

---

# Wassergewinnung in einem Festgesteinsaquifer

## Untersuchungen zu den Brunnenfeldern im unteren Kylltal



---

# Grundlagenforschung

- Geologische Kartierungen (aktuellere Uni-Trier, u.a. Kremb-Wagner, F.)
- Niederschlagsmessungen (Deutscher Wetterdienst, Lahmeyer AG)
- Abflussmessungen (hydrologischer Landesdienst, Lahmeyer AG)
- 1973 Pumpversuche (Lahmeyer AG)
- 1975 Tektonische Elemente (Luftbildinterpretation, Lahmeyer AG / Kaiser)
- **1985 umfangreiche Wasseranalysen („natürliche Tracer“)**



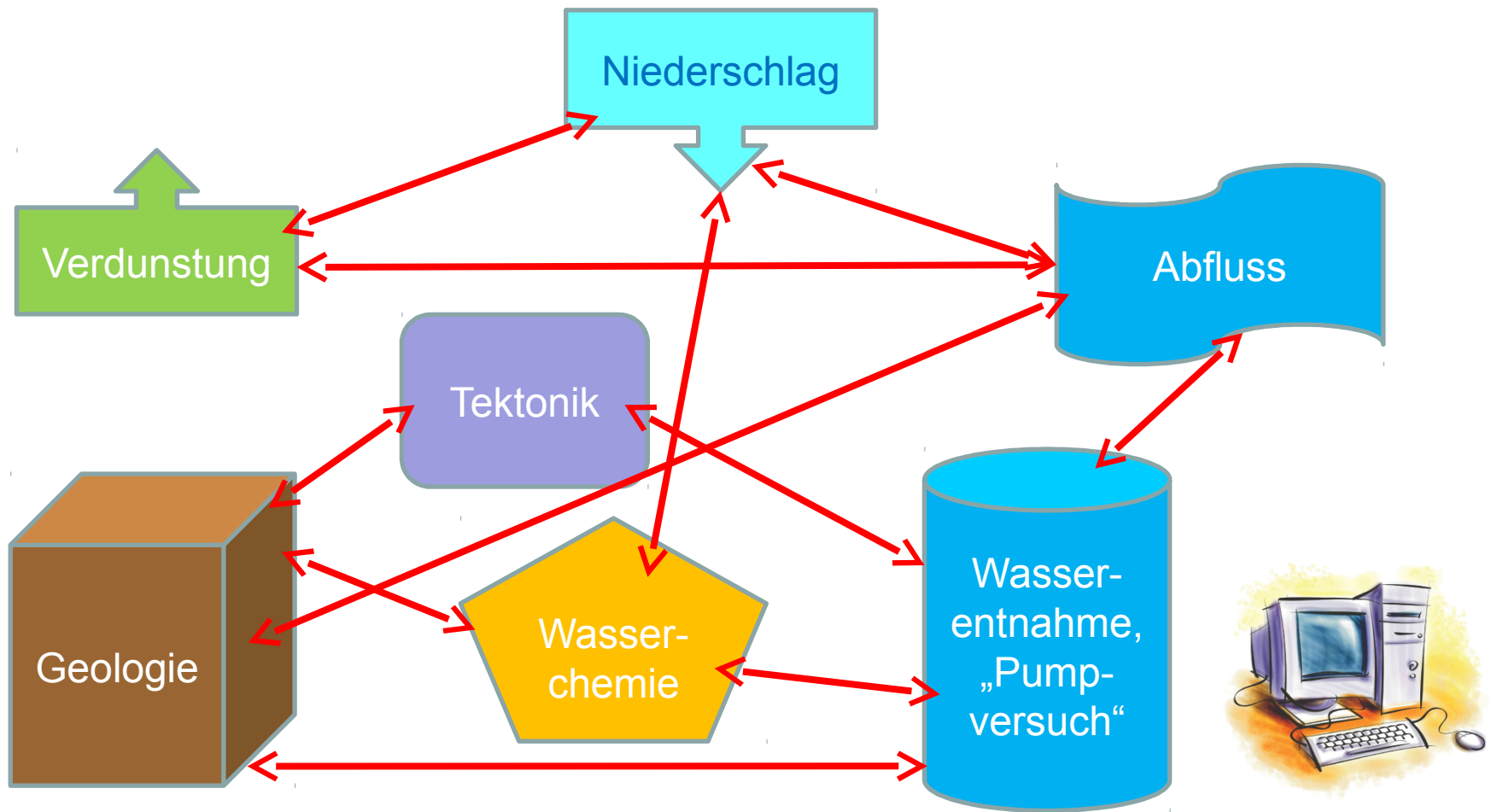
---

# Wissenschaftliche Auswertung

- 1978 Dissertation „Hydrogeolog. Untersuchungen zur Grundwasserneubildung in der Bitburger Mulde (Kylltal); Krieger, K.-H.
- 1979 Dissertation „Aquifer Modellanalyse mit Hilfe hydrologischer Pumpversuche“; Diettrich, Th.
- 1993 Dissertation „Grundwasserneubildung und Durchlässigkeit in einem Festgesteinsaquifer am Beispiel des Wasserwerkes Kylltal der Stadtwerke Trier“; Hintermeier, Kh.
- ...



# Alles steht in Beziehung zu einander !



# Lösbarkeit eines linearen Gleichungssystems

Ein lineares Gleichungssystem

$$\mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{b}$$

mit einer beliebigen rechteckigen Koeffizientenmatrix (m Gleichungen mit n Unbekannten) entsprechend

$$\begin{array}{cccccccc} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots\dots\dots + a_{1n}x_n & = & b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \dots\dots\dots + a_{2n}x_n & = & b_2 \\ a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + \dots\dots\dots + a_{3n}x_n & = & b_3 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + a_{m3}x_3 + \dots\dots\dots + a_{mn}x_n & = & b_m \end{array}$$

ist lösbar, wenn der Rang der Koeffizientenmatrix  $r(\mathbf{A})$  gleich dem Rang der um den Vektor der rechten Seite  $\mathbf{b}$  erweiterten Matrix (zusätzliche Spalte)  $r(\mathbf{A}, \mathbf{b})$  ist. Ist dieser Rang gleich der Anzahl der Unbekannten  $n$ , ist die Lösung eindeutig. Ist der Rang kleiner als die Anzahl der Unbekannten, dann können  $n - r(\mathbf{A})$  Unbekannte frei gewählt werden.

→ was bedeutet, dass diese „Lösungen“ beliebig wären !!!



---

# Analyse → Synthese → Prognose

1. Fehleranalyse an den vorliegenden Arbeiten, bzw. den Ausgangsdaten
2. Auswertung des vorliegenden Daten und Ermittlung von zusätzlichem Datenmaterial (Wasseranalysen), um ein mathematisch bestimmtes Gleichungssystem auswerten zu können
3. Mathematische Modellierung (Aufstellung eines bestimmten Gleichungssystems und Auswertung)



---

# Fehleranalyse

1. Die Wasserbilanzrechnung von KRIEGER war fehlerhaft und im Ergebnis unzutreffend, da er keine Kenntnis über die Niederschlagsmessung (systematische Messfehler) hatte und deshalb Daten zweier unterschiedlicher Messnetze fehlerhaft verwendete.
2. Die Abflussmessungen des Landesdienstes waren fehlerhaft – in einem Jahr wurde an einem sehr stark verkrauteten Abflusspegel ein angestauter Wasserstand als erhöhter Abfluss gemessen (Kyllpegel Densborn).
3. Wegen Unterhaltungsdefiziten ließ die Qualität der Abflussmessungen an den Seitenbächen (Messprogramm Lahmayer) in den letzten Beobachtungsjahren nach.



# Wasserleitung im Kluftsystem

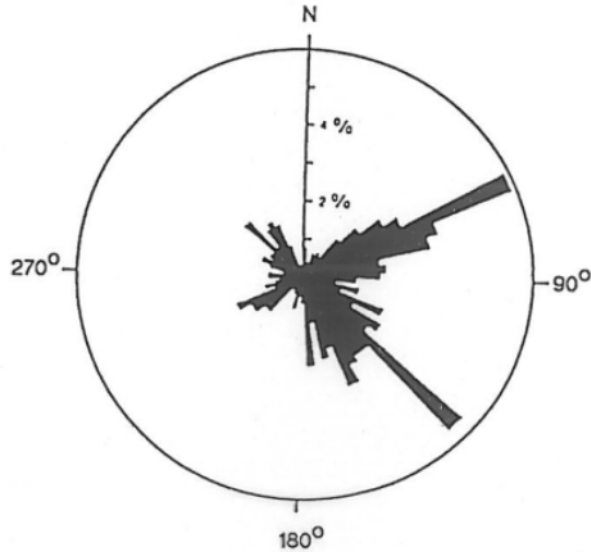


Abb. 3-1 Einfallrichtung der Klüfte (793 Werte) und ihre Häufigkeit in % (Größenklassen 5'). [29]



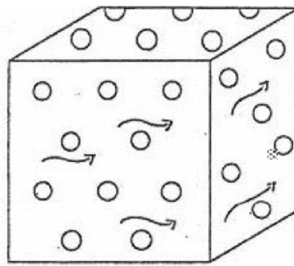
Abb. 3-4 Luftbildinterpretation Ehrang-Kordel (nach Kaiser 1975)





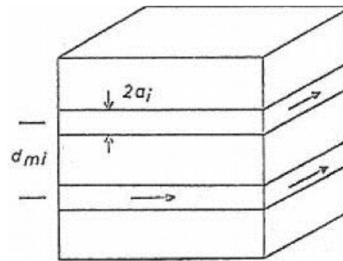
# Hydraulische Eigenschaften des Poren-Kluft-Aquifers

LOCKERGESTEIN



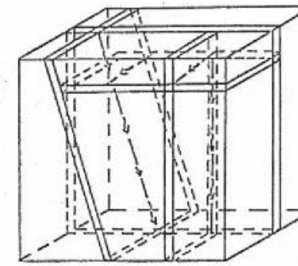
Porengrundwasserleiter  
 $Q = k \cdot i \cdot F$   
 laminare Strömung  
 $v = ki$   
 Porosität  $n \sim 10-60\%$

FELS



KLUFT- GRUNDWASSERLEITER  
 Spaltmodell  
 Spaltströmung  
 $\bar{v}_i = \frac{g(2a_j)^2}{12\nu} \cdot I_{pi}$   
 $q_i = \bar{v}_i \cdot (2a_j) \cdot n \cdot l$   
 Filtergeschwindigkeit:  
 $v_i' = \frac{g(2a_j)^3}{d_{mi} \cdot 12\nu} \cdot I_{pi}$   
 Kluftvolumen meist  $< 2\%$   
 Verformbarkeit des Fels:  
 $k_f, 2a_j = f(p)$

FELS



realer Fels:  
 Strömung längs Röhren,  
 bevorzugt an Kluftkreuzungen



# Pumpversuchsauswertung

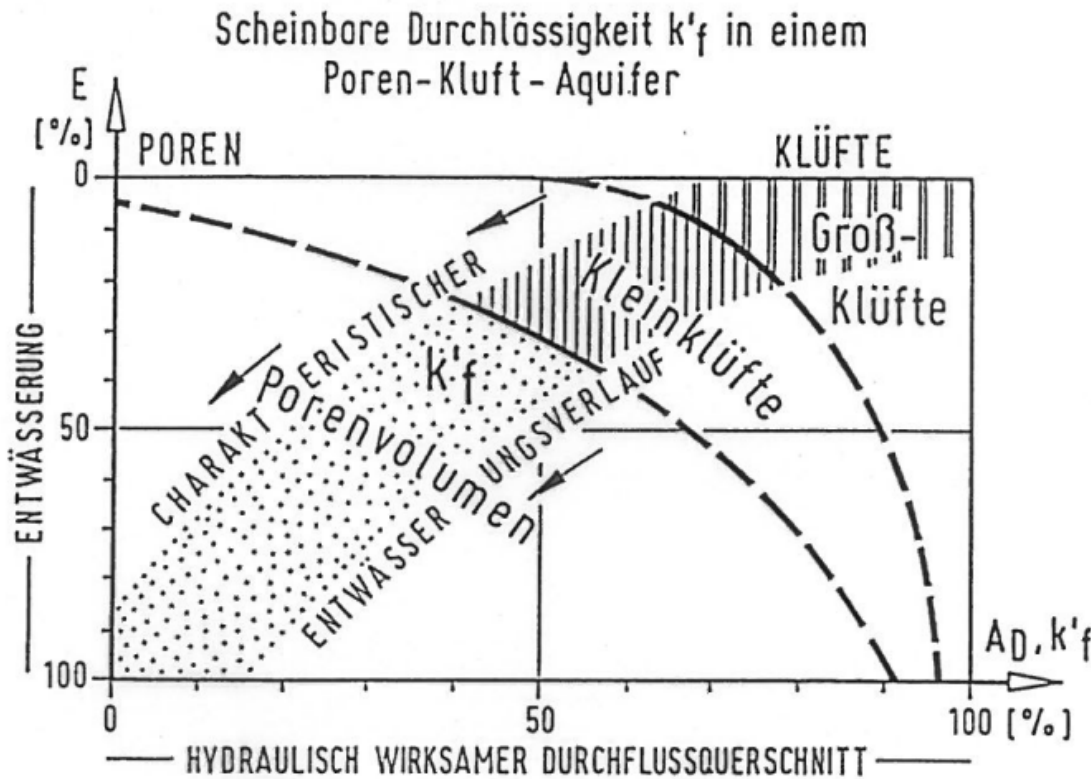
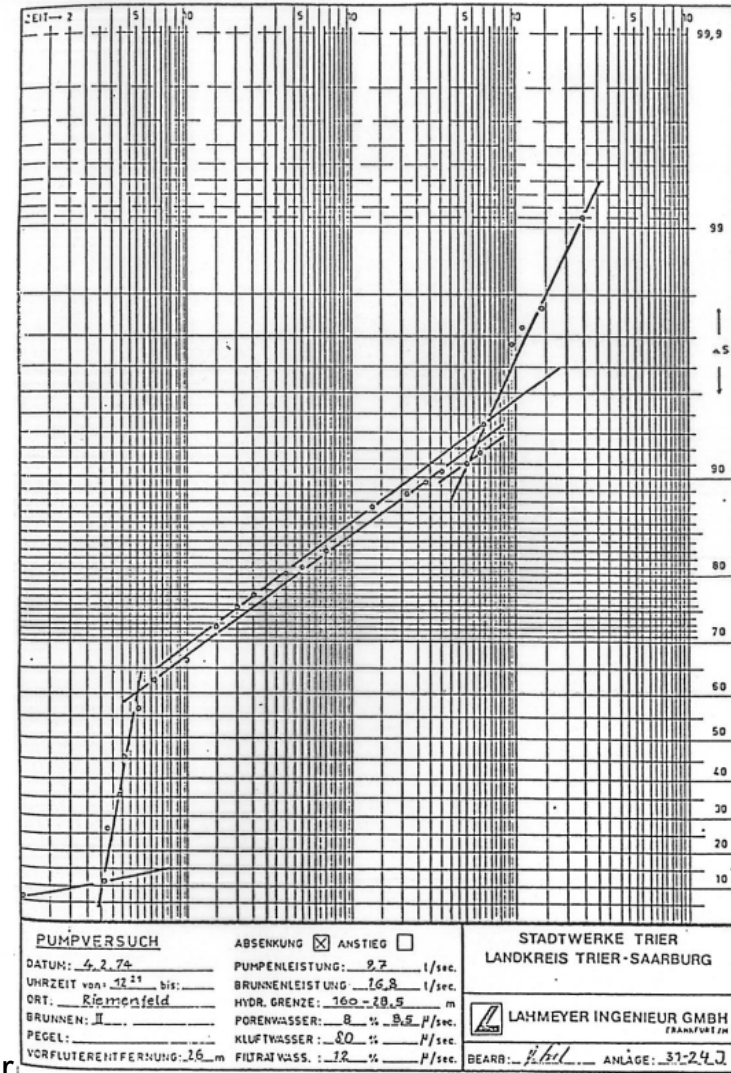


Abb. 9-2 Qualitativer Zusammenhang von zunehmender Entwässerung des Aquifers und beobachteter Durchlässigkeit  $k'_f$

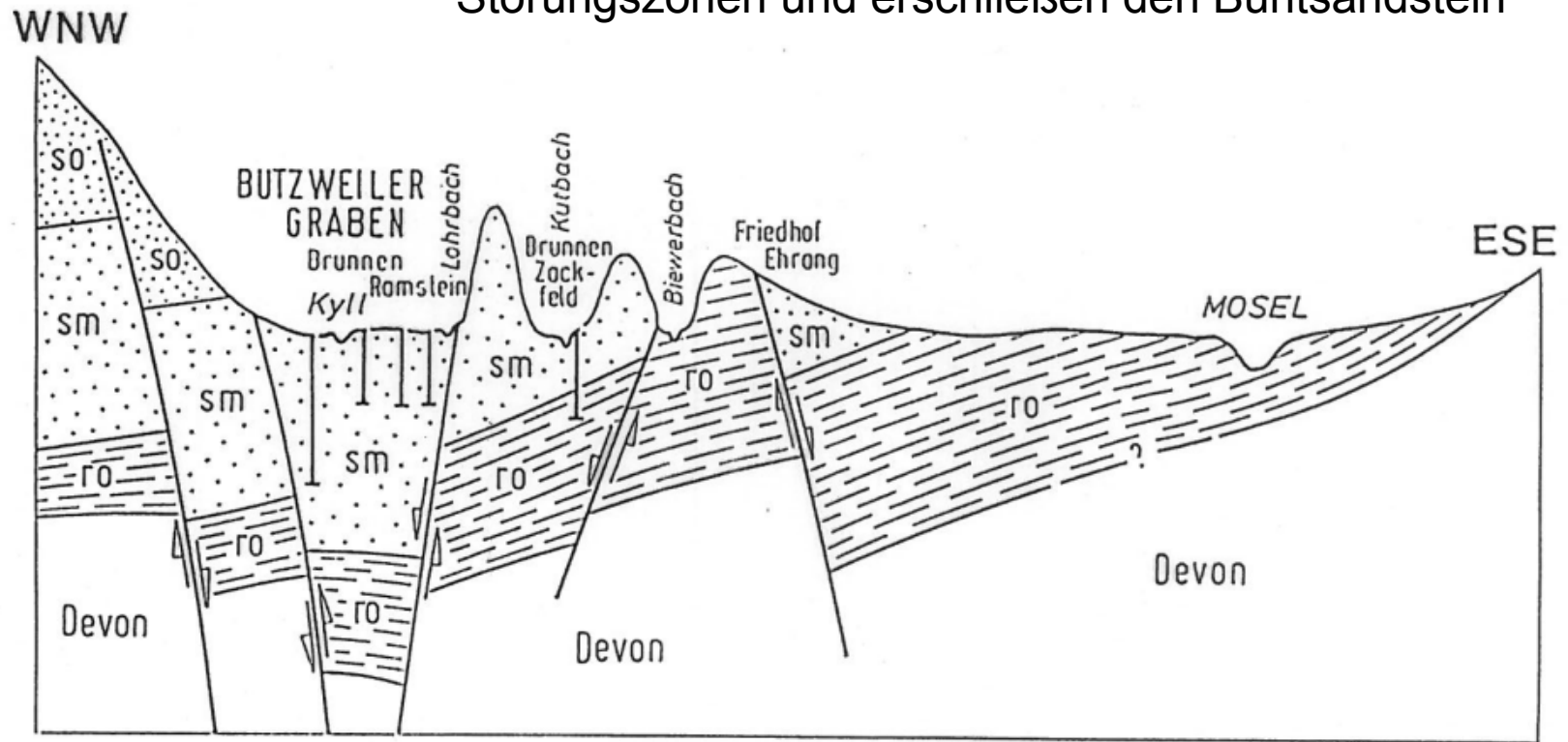


# Woher kommt das Wasser ?

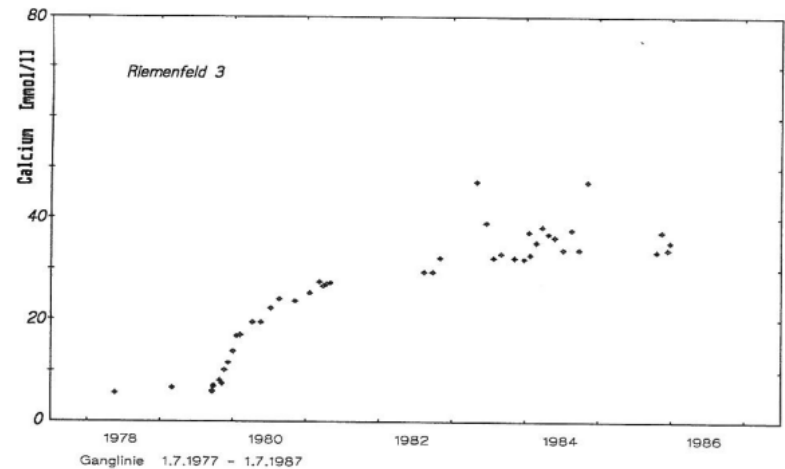
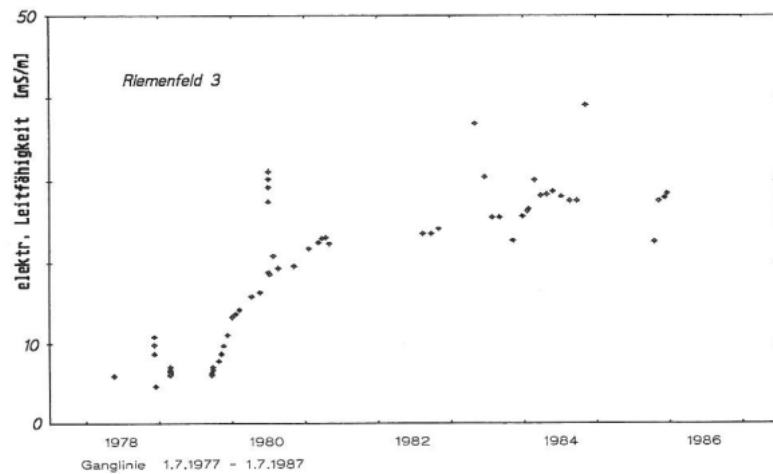
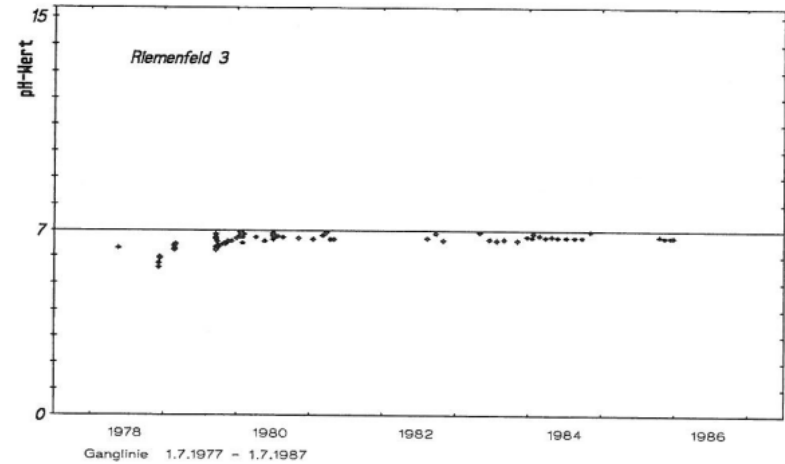
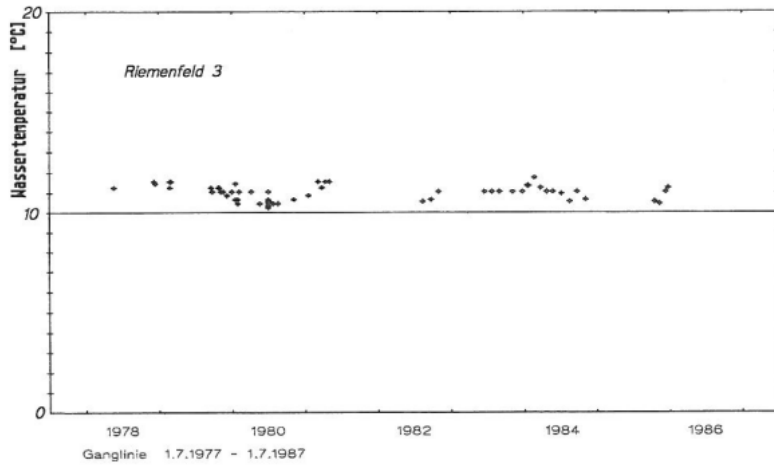
Die Brunnen stehen in relativ gut wasserwegsamem Störungszonen und erschließen den Buntsandstein

Abb. 3-2

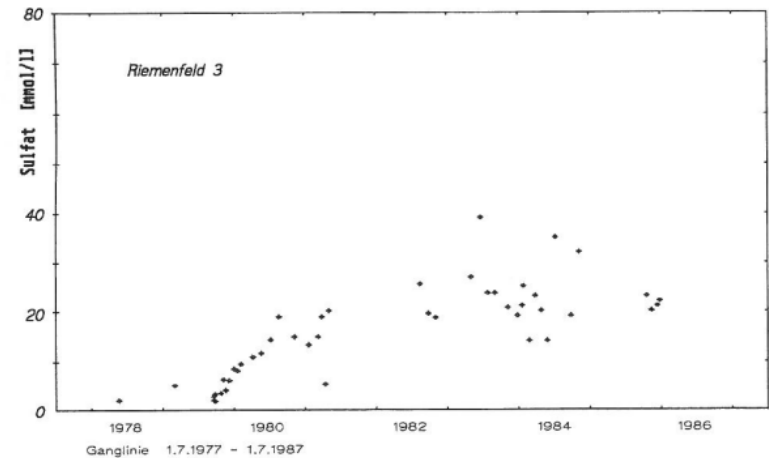
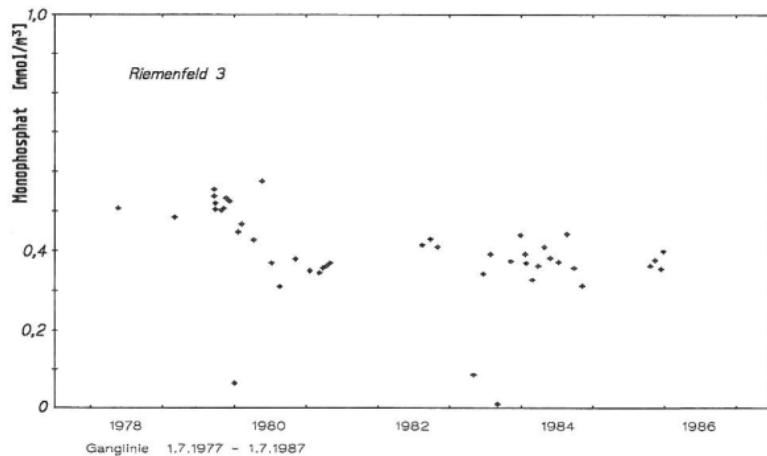
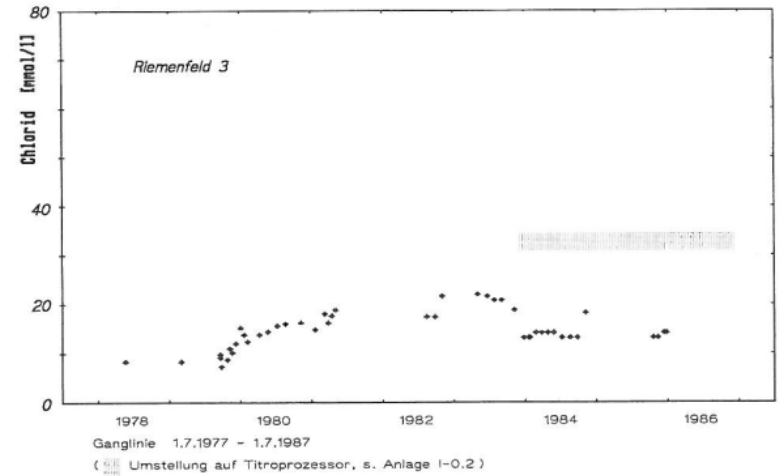
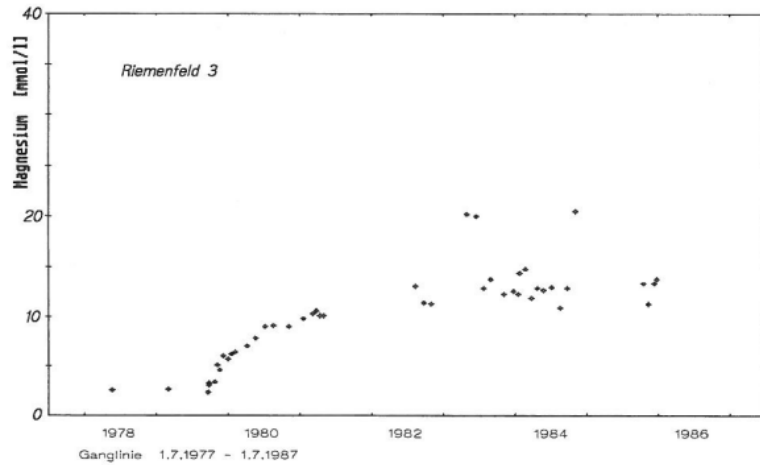
Geologisches Profil des unteren Kylltales

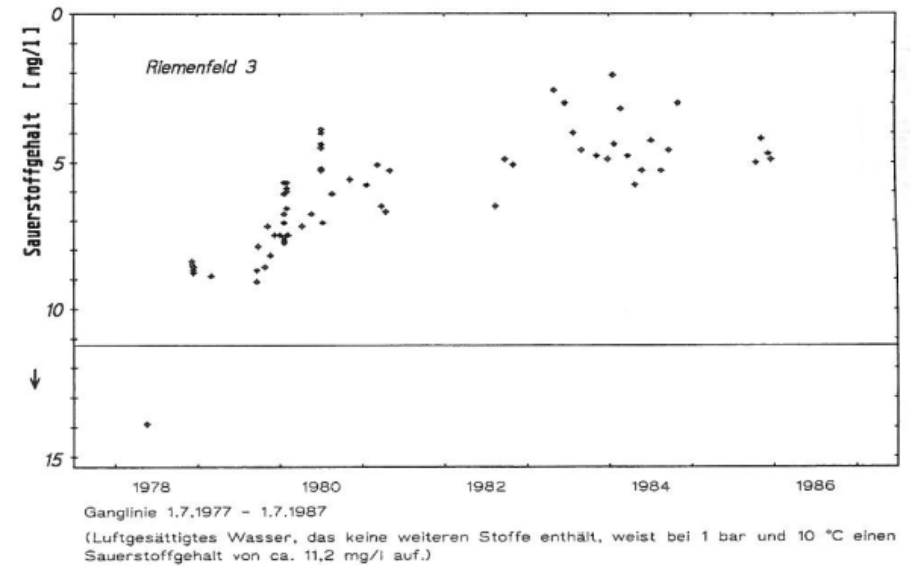
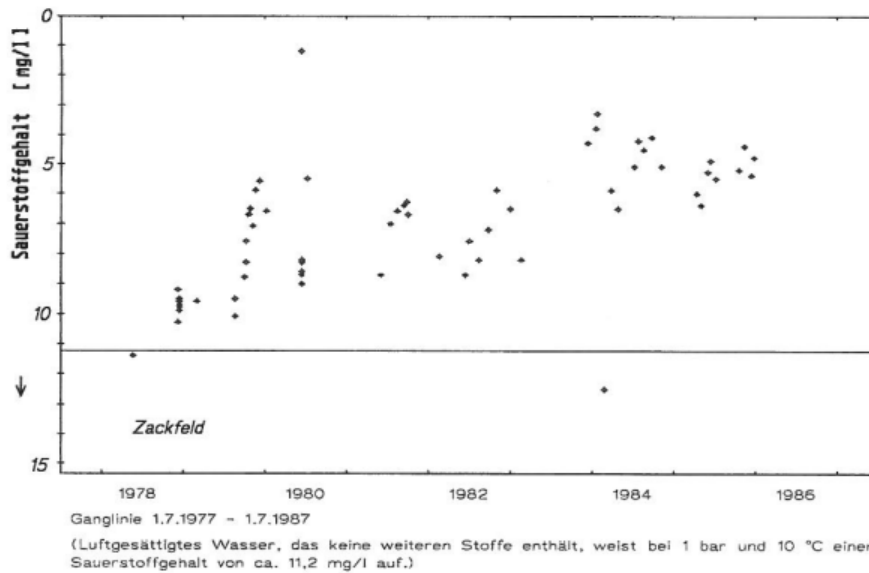
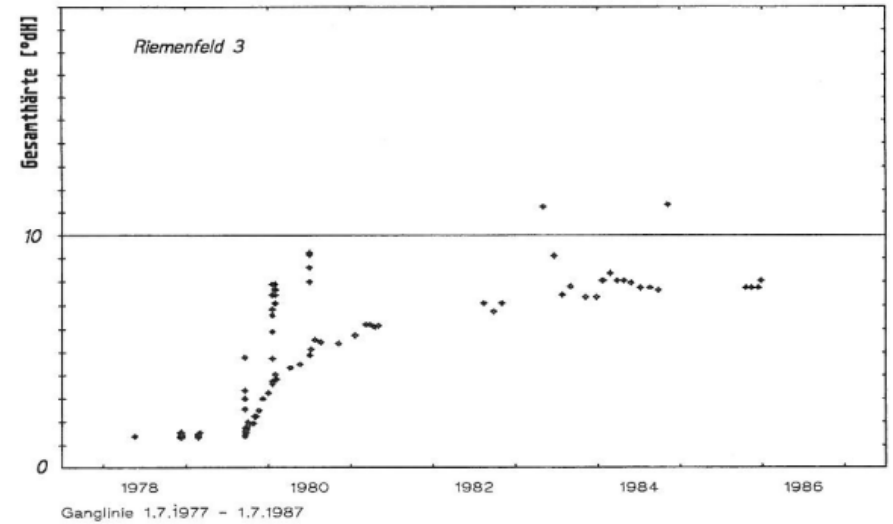
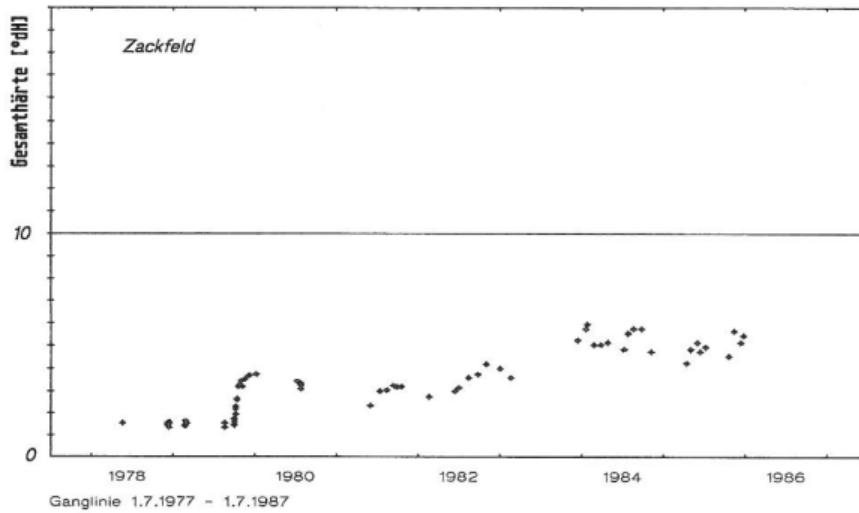


# Wasserchemie: natürliche Tracer



# etwas zeigen die Werte an ...





# Korrelation von Gesamthärte und Sauerstoffgehalt

Beide Parameter sind chemisch von einander unabhängig, so dass eine direkte Wechselbeziehung nicht möglich ist. Gemeinsamkeiten beider Messreihen weisen also auf äußere Einflüsse hin!

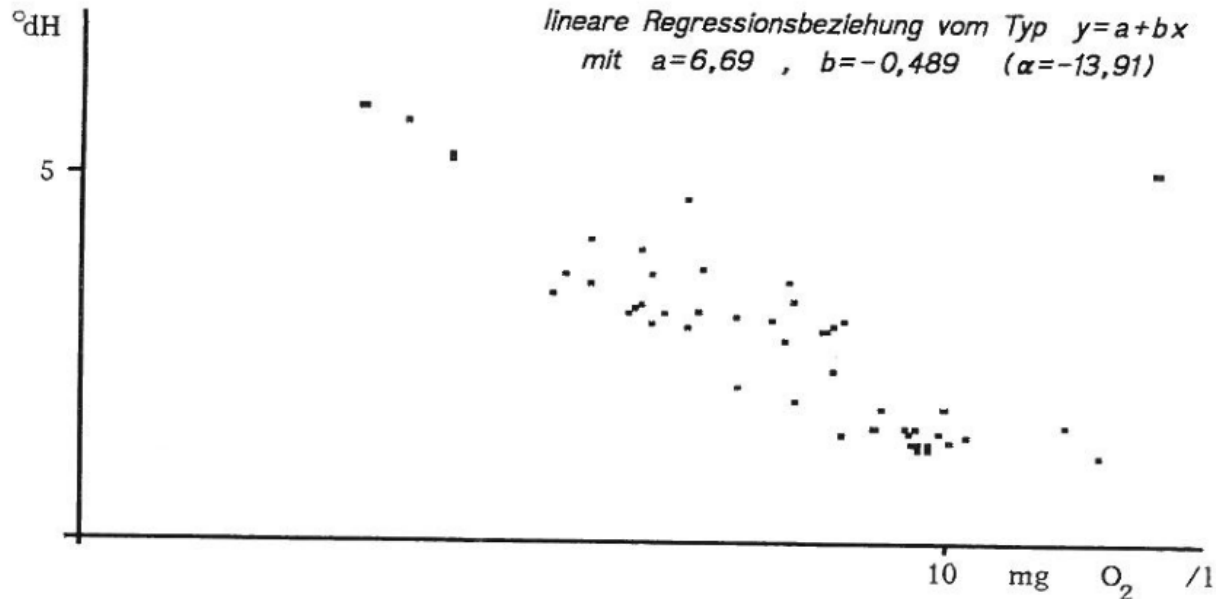
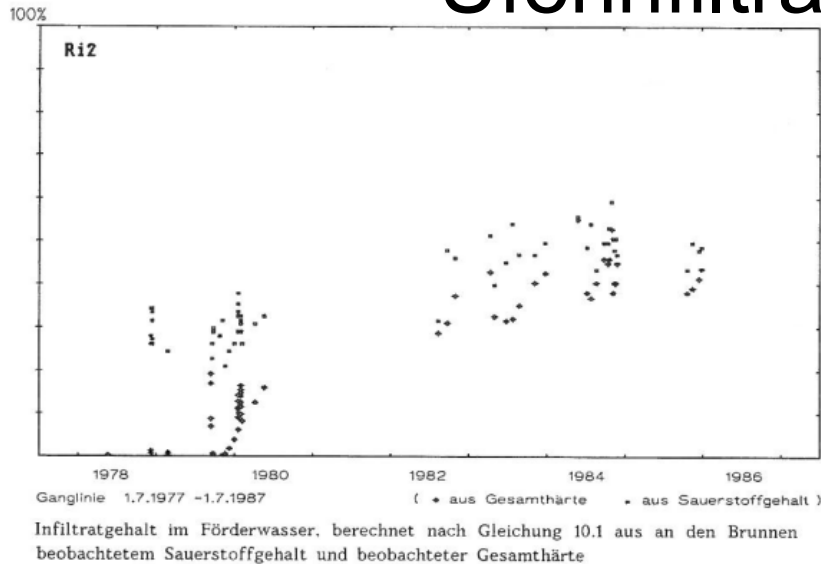


Abb. 10-3 Darstellung der Regressionsbeziehung von Gesamthärte und Sauerstoffgehalt für den Brunnen Zackfeld anhand von 52 Wertepaaren.



# Uferinfiltrat aus der Kyll

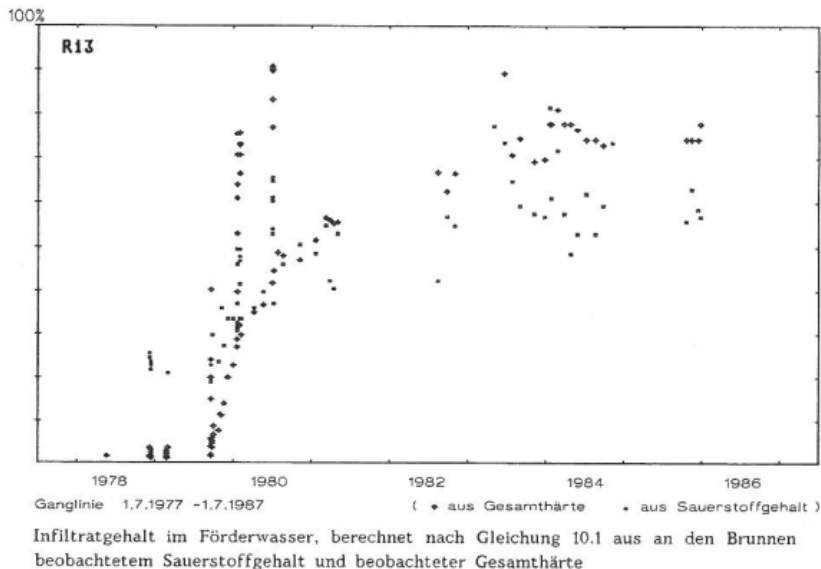


$$y = 10 - 0,786 x$$

mit  $x = 11,2 \text{ mg O}_2/\text{l}$  bei  $y = 1,2 \text{ °dH}$   
 $x = 0 \text{ mg O}_2/\text{l}$  bei  $y = 10,0 \text{ °dH}$

Wasser des Buntsandstein hat eine sehr geringe Härte von ca.  $1,2 \text{ °dH}$

In der Bodenpassage wird die organische Materie im Infiltratwasser unter Sauerstoffzehrung abgebaut





# Wasserwerksbetrieb als Pumpversuch

Eine wechselseitig die Kyll überschreitende Beeinflussung zeigte schon die Kurve der langjährigen Entwicklung der fraglichen Parameter an den Brunnen Kutbach 2 und Zackfeld auf. Im Bereich des Kutbaches ist die Klüftigkeit des Buntsandsteins allerdings auch besonders hoch, was sich bereits in dem zumeist fehlenden Abfluß des Baches dokumentiert. Auch liegen die beobachteten Keimzahlen recht hoch.

Betrieb	Entnahmedatum	Zackfeld 2.1 4 Meter	Kutbach 2.1 18 Meter	Kutbach 2.1 32 Meter
- Ruhe -	25.03.1985	4,8 °dH	1,4 °dH	- °dH
1 Monat	03.06.1985	8,1 °dH	8,2 °dH	8,7 °dH
2 Monate	01.07.1985	10,3 dH	7,3 dH	7,3 °dH
3 Monate	25.07.1985	13,4 °dH	6,3 °dH	9,3 °dH
- Ruhe -	04.09.1985	5,5 °dH	1,1 °dH	1,2 °dH
	30.10.1985	4,9 °dH	1,2 °dH	1,4 °dH

Tab. 10-9 Gesamthärte beiderseits der Kyll in den beiden Pegeln direkt neben den Brunnen Zackfeld und Kutbach 2



# Brunnenfeld Riemenfeld

In diesem Brunnenfeld liegt der Pegel Riemenfeld 1.1, der besonders aufschlußreiche Beobachtungen zuläßt, da er der tiefste Pegel des gesamten 1. Bauabschnittes ist. Dieser Pegel konnte in 9 verschiedenen Tiefen beprobt werden (siehe Tab. 10-6).

Pegel	Entnahmetiefe	26.03.1985	02.12.1985	21.01.1986
Riemenfeld 1.1	20 m	3,6 °dH	3,6 °dH	6,4 °dH
	40 m	4,0 °dH	5,4 °dH	7,4 °dH
	60 m	4,5 °dH	5,8 °dH	7,1 °dH
	80 m	5,3 °dH	5,8 °dH	7,1 °dH
	95 m	5,3 °dH	5,8 °dH	7,2 °dH
	125 m	5,3 °dH	4,3 °dH	5,7 °dH
	150 m	5,5 °dH	4,1 °dH	4,5 °dH
Brunnen in Betrieb:		nein	ja	ja


Tab. 10-6: Gesamthärte im Grundwasser des Brunnenfeldes  
Riemenfeld "Nord", beobachtet am Pegel Riemenfeld 1.1



# Mathematische Modellierung

Wie die nachfolgende Gegenüberstellung belegt, ist das aufgebaute Modellsystem mathematisch bestimmt und somit grundsätzlich kalibrierbar. Unter den getroffenen Vereinfachungen steht jeder Modellannahme eine bekannte Größe gegenüber.

Den folgenden Unbekannten (Modellgrößen)	steht zur Kalibrierung des Modelles gegenüber
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Form der Speicherzelle</li> <li>- Typ der Speicherzelle</li> <li>- Grundfläche "A" der Speicherzellen</li> <li>- Knotenverbindungen</li> <li>- <math>V_{soll}</math></li> <li>- Faktor zur Berücksichtigung des Uferinfiltrationsvermögens:  <math>w_{Kyll} = f(k, A_{Kyllspeicher})</math></li> <li>- Parameter für die Aquiferdurchlässigkeit:  <math>k</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Topographie</li> <li>- Geographie (Fluß, Einzugsgebiet, Brunnennahbereich)</li> <li>- geforderte Flächentreue, d.h. Fläche des Einzugsgebietes = <math>\sum A</math></li> <li>- aus der vorliegenden geologischen Erkundung</li> <li>- im Pumpversuch ermitteltes Porenvolumen und erkundete Aquifermächtigkeit (siehe Gleichung 11.1)</li> <li>- beobachtete Uferinfiltratganglinien (Wasserchemismus im Grundwasser)</li> <li>- Grundwasserneubildung im Untersuchungsgebiet und Entnahmemengen an den Brunnen (Kontinuitätsgleichung)</li> </ul>

Tab. 11-1 Gegenüberstellung von Modellgrößen und vorliegendem Datenmaterial; mit "  " wurde der Bereich markiert, in dem durch eine Variation der drei Parameter  $V_{soll}$ ,  $k$  und  $A_{Kyllspeicher}$  eine Sensitivitätsuntersuchung und Parameterkalibrierung durchgeführt wurde



# Modellbaustein / Berechnungsergebnisse

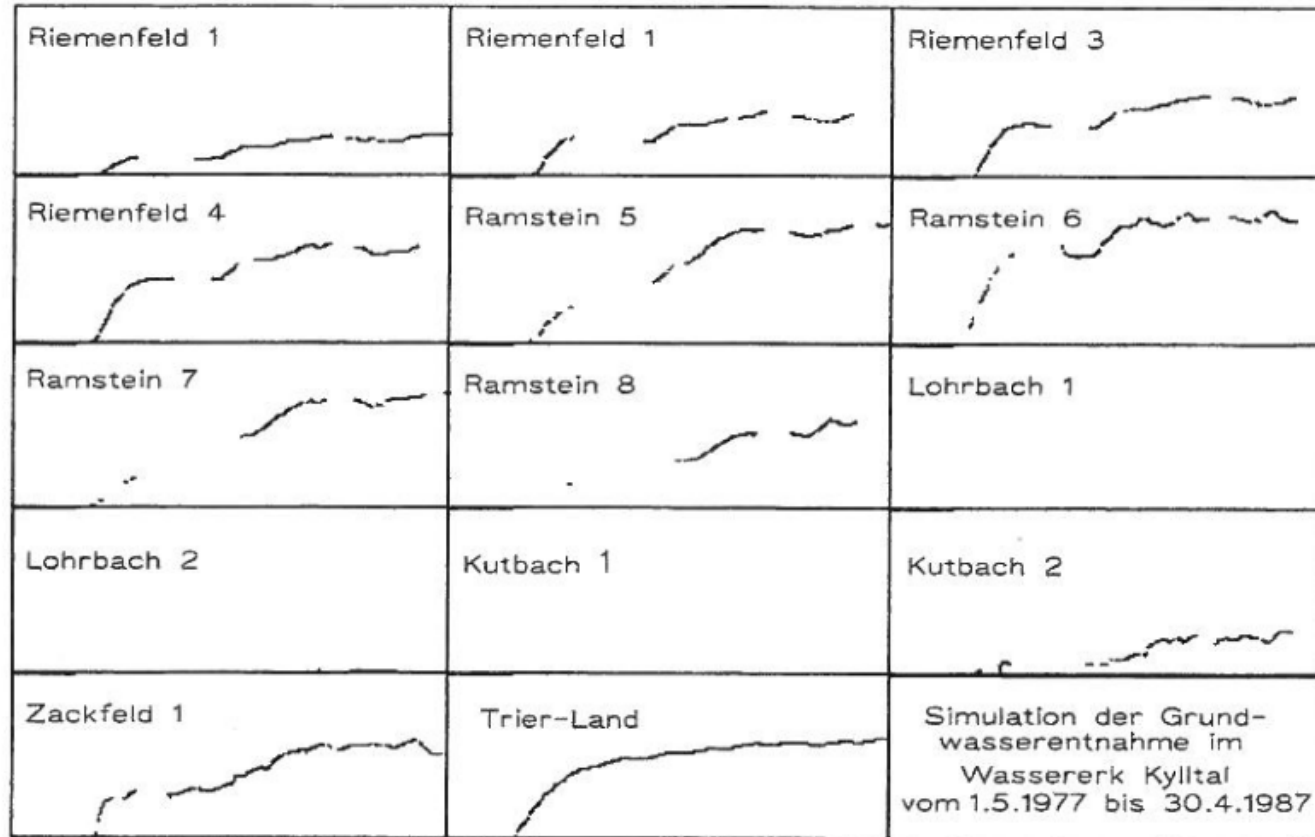
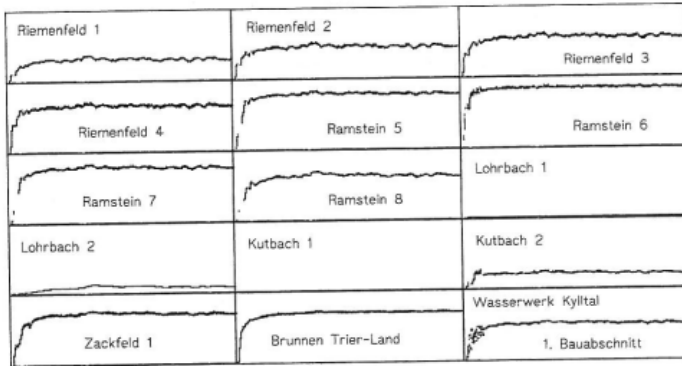


Abb. 11-8 Überblick über die Ganglinien des Uferfiltratanteiles am Förderwasser der einzelnen Brunnen (die Ganglinie für die Brunnen Trier-Land ist wie in Kap. 11.5 erläutert modelltechnisch zu sehen und stimmt nicht mit der Realität überein)

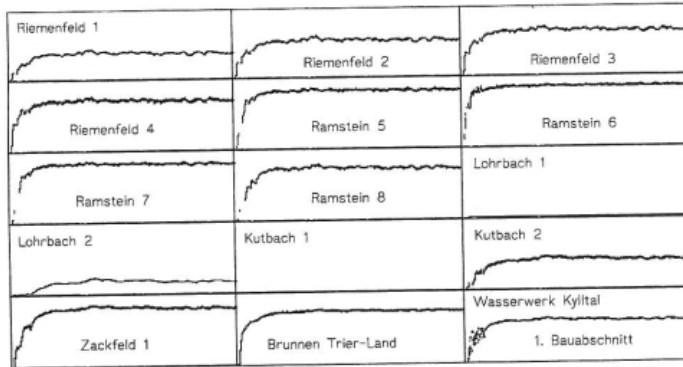
# Analyse → Synthese → Prognose

Anlage II-6.2

Entwicklung des Infiltratanteiles am geförderten Grundwasser:



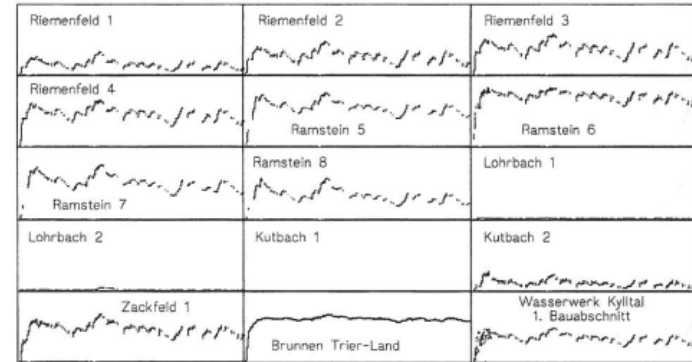
Simulationsfall 3 (100jährige Entnahmeganglinie im Anschluß an die Entnahmereihe 1977-1987):  
Bei einem Jahresbedarf von 8,5 Mio m<sup>3</sup> wird das Wasserwerk Kylltal ab einem Wasserstand von 314 mÜNN in der Riveristalsperre zugeschaltet (Entnahme zu 60% aus dem 1. Bauabschnitt, Entnahmeverteilung wie in der Reihe 1977-1987)



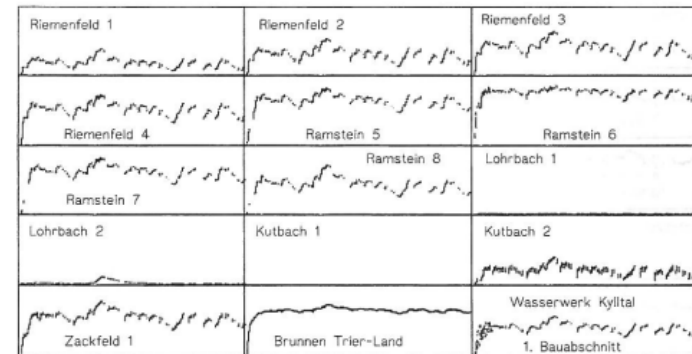
Simulationsfall 4 (100jährige Entnahmeganglinie im Anschluß an die Entnahmereihe 1977-1987):  
Bei einem Jahresbedarf von 8,5 Mio m<sup>3</sup> wird das Wasserwerk Kylltal ab einem Wasserstand von 314 mÜNN in der Riveristalsperre zugeschaltet (maximale Entnahme aus dem 1. Bauabschnitt, entsprechend der installierten Pumpleistung und dem gegebenen Wasserrecht)

Anlage II-6.3

Entwicklung des Infiltratanteiles am geförderten Grundwasser:



Simulationsfall 5 (100jährige Entnahmeganglinie im Anschluß an die Entnahmereihe 1977-1987):  
Bei einem Jahresbedarf von 8,5 Mio m<sup>3</sup> wird das Wasserwerk Kylltal ab einem Wasserstand von 302 mÜNN in der Riveristalsperre zugeschaltet (Entnahme zu 60% aus dem 1. Bauabschnitt, Entnahmeverteilung wie in der Reihe 1977-1987)



Simulationsfall 6 (100jährige Entnahmeganglinie im Anschluß an die Entnahmereihe 1977-1987):  
Bei einem Jahresbedarf von 8,5 Mio m<sup>3</sup> wird das Wasserwerk Kylltal ab einem Wasserstand von 302 mÜNN in der Riveristalsperre zugeschaltet (maximale Entnahme aus dem 1. Bauabschnitt, entsprechend der installierten Pumpleistung und dem gegebenen Wasserrecht)



# Vorbeugender Gewässerschutz!

## Perfluorierte Tenside in der Umwelt



### Informationen zum PFT-Skandal in NRW

Eher zufällig stießen Forscher vom Hygiene-Institut der Uni Bonn im Juni 2006 auf einen der bislang größten NRW-Umweltskandale: Sie untersuchten die Konzentration von schwer abbaubaren Schadstoffen entlang des Rheins und stellten dabei auf auffällig erhöhte Werte von perfluorierten Tensiden an der Mündung der Ruhr fest. Das Team um Harald Färber verfolgte die Spur flussaufwärts und fand mehrere Schadstoffquellen am Oberlauf der Möhne. Auch das

Trinkwasser und die Fische in Möhne, Ruhr und Rhein weisen gesundheitsschädlich hohe PFT-Konzentrationen auf. Inzwischen wurden in der Region etwa 1.000 PFT-Verdachtsflächen festgestellt; mindestens 15.400 Tonnen des als „Bodenhilfsstoff“ deklarierten Sondermülls der Firma GW Umwelt gelangten auf Feld, Wald und Wiese.

wasser von einem hoch belasteten Feld gefiltert. Kosten auch hier: 2,5 Millionen Euro. Beide Bereiche hatten hohe PFT-Mengen an die Möhne und damit auch die Ruhr abgegeben. Zeitweise mussten nach Bekanntwerden der hohen PFT-Belastung Wasserwerke abgestellt und Säuglinge und Schwangere in Arnsberg mit Mineralwasser versorgt werden.

<http://www1.wdr.de/themen/archiv/pftskandal100.html>

