



IAG

**Institut für Angewandte
Geowissenschaften**

Bau und Bemessung von Brunnen für geothermische Anlagen

Prof. Dr. Ingo Sass
Fachgebiet Ingenieurgeologie
und Geothermisches Labor
Institut für Angewandte Geowissenschaften
TU Darmstadt

Der „Stand der Technik“

VDI 4640 Blatt 4, S. 10:

"Je 1 kW thermische Leistung ist eine Förderleistung von etwa 0,3 m³/h erforderlich."

Gilt für Kühlzwecke...

„Googeln“ hilft leider auch nicht weiter...

Grundregeln des Brunnenbaus

- Die tiefste Absenkung ist niemals tiefer als die Oberkante der Filterstrecke
- Die Pumpe hängt nie im Bereich der Filterstrecke
- Die Entnahme/Infiltration erfolgt nie turbulent
- Hydraulisch nicht genutzte Schichten sind technisch ab zu dichten
- Ein Brunnen ist immer zu entwickeln (Ausnahmen nur bei Altlasten, Kontaminationen und Dränagen)

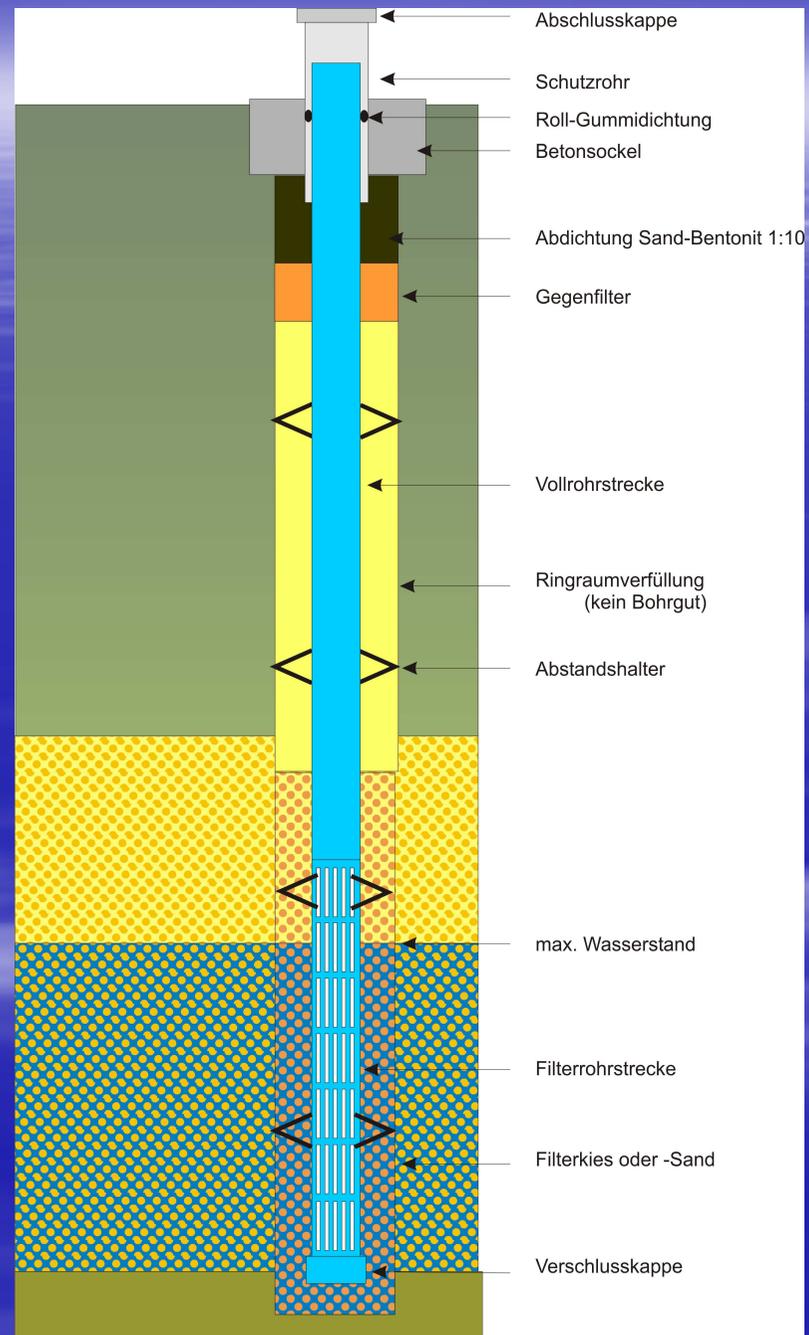
Der Bau von Bohrbrunnen

Bohrverfahren

Ausschreibung

Baubegleitung

Abnahme



Brunnenfilter

- **Stahl**
- **(beschichtet / unbeschichtet)**
- **Normalstahl, Edelstahl und Sonderstahl**
- **gelocht, geschlitzt, Schlitzbrücke, Wickeldraht, gesintert**
- **Komposite**

- **Kunststoff**
- **PE-HD, PE-LD, PVC-U, PP, PTFE und Exoten**
- **Gelocht, geschlitzt, porös**

- **Sonstige Werkstoffe**
- **Steinzeug**
- **Holz u.a.**

Die Anströmung eines Brunnens ist abhängig von:

- k_f -Wert der Schicht/en
- Gespannten/ungespannten Verhältnissen oder Mischformen
- Vollkommener/unvollkommener Brunnen
- Hydraulischer Gradient
- Einbauort der Pumpe

- Bestimmung der Verhältnisse am bestehenden Brunnenbauwerk:
 - - Flowmetermessung

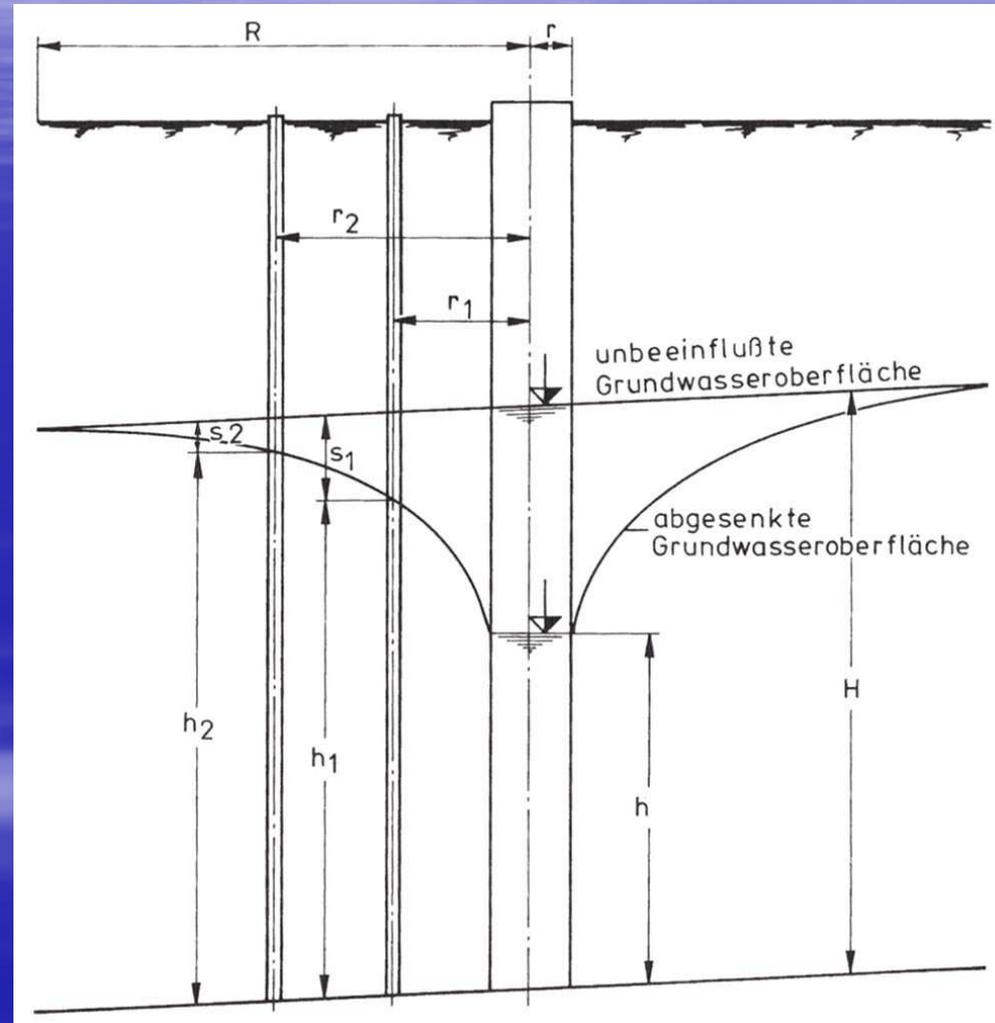
Grundgleichung des Brunnenbaues

$$Q = A \cdot v \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Wasserandrang im ungespannten Grundwasserleiter

$$Q_A = \frac{\pi \cdot k_f \cdot (H^2 - h^2)}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}$$

R nach Sichardt?



Abschätzung der Reichweite R nach Sichardt

Äußerster Einflussbereich von Absenkungen des Grundwassers

Überschlägig nach Sichardt(1928) und Kusakin (1977)

$$R = 3000 \cdot s \cdot \sqrt{k_f}$$

$$R = 575 \cdot s \cdot \sqrt{H \cdot k_f}$$

Diese Beziehungen unterstellen, dass der Zufluss zum Brunnen nur vom Rand des Absenkungstrichters her erfolgt und sie sind empirisch entwickelt, d.h. nur auf eng definierte Grundwasserleiterbedingungen übertragbar

Bestimmung der Reichweite R

Nach Weber (1928) und nach Körner (1957)
Weber: nur Entnahme von Wasser aus dem Vorrat
Körner: vereinfachende „Einbrunnenmethode“

$$R = c \cdot \sqrt{\frac{H \cdot k_f \cdot t}{n_{\text{eff}}}}$$

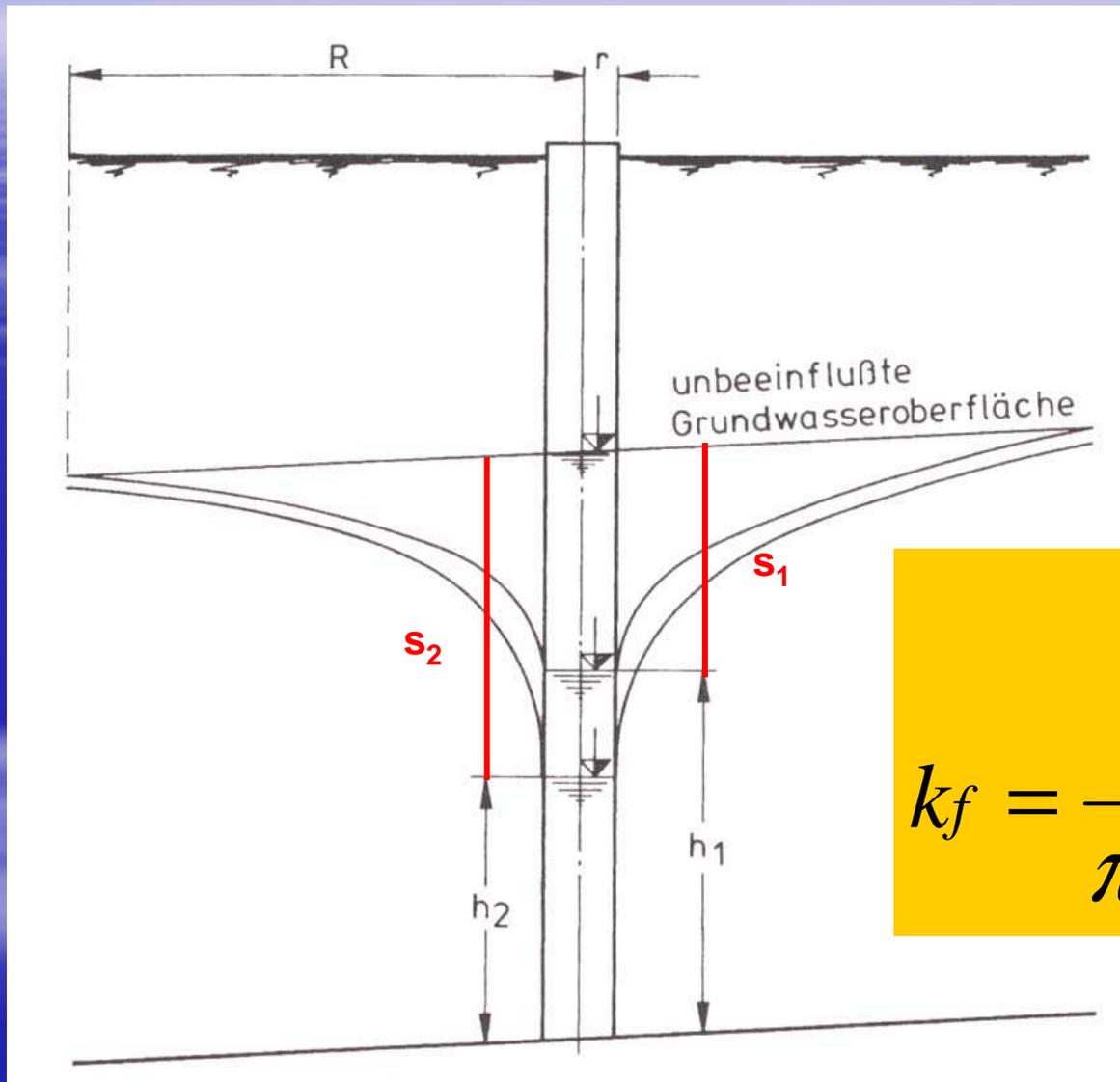
Mit: $c = 2,82 - 3,46$ ($c \approx 3$)
 $t =$ Zeit seit Pumpbeginn
 $n_{\text{eff}} =$ durchflusswirksames
Porenvolumen

$$k_f = \frac{Q}{S \cdot C_B}$$

Mit: $C_B =$ Bereichsfaktor [m]
 $r =$ Brunnenradius

$$C_B = \frac{4}{\frac{1}{r} - \frac{1}{R}}$$

Einfluss der Entnahme auf die Absenkung



$$k_f = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\pi \cdot (h_2^2 - h_1^2)}$$

Auswertung der Brunnenabsenkung

- ungespannt
- keine GWM vorhanden oder brauchbar

$$k_f = \frac{(Q_2 - Q_1) \cdot \ln\left(\frac{R}{r_{Br}}\right)}{\pi \cdot (h^2_2 - h^2_1)}$$

Abschätzung bei nur einer Entnahmemenge und ohne GWM im ungespannten GWL

$$k_f \cong \frac{Q}{h \cdot s}$$

mit

$$\bar{h} = h + \frac{s}{2}$$

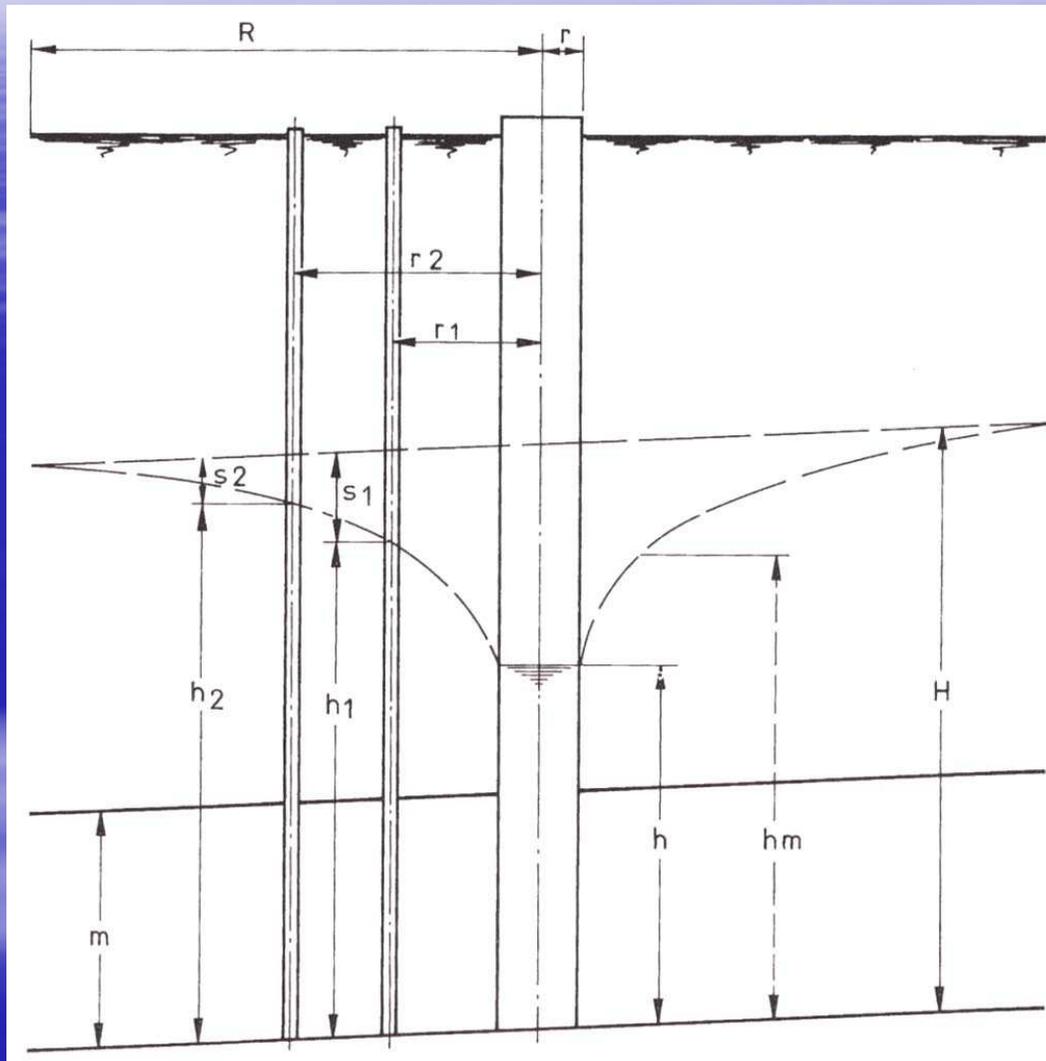
Nur schätzometrisch:

- Unterstellt Linearität der Absenkung!
- Vernachlässigt Quantifizierung der Brunneneintrittseffekte
- Unterstellt, dass die Absenkung um $s/2$ korrigiert werden muss.

Abschätzung bei konstanter Entnahmemenge und ohne GWM im gespannten GWL

$$k_f \cong \frac{Q}{m \cdot s}$$

Wasserandrang im gespannten Grundwasserleiter



$$Q_A = \frac{2\pi \cdot k_f \cdot m \cdot (H - h)}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}$$

$$k_f = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi \cdot m \cdot (h_2 - h_1)}$$

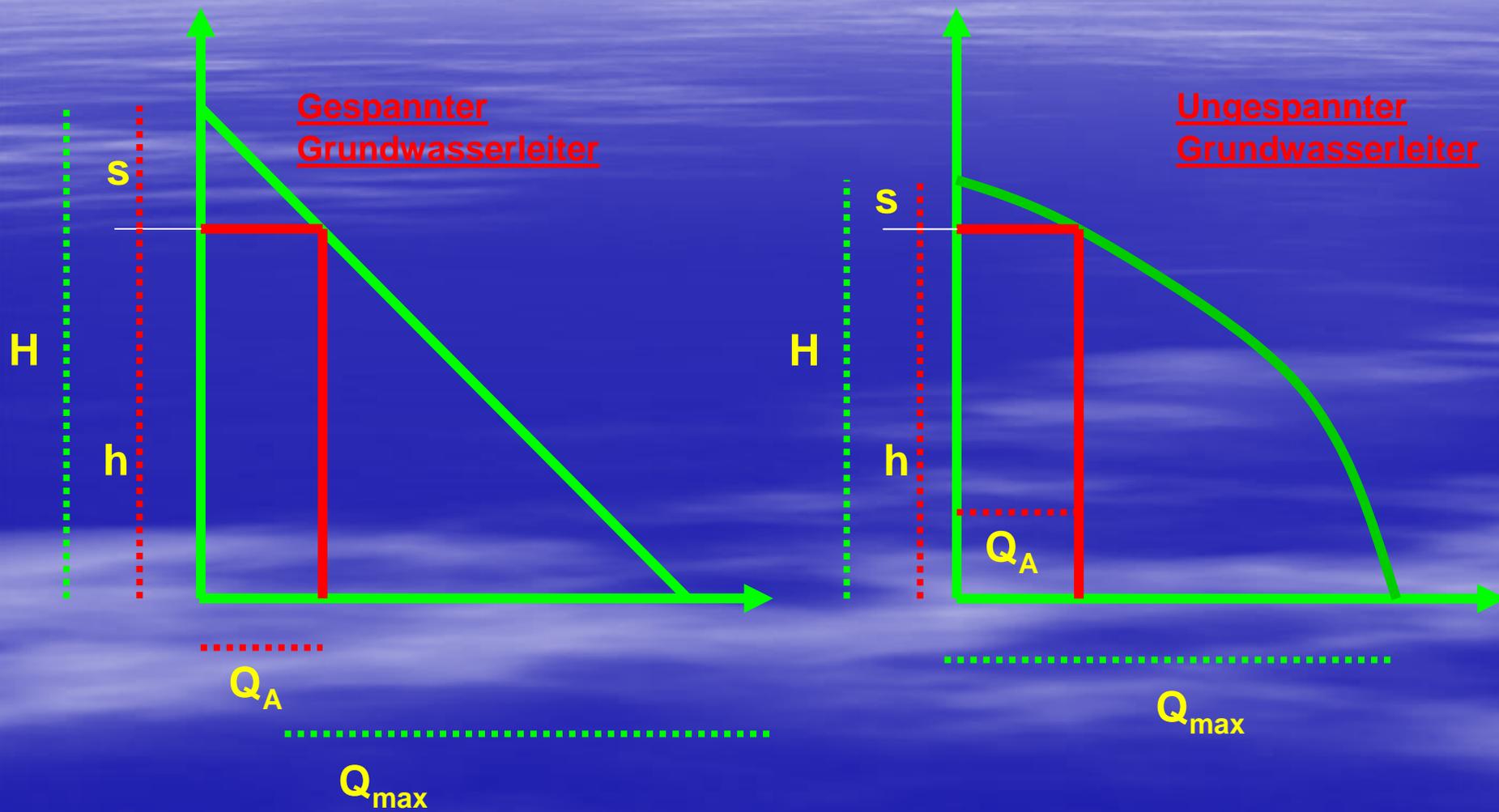
Auswertung der Brunnenabsekung

gespannt

(keine GWM vorhanden oder unbrauchbar)

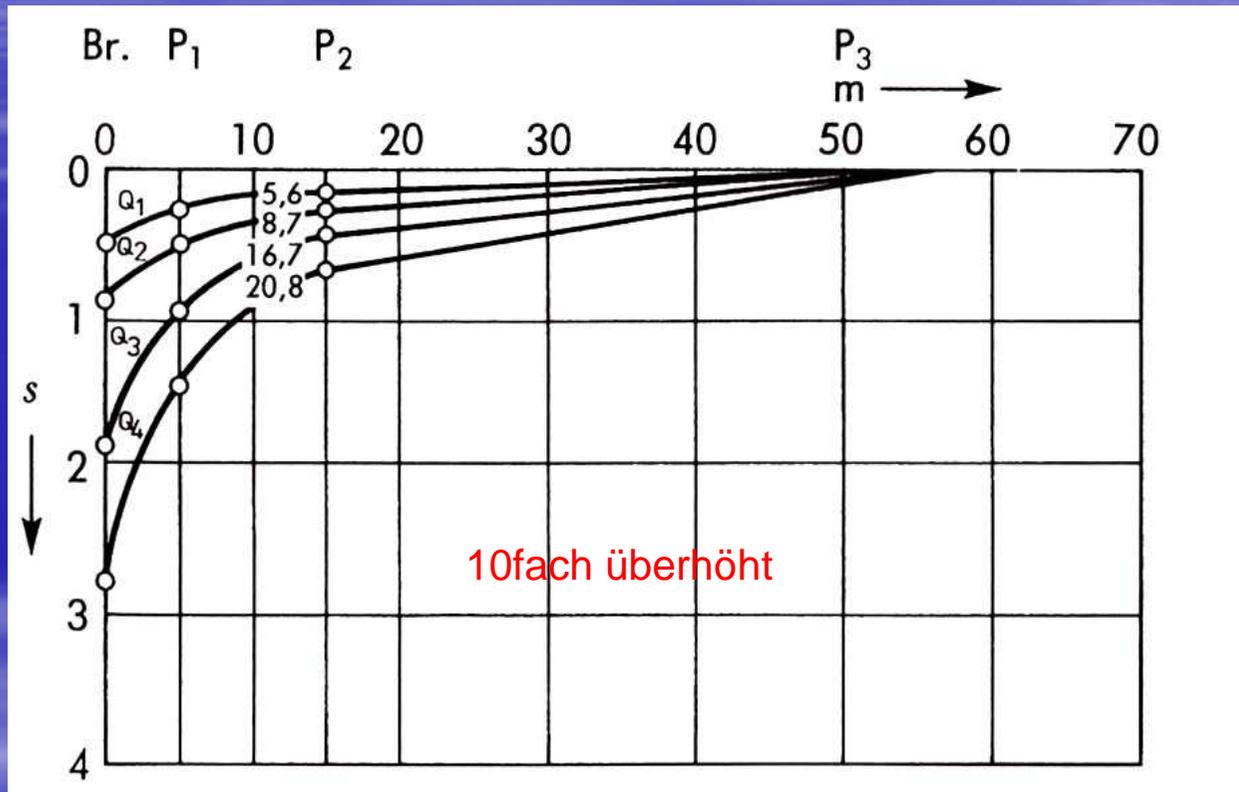
$$k_f = \frac{(Q_2 - Q_1) \cdot \ln\left(\frac{R}{r_{Br}}\right)}{2\pi \cdot m \cdot (h_2 - h_1)}$$

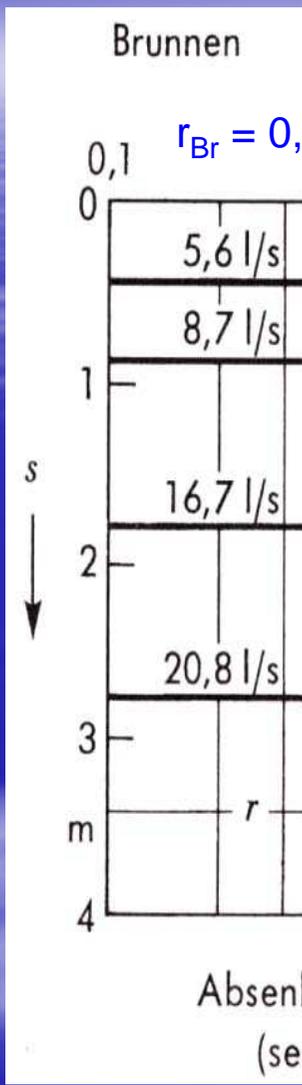
Wasserandrang



2D-Absenktrichter-Halbprofil

Freier (ungespannter) GWL





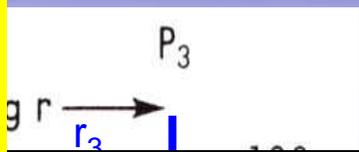
$$s_1 - s_2 = \frac{2,3 \cdot Q}{\pi \cdot T} \cdot \lg(r_2 - r_1)$$

$$a = \frac{0,733 \cdot Q}{k_f}$$

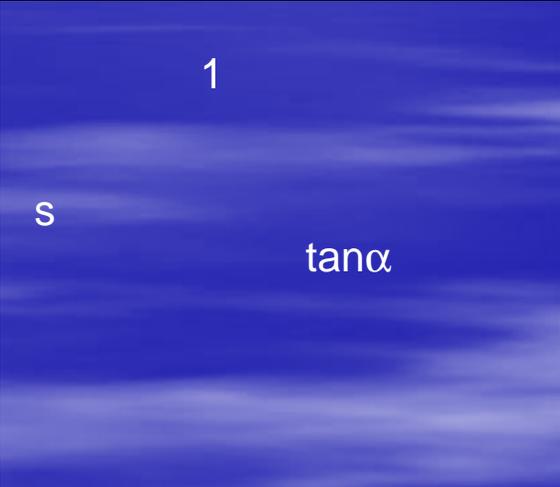
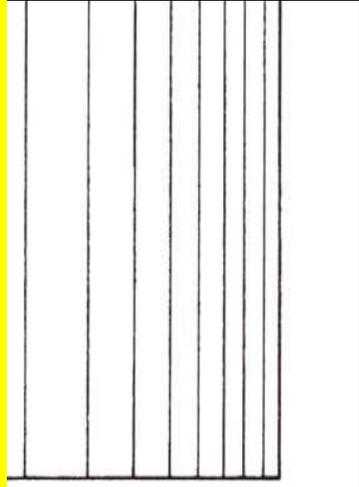
$$k_f = \frac{0,733 \cdot Q}{a}$$

$$s_{12} = \frac{2,3 \cdot Q}{\pi \cdot k_f} \cdot \lg r_{21} \quad [l/s]$$

$$k_f = \frac{\lg r_{21}}{s_{12}} \cdot \frac{Q}{\pi} \cdot 2,3 \cdot 10^{-3} \quad [m/s]$$



$\lg 10 = 1 \rightarrow$
 Die horizontale Entfernung ist 1.
 Die Steigung a der halblog. Geraden ist durch $\tan \alpha$ gegeben



verändert n. Bieske 1989

Bei ungespanntem GW
 Kann m durch H ersetzt
 werden

Jacob's Transmissivitätskonzept für ungespannte Grundwasservorkommen

Dem in der Anwendung gezeigte Geradenverfahren von Cooper [1946] liegt der **Fundamentalgleichung der Grundwasseranhebung** „Brunnenformel“ von Theis [1935] zugrunde. Jacob [1946] setzte für die Bedingungen, dass die GWM „nicht zu weit“

Vom Versuchsbrunnen entfernt sind und wenn mit „geringer Absenkung“ gefahren wird, als die Näherungsformel für ungespannte kommen ab.

$$s = \frac{Q}{4\pi \cdot T} \cdot \ln \frac{2,25T \cdot t}{r^2 \cdot S} = \frac{2,3Q}{4\pi \cdot T} \cdot \lg \frac{2,25T \cdot t}{r^2 \cdot S}$$

Natürlicher Log

Dekadischer Log

S, der Speicherkoeffizient ist hier für den Brunneneinzugsbereich eine konstante Gesteinseigenschaft. Wenn Q ebenfalls konstant ist, dann sind nur noch die Zeit [lg t] und die Absenkung [s] variabel!

Fassungsvermögen und Wasserandrang in stationären Strömungsverhältnissen

Ungespannter Grundwasserleiter
n. Sichardt (1928)

$$Q_F = 2r_{Br} \cdot \pi \cdot h_{Br} \cdot v_{\max}$$

Gespannter Grundwasserleiter
n. Sichardt (1928)

$$Q_F = 2r_{Br} \cdot \pi \cdot m \cdot v_{\max}$$

Ungespannter Grundwasserleiter
n. Dupuit (1863)

$$Q_A = \pi \cdot k_f \frac{H^2 - h_{Br}^2}{\ln\left(\frac{R}{r_w}\right)}$$

Gespannter Grundwasserleiter
n. Dupuit (1863)

$$Q_A = 2\pi \cdot k_f \cdot m \frac{H - h_{Br}}{\ln\left(\frac{R}{r_w}\right)}$$

$$Q = 2\pi rH \frac{\sqrt{kf}}{15}$$

Optimale Brunnendimensionierung

Brunnenhauptabmessung	Eingangsgrößen	Berechnung/Bestimmung
Bohrteufe	Geotechnik und Hydrogeologie	Aufschlussbohrungen
Filterkiesschüttung	Kennkorn des Erschlusshorizontes	Siebanalysen, Best. v. d_k bei 75-80% Siebdurchgang oder Bieske-Kurve
Filterschlitzweite	d_k	$d_s = (d_k \times 4,5)/2$
Offene Filterfläche und Filtermaterial	$A_f = Q/v$	Herstellerangaben für die verschiedenen Materialien, $v \approx 0,03$ m/s bzw. $v = 0,5 (\sqrt{k_f} / 15)$
Filterlänge	Bohrergebnisse A_f / d_s	Aufschlussbohrungen, Herstellertabellen, $L_f = A_f / m$
Brunnenrohrdurchmesser	Einbaudurchmesser Pumpe als Funktion von Q (m^3/h)	$D_{BR} = D_P + 0,1$ (m), Q aus PV im Testbrunnen
Bohrdurchmesser	D_{Rr}	$D_R = D_{Rr} + D_{BR}$ (n. DIN 4924)
Festigkeit Brunnenrohr	Druckdifferenzen, Einbauteufe	Statische Berechnung, P_{krit} -Verfahren, Herstellerangaben
Fassungsvermögen	k_f , H aus Aufschlußbohrung bzw. Testbrunnen, D_B , v_{krit}	k_f : div. Verfahren; Q_F n. Huismann 1972 $Q_F = P_i \times D_B \times H \times v_{krit}$
Wasserandrang	k_f , H , R , $s_{f(Q)}$	R : Schätzung n. Sichardt 1928 Q_a n. Dupuit-Thiem 1863 bzw. 1870
Optimale Brunnenleistung	Q_F bzw. Q_a	Kurvenbetrachtung für verschiedene s und h (Schnittpunktverfahren)

Radiale Brunnenanströmung

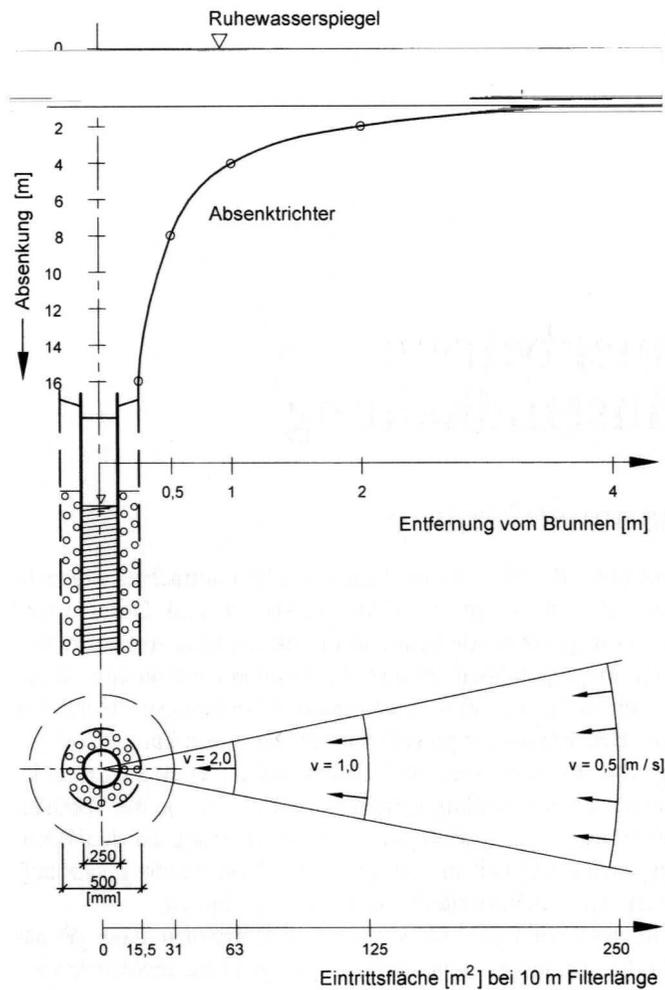


Bild 2.1:
 Schnitt durch
 den Absenkungs-
 trichter und An-
 strömsektor eines
 Vertikalfilter-
 brunnsens im
 ungespannten
 Grundwasser.
 Nach Tholen
 (1997).

Abkürzung :

v : Fließgeschwindigkeit [m / s]

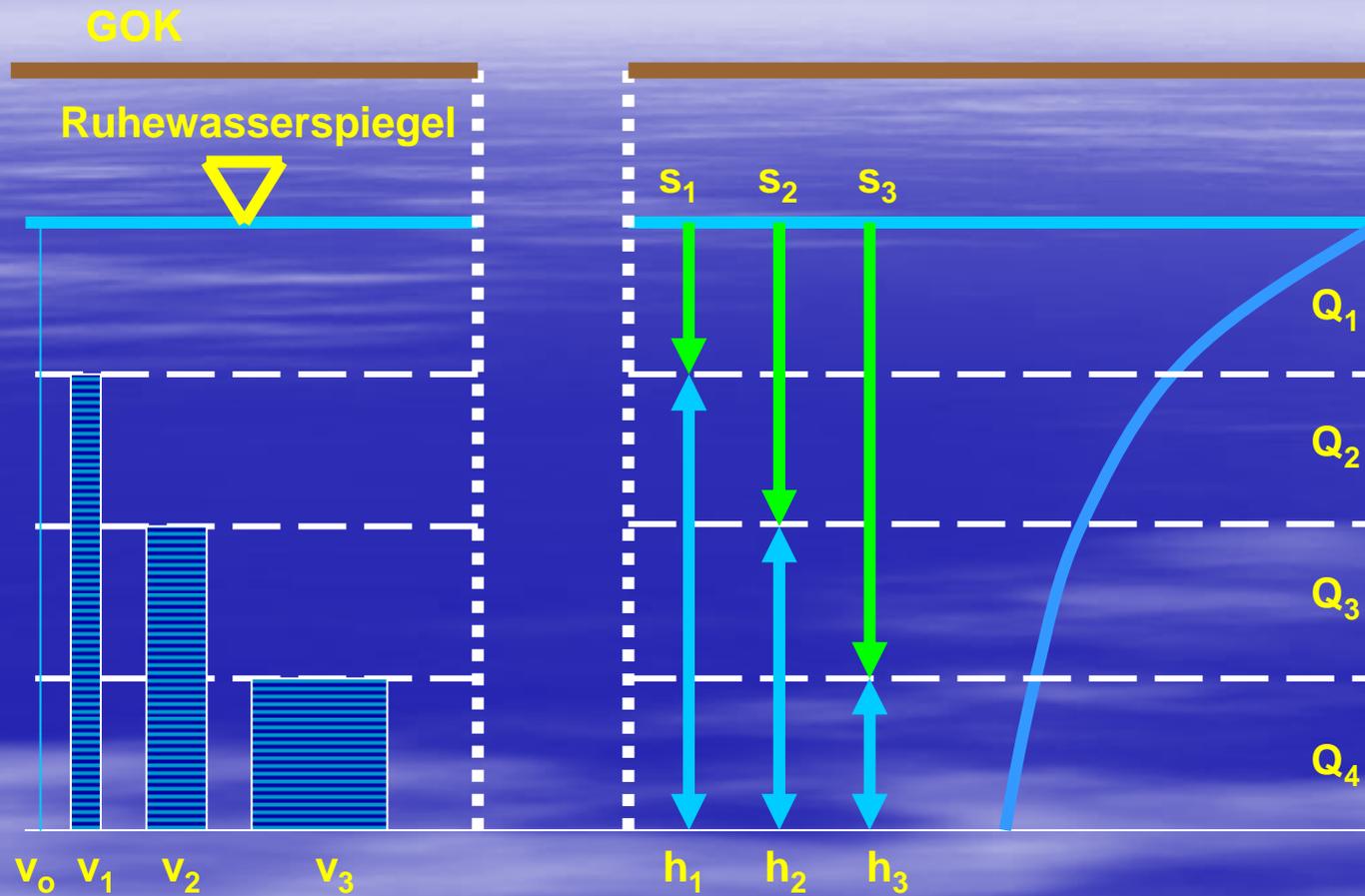
mit

T: Transmissivität [m²/s] = $k_f \cdot m$

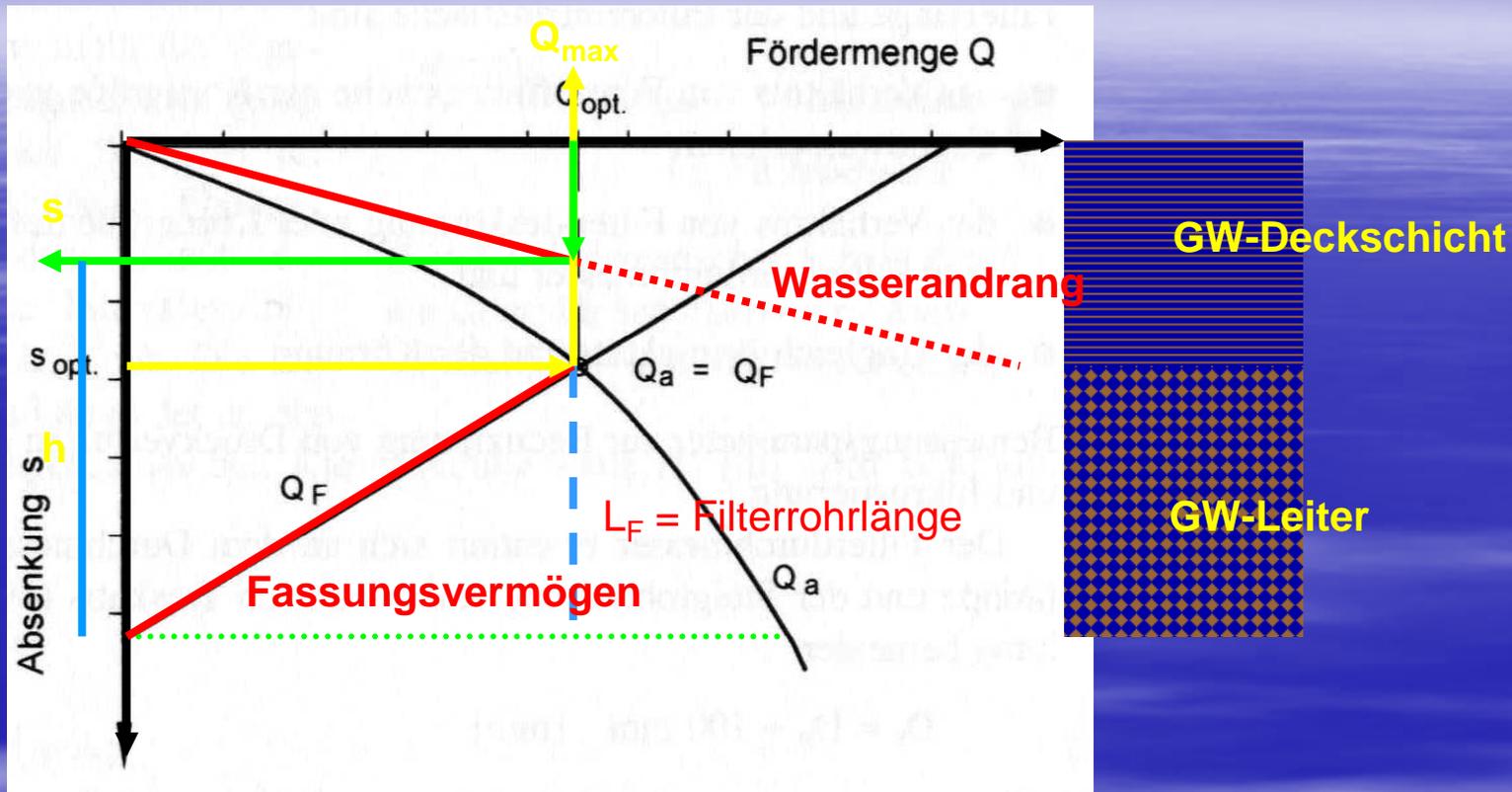
r_1, r_2 : Radiale Abstände vom Brunnen mit $r_2 > r_1$

h_1, h_2 : Standrohrspiegelhöhen im Abstand r_1 und r_2 .

Treskatis 2002



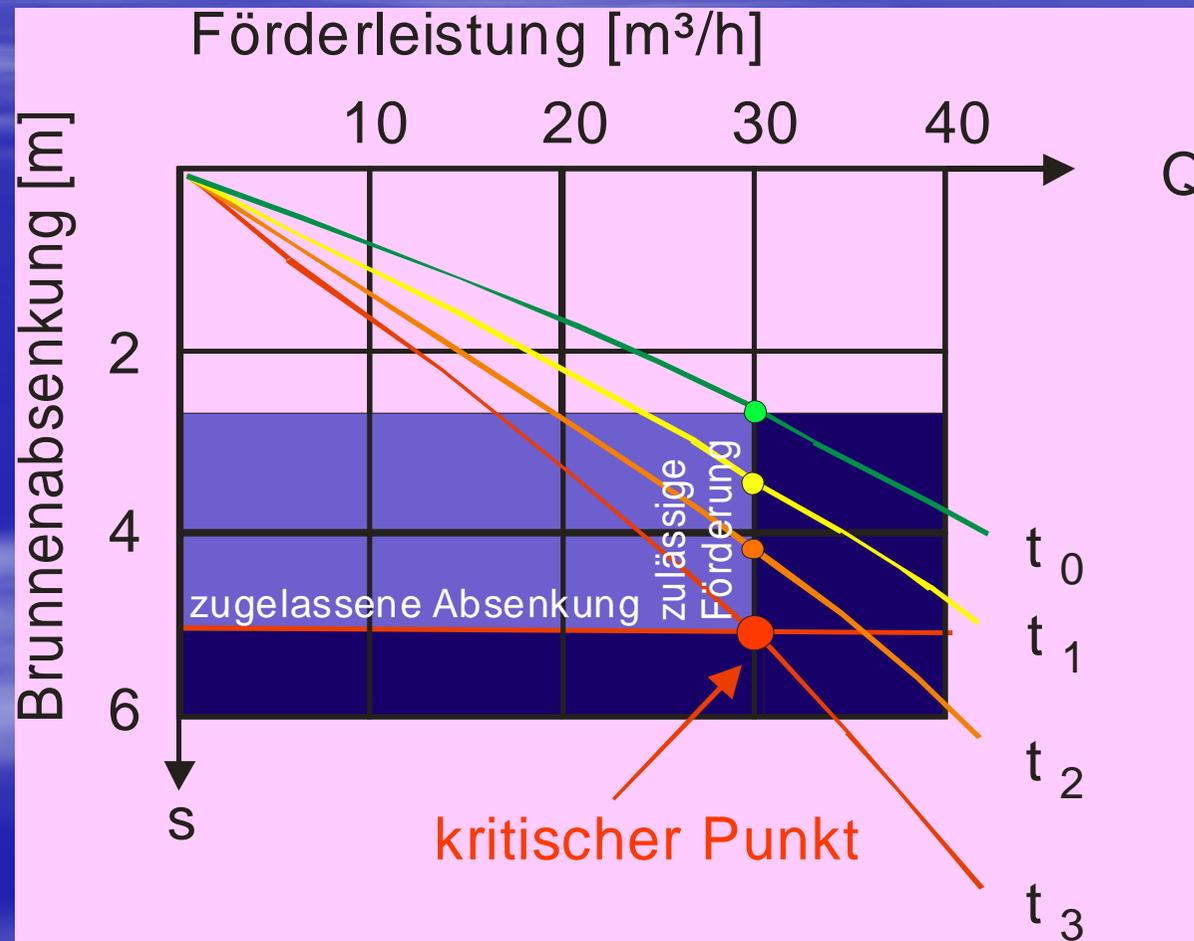
Annahme: der Grundwasserleiter ist doch gespannt! Schnittpunktverfahren



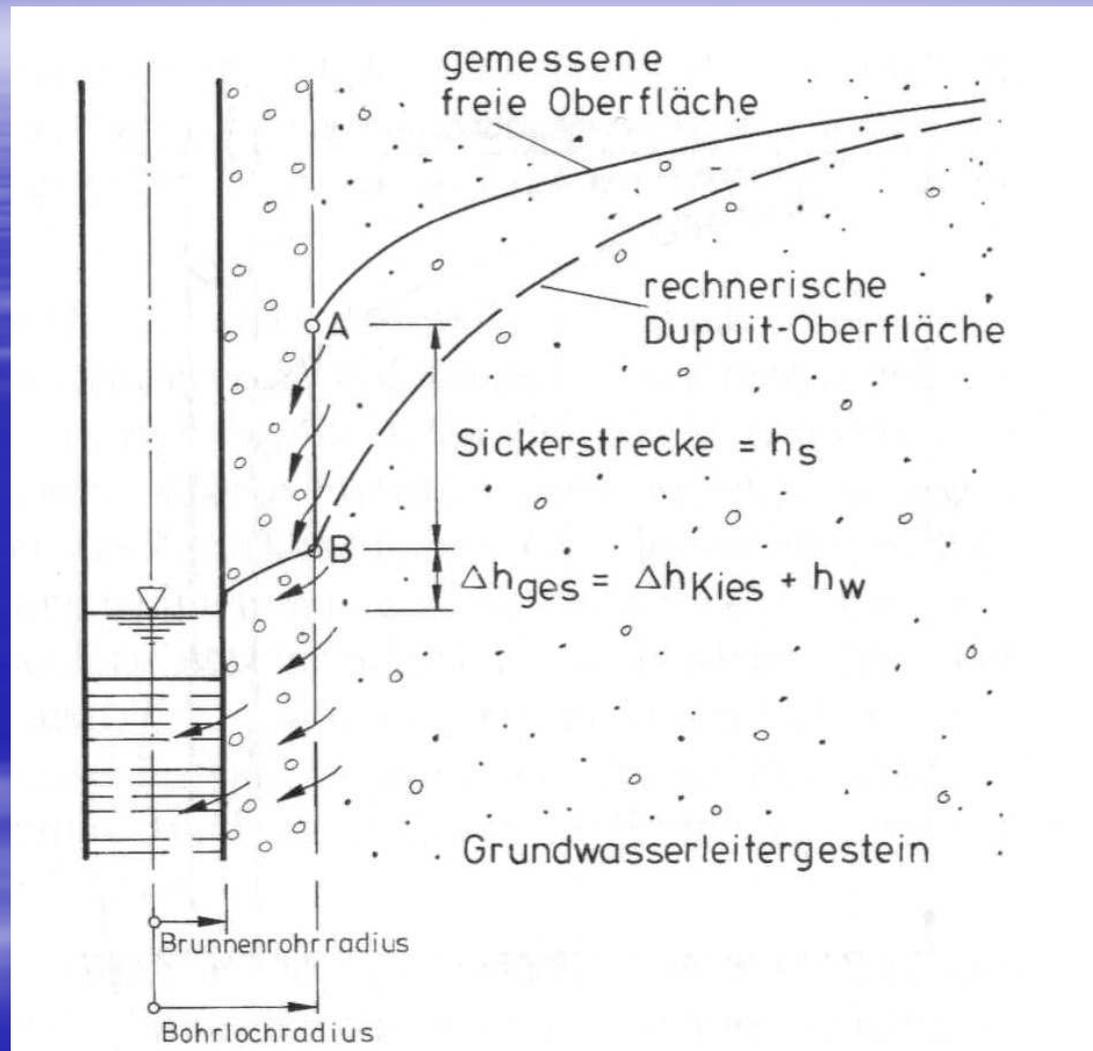
Bestimmung der hydraulisch optimalen Brunnenbetriebsleistung Q_{opt} aus dem Wasserandrang Q_A und dem Fassungsvermögen Q_F im ungespannten Grundwasserleiter

Auswertung von Leistungstests

Q/s-Diagramm bei Brunnenalterung



Filterwiderstand und Sickerstrecke



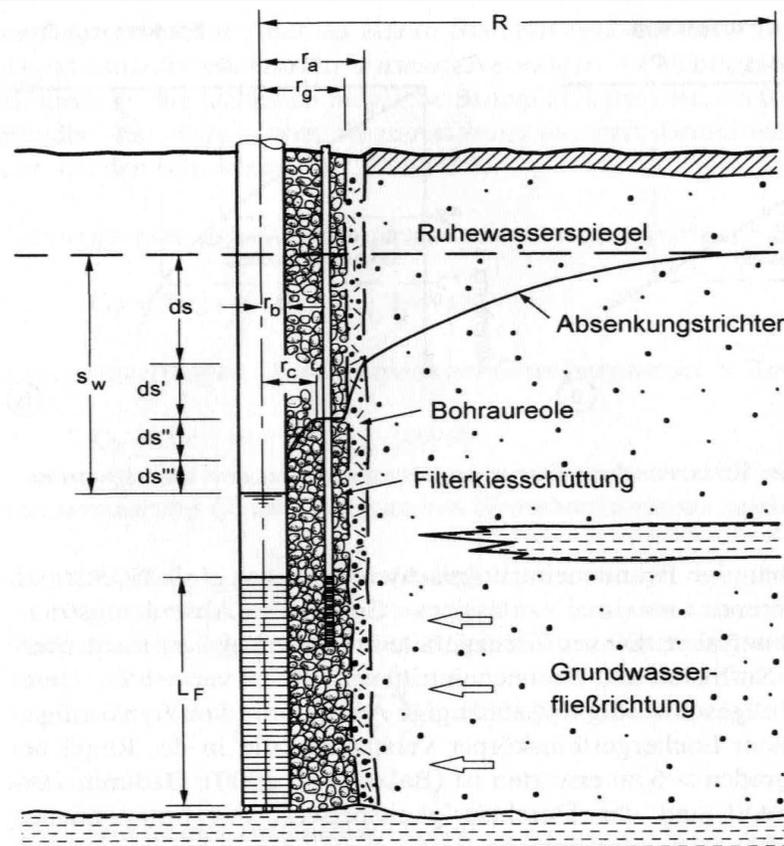


Bild 2.5:
Druckverluste aufgrund geschwindigkeitsabhängiger Eintrittsverluste am Vertikalfilterbrunnen. Durch die Messung des Wasserspiegels im Peilrohr und im Brunnenrohr kann dieser Druckverlust ermittelt werden.

Abkürzungen :

- R : Absenkungsradiusweite
- r_a : Radius Brunnenachse - Bohraureole
- r_g : Radius Brunnenachse - Bohrlochwand
- r_b : Radius des Brunnenrohres
- r_c : Radius Brunnenachse - Peilfilter in Kiesschüttung (Wsp.)
- L_F : Länge der Filterstrecke
- s_w : Gesamtabenkung
- d_s : Absenkung im Aquifer
- $d_{s'}$: Absenkungseinfluß der Bohraureole
- $d_{s''}$: Absenkungseinfluß der Filterkiesschüttung
- $d_{s'''}$: Absenkungseinfluß der Filterschlitzzone

Houben & Treskatis 2002

Strömungsdruckverluste an Brunnen

$$S_{ges} = S_{aq} + S_{skin} + S_{FK} + S_{FS}$$

S_{ges}	=	Gesamtabsenkung
S_{aq}	=	Absenkung im Grundwasserleiter
S_{skin}	=	zusätzliche Absenkung in der Bohraureole
S_{FK}	=	zusätzliche Absenkung in der Filterkiesschüttung
S_{FS}	=	zusätzliche Absenkung in den Filterschlitzten bzw. im Filtermedium

Bestimmung von Brunneneintrittsverlusten

Die Grundbeziehung für den „summarischen“ Skinfaktor in gespannten Grundwasser- verhältnissen (radialsymmetrisch, isotrop) gibt die Gleichung von Jacob (1946) mit:

- Q: Fördermenge [m³/s]
- t: Zeit seit Pumpbeginn [s]
- H₀: Standrohrspiegelhöhe bei t = 0
- H: Abgesenkte Standrohrspiegelhöhe zum Zeitpunkt t
- T: Transmissivität [m²/s]
- S: Speicherkoeffizient [-]
- r: Abstand des Bezugspunktes vom Brunnen [m]

$$H_0 - H = \frac{2,3 \cdot Q}{4\pi \cdot T} \cdot \lg \frac{2,25 \cdot T \cdot t}{r^2 \cdot S} +$$

Der Skineffekt S_E kann als zusätzliche Absenkung ΔH_{Skin} in die Jacob-Gleichung eingeführt werden.

Mit den folgenden Umstellungen wird die direkte Bestimmung der Skin-Größe im unmittelbaren Brunnenbereich möglich mit:

- H_{Br}: Wasserspiegel im Brunnen [m]
- r_{eff}: Effektiver Brunnenradius [m]
- t₁: Gesamtpumpzeit [s]

$$\Delta H_{Skin} = H_0 - H_{Br} - \frac{2,3 \cdot Q}{4\pi \cdot T} \cdot \lg \frac{2,25 \cdot T \cdot t_1}{r_{eff}^2 \cdot S}$$

Grundwasserleitertyp	Häufig auftretende Probleme*	Instandhaltung	Vermeidungsstrategie
Alluviale Grundwasserleiter	Tontrübe, Silt- oder Sandeinbrüche, Fe-Mn-Inkrustationen in Filter und Kies, Fouling, Korrosion	1 bis 5 Jahre je nach Hydrochemie oder Körnungslinie	Intensiventsandung, Edelstahlausbau, Überdimensionierung
Sandstein als Kluftgw	Clogging der Klüfte durch Feinmaterial, Feststoffabtrag Korrosion	5 bis 10 Jahre	Langzeitproduktionstest, hydraulisches Fracen
Kalkstein als Karst- oder Kluftgw	Clogging der Klüfte durch Feinmaterial, Carbonat-(Fe-Mn) – Inkrustationen	5 bis 10 Jahre	Edlestahlausbau, geringe Anströmgeschwindigkeiten
Basalt als Kluftgw	Clogging der Klüfte durch Feinmaterial, Fe-Mn-Inkrustationen	5 bis 10 Jahre	s.o.
Sandstein-Siltstein-Wechselagerungen	Geringe Ergiebigkeiten, Clogging der Klüfte, des Kieses und des Filters, Inkrustationen	3 bis 5 Jahre	s.o. und Autostabile Entwicklung
Metamorphite als Kluftgw	Geringe Ergiebigkeiten, Kolmation der Klüfte meist durch Fe-Mn-Partikel und/oder Inkrustationen	5 bis 10 Jahre	s.o.
Verfestigte Sedimentite als Kluftgw	Geringe Ergiebigkeiten, Clogging der Klüfte meist durch Fe-Mn-Partikel und/oder Inkrustationen	3 bis 5 Jahre	s.o.
Halbverfestigte Sedimentite als Kluftgw	Feststoffabtrag und Kolmation der Kiesschüttung, Inkrustation von Filtern und Kies, vor allem Fe-Inkrustationen	2 bis 5 Jahre	Autostabile Entwicklung

* In Bezug auf das Fassungsbauwerk
HLUG Fortbildungsveranstaltung
Stadthalle Idstein, 14. Juni 2007

Prof. Dr. Ingo Sass

Prozentuale Verteilung der Brunnenalterungsphänomene

nach DVGW Erhebungen in der Wasserwirtschaft:

- **Versandung (<10%)**
- **Verockerung (ca. 80%)**
- **Korrosion (5%)**
- **Versinterung (3%)**
- **Verschleimung (<2%)**
- **Aluminiumausfällungen (<1%)**

Korrosion durch „mikrobielle Katalyse“

- In sauerstofffreiem (saurem) Milieu unter Anwesenheit von gelöstem Sulfat läuft die Stahloxidation wie folgt ab:
 - $4\text{Fe} + 8\text{H}^+ \leftrightarrow 4\text{Fe}^{2+} + 4\text{H}_2$
- Die Sulfatreduzierer können den Korrosionsfilm aus Wasserstoff für ihren Metabolismus verwerten:
 - $4\text{H}_2 + \text{SO}_4^{2-} \leftrightarrow \text{H}_2\text{S} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{OH}^-$
- Der mikrobiologisch erzeugte Schwefelwasserstoff kann nun mit dem zweiwertigen Eisen zur Bildung weiterer Säure reagieren:
 - $4\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{S} + 4\text{H}_2\text{O} + 2\text{OH}^- \leftrightarrow \text{FeS} + 3\text{Fe}(\text{OH})_3 + 6\text{H}^+$
- Es entstehen schwärzlich-rote Massen aus Eisenoxiden und Eisensulfiden (Mackinawit FeS ; Greigit Fe_3S_4): Erkennung durch Schwefelsäuretest!
- Oft sind diese Biofilme unter oxidativen Biofilmen versteckt. Die Korrosionsraten können mehrere mm/Jahr betragen.

„Korrosion“ von Nichtstahlausbaumaterialien

- Holz
- Cellulose wird mikrobiell zersetzt, Lignin bleibt zurück

- Steinzeug
- Nach Verletzung der Glasur kann die Zementphase sauer zersetzt werden. Die Betonaggressivität des Wassers ist zu beachten

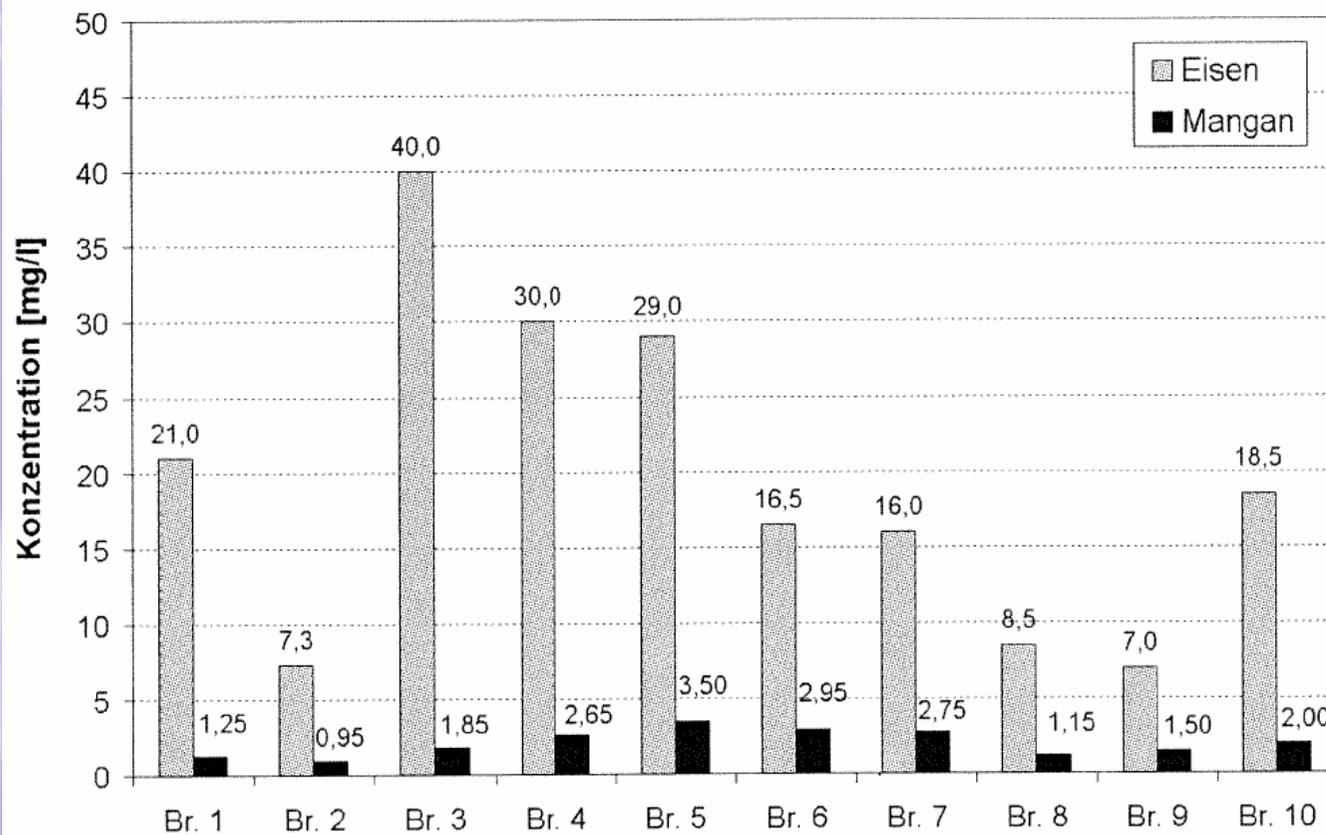
- PVC-U
- Stabilisatoren (SM-Salze) können herausgelöst werden, wodurch die Rohre ihre statische Funktion einbüßen.

Entstehung von Brunneninkrustationen

- Die Bildung von Inkrustationen innerhalb von Brunnen ist überwiegend ein Resultat der Vermischung von Wässern unterschiedlicher Beschaffenheit.
- Bei der Mischung laufen Reaktionen ab, deren Reaktionsprodukte als schwer lösliche Produkte ausfallen.
- Zusätzlich wird die Beschaffenheit des Grundwassers im Inneren des Brunnens durch den Gasaustausch mit der Atmosphäre verändert.

Entstehung von Brunneninkrustationen

Auch in der Horizontalen kann Grundwasser hydrochemisch sehr variabel sein.



- Eisen- und Mangan-Konzentrationen im Rohwasser
- Brunnenabstand 50 m

Houben 2003

Eisen- und Mangan-Verockerung

Grundgleichung:

Kommt gelöstes Fe^{2+} in Kontakt mit gelöstem Sauerstoff, führt dies zur Oxidation zu Fe^{3+} , welches auf Grund der geringeren Löslichkeit in Wasser als Eisenoxid ausfällt.



In reduzierenden Wässern gelöst kommt fast ausschließlich Mn^{2+} vor. Bei Kontakt mit Sauerstoff wird das Mangan zu Mn^{3+} oder Mn^{4+} oxidiert. Diese fallen in Form von Manganoxiden aus.



Mikrobiologie der Verockerung

Mikroorganismen, insbesondere Bakterien, haben einen entscheidenden Einfluss auf die Verockerung von Brunnen.

Insbesondere die Gattung *Gallionella* ist an ein Leben in der Übergangszone zwischen oxidierendem und reduzierendem Milieu optimal angepasst und fühlt sich daher in vielen Brunnen sehr wohl.

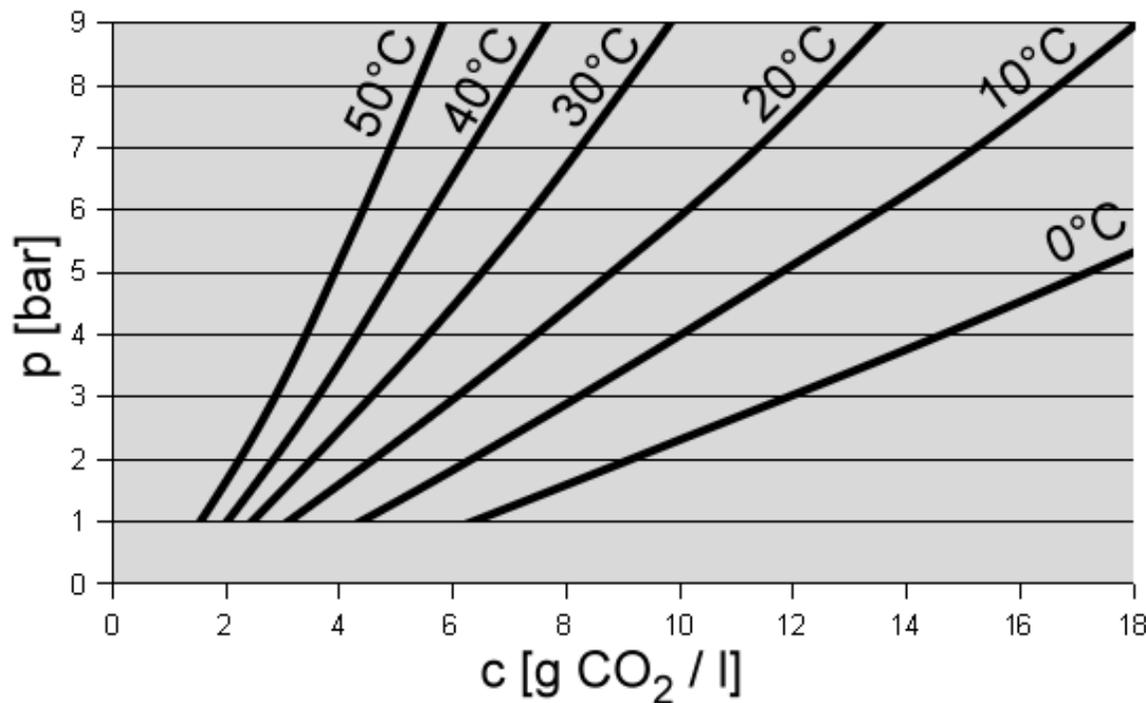
Gallionella lebt autotroph, d.h. die zum Leben notwendige Energie bezieht der Organismus aus der **Oxidation von Fe^{2+} zu Fe^{3+}** . Der Kohlenstoff der zur Synthese von Biomasse benötigt wird entstammt dem in Wasser gelösten Kohlendioxid.

Der Stoffumsatz ist dabei sehr hoch:

Um **ein Gramm Biomasse** zu produzieren müssen die Bakterien
Über **11 Gramm $FeOOH$** ausscheiden.

Versinterung

Karbonat-Inkrustationen treten nur in stark karbonathaltigen Wässern auf. Die Löslichkeit von Kalk in Wasser wird maßgeblich vom Gehalt gelöster Kohlensäure gesteuert.



- Die Löslichkeit von CO₂ in Wasser ist abhängig von **Temperatur und Druck**. Beides kann sich im Brunnen ändern.
- Bei **Temperaturerhöhung** und/oder **Druckverringering** entgast CO₂.
- Dies führt zu einer **geringeren Löslichkeit von Kalk** und damit zu **Sinterbildungen**.

Spezialfall: Aluminiumhydroxid-Inkrustationen

Die Entstehung von Aluminiumhydroxid-Inkrustationen ist an **saure Bodenreaktionen im Hangenden eines Grundwasserleiters** gebunden. Bei **pH-Werten unterhalb $\text{pH} = 4,2$** kann Aluminium aus den in der geologischen Formation immer vorhandenen Al-Hydroxiden, Tonmineralen und Feldspäten mobilisiert werden und mit dem Sickerwasser nach unten transportiert werden. Mischt sich dieses Wasser im Brunnen mit **tieferem Grundwasser mit höheren pH-Werten** kommt es zur Ausfällung von Aluminiumhydroxid.

Sulfide

Sulfid-Inkrustationen treten nur sehr **selten in reiner Form** auf. Gelegentlich sind erhöhte Anteile von Sulfiden in Eisenoxid-Inkrustationen in tiefen Brunnen anzutreffen. Im Gegensatz zur Bildung von Eisenoxid-Inkrustationen ist zur Bildung von Sulfiden ein reduzierendes Milieu notwendig.

Diese Vorkommen deuten also auf ein wechselndes Redoxmilieu hin, die sehr lokal an Biofilmen auftreten können.

Verschleimungen

In Brunnen mit nährstoffreichem Wasser ist die Bildung von mikrobiellen Belägen besonders häufig. Die wichtigsten Nährstoffe sind **Phosphor, Stickstoff und Kohlenstoff**.

Verschleimungen treten häufig auf bei der Förderung von **Uferfiltrat** und bei **organisch** belasteten Grundwässern. Schon geringe Konzentrationen von assimilierbarem organischem Kohlenstoff (AOC) von 0,01 mg/l können zu einer biologischen Kolmation des Brunnens führen.

Sondertypen

Unter besonderen hydrogeologischen Bedingungen können weitere Inkrustationen auftreten.

Bei **geothermischen Brunnenanlagen und Thermalwasserquellen** treten neben Karbonaten auch **Gips-, Baryt-, Strontianit, Eisensulfat- und Silikatinkrustationen** auf.

Im Abstrom von **Deponien und Altablagerungen** kommt es neben **Eisenoxid- und Eisensulfid-** auch zu **Karbonat- und Gipsinkrustationen**.

Weitere Aspekte von Inkrustationen

Häufig lagern sich an den wachsenden Inkrustationen weitere Partikel aus dem Grundwasserstrom an. Dies führt zu einer weiteren mechanischen Blockade des Filters.

In den meisten Fällen beginnt die Inkrustation im oberen Bereich des Filters. Ist der Wasserzutritt im oberen Bereich weitgehend reduziert wächst die Inkrustation nach unten weiter.