnelbau

- Grundbultaschenbuch, 5. Aufl., Teil 3, S. 530.
- GEBHARDT, P. (1988): Maßnahmen zur Erhaltung der Grundwasserströmung bei Tunnelbauwerken in offener Bauweise; Teil 3: Erfahrungen bei der Grundwasserkommunikation beim Münchener U-Bahn-Bau. – In: Taschenbuch für den Tunnelbau 1988.
- PROCHER, M. (1985): Die Grundwasserdüker- und Überleitungsanlagen der U-Bahn-Linie U 8/1 mit einer Beurteilung ihrer hydraulischen Wirksamkeit und rechnerischer Bemessung; Diss. TU München.
- ULRICHS, K. R. (1984): Teil 1: Allgemeine Grundlagen der Grundwasserkommunikation. Maßnahmen zur Erhaltung der Grundwasserströmung bei Tunnelbauwerken in offener Bauweise. – In: Taschenbuch für den Tunnelbau 1984, Essen.
- ULRICHS, K. R. (1987): Teil 2: Erfahrungen bei der Grundwasserkommunikation der Stadtbahn in Duisburg. – In: Taschenbuch für den Tunnelbau 1987, Essen.
- ULRICHS; K. R. (1987): Tunnelbau: Tunnelbauten in offener Baugrube, WIX + LIESENHOFF, Dortmund; Beton- und Monierbau, Innsbruck.

Grundwasserhydraulik und sonstige wissenschaftliche Grundlagen

- BUSCH, K.-F., LUCKNER, L., TIEME, K. (1993): Geohydraulik, Berlin.
- DVGW Merkblatt W130: Online Regenerierung von Brunnen.
- DVGW-Regelwerk, Merkblatt W 132: Algen-Massenentwicklung in Langsandsandfiltern und Anlagen zur künstlichen Grundwasseranreicherung – Möglichkeiten zu ihrer Vermeidung, Ausgabe Dezember 1980.
- DVGW-Regelwerk, Arbeitsblatt W 270: Vermehrung von Mikroorganismen auf Materialien für den Trinkwasserbereich – Prüfung und Bewertung – Ausgabe Dezember 1990.
- DVGW-Regelwerk, Technische Mitteilung, Hinweis W 271: Tierische Organismen in Wasserversorgungsanlagen.
- EGLI, D. (1998): Auswirkungen des Bauwerks auf das Grundwasser und Überwachungsmaßnahmen. – Mitteilungen Schweizerische Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik, 137, 29 – 30.
- GIMSCHIED, G., GAMISCH, T., MEINLSCHMIDT, A. (2003): Versinterung von Tunneldrainagen – Empfehlungen für die Planung und Bauausführung von Tunneln in deszendente Wasser, Bauingenieur 78/2003.
- GIMSCHIED, G., GAMISCH, T., MEINLSCHMIDT, A. (2003): Versinterung von Tunneldrainagen – Empfehlungen für die Instandhaltung von Tunneln, Bauingenieur 78/2003.
- HERTH, W. & ARNDTS, E.: Theorie und Praxis der Grundwasserabsenkung - Berlin, 1994.
- LANGGUTH, H.R., VOIGT, R.: Hydrogeologische Methoden - Berlin, 2004.
- LOUDA, K. (1961): Wasserwirtschaft, Wassertechnik: Beitrag zur Berechnung von Horizontalfilterbrunnen, 11. Jahrgang, Heft 3.
- NEMECEK, E. P. (1961): Wasserwirtschaft, Wassertechnik: Horizontalfilterbrunnen zur Grundwassergewinnung, 11. Jahrgang, Heft 3.
- SCHNEIDER, H. (1988): Die Wassererschließung. – Essen
- SCHNEIDER, G. (1981): Berechnung der Beeinflussung des Grundwassersstroms durch Baumaßnahmen, Die Bautechnik Heft 2.
- SCHNEIDER, G. (1982): Möglichkeiten zur Berechnung der Grundwasserspiegelbeeinflussung durch ein sehr langes Bauwerk mit abschnittswisen Durchbrüchen, Die Bautechnik Heft 10.
- SCHNEIDER, G. (1995): Beeinflussung des Grundwassersstroms durch Bauwerke mit räumlicher Erstreckung, Die Bautechnik Heft 5.
- Stadtbahn Duisburg, Fahren auf neuen Wegen: „Ökologie und Stadtbahnbau; Grundwasserausgleich durch Horizontalfilterbrunnen.“

- UHLMANN, D. (1988): Hydrobiologie, Ein Grundriss für Ingenieure und Naturwissenschaftler. – Stuttgart.
- WENDEHORST (1996): Bautechnische Zahlentafeln, 27. Auflage, Stuttgart

City Tunnel Leipzig

- Ingenieurgemeinschaft CDM Consult / Dr. Spang (1998): City-Tunnel Leipzig – Geotechnisches Gutachten zur Planfeststellung.
- Ingenieurgemeinschaft CDM Consult / Dr. Spang (1999): City-Tunnel Leipzig - Vertiefende Erkundungen und Untersuchungen der Trasse des geplanten City-Tunnels im Zuge des Baugrubenaushubs der Juridicum-Passage Leipzig.
- Ingenieurgemeinschaft CDM Consult / Dr. Spang (2001): City-Tunnel Leipzig - Geotechnischer Bericht nach DIN 4020 (2001):City-Tunnel Leipzig, Haltepunkt Markt .
- Ingenieurgemeinschaft CDM Consult / Dr. Spang (2001): City-Tunnel Leipzig - Hydrogeologisches Gutachten.
- Ingenieurgemeinschaft CDM Consult / Dr. Spang (2003): City-Tunnel Leipzig – Bauvorhaben Marktgalerie Leipzig. Vertiefende Erkundungen und Untersuchungen im Zuge der Baugrubenherstellung und des Baugrubenaushubs.
- SCHEFFLER, H. und SPANG, R.M. (2004): Geotechnische Verhältnisse im Zentrum von Leipzig und deren Bedeutung für Planung und Ausführung des Bauvorhabens City-Tunnel Leipzig. Vorträge der Baugrundtagung in Leipzig. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. Verlag Glückauf GmbH.
- SPANG, C., Glitsch, W., Renker, G., Franke, T., Romunde, B. (2007): Planung und Bemessung einer komplexen Grundwasser-Kommunikations-Anlage für den City-Tunnel Leipzig, Christian Veder Kolloquium, TU Graz, 12.-13.04.2007.
- GLITSCH, W. (2006): „Das Projekt City-Tunnel Leipzig“, 71. DVW-Seminar Weimar 2006, Tagungsband S. 33-47.