

Modul 6 Grundwasserhydrologie

Teil 2 Grundwasserströmungsberechnung

8. Ablauf einer realen **Grundwassermodellierung im** **regionalen Maßstab**

Prof. Dr. Ralph Watzel

Regierungspräsidium Freiburg
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau
Albertstraße 5
79104 Freiburg im Breisgau
ralph.watzel@rpf.bwl.de

Regionale Grundwassermodellierung

- Aufgabenstellung sowie Projektlaufzeit und Projektressourcen sind festgelegt.
- Ein hydrogeologisches Konzeptmodelle liegt vor und ist hinreichend dokumentiert.
- Seine Daten sind in einem GIS und einer damit verknüpften Datenbank strukturiert abgelegt.
- Ein Rechencode wird ausgewählt, der den Anforderungen des hydrogeologischen Konzeptmodells (HKM) genügt.

Regionale Grundwassermodellierung

- Idealer Weise besitzt der Rechencode eine Benutzeroberfläche, die mit dem GIS über Schnittstellen verknüpfbar ist.
- Idealer Weise verfügen sie über Projekt-mittel für ergänzende Felduntersuchungen nach den ersten Modellschritten.
- Sie dokumentieren die weiteren Vorgehens-schritte und Ihre dabei anfallenden digitalen Daten!

Simulationscode und Prozessoren

- Das Lösen des Gleichungssystems erfolgt mit einem numerischen Simulationsprogramm.
- Geometrien, Randbedingungen und Parameter müssen in Eingabeformate des Simulators (Matrizen) übersetzt werden (Preprocessing).
- Die Ergebnisse in Ausgabeformaten des Simulators (Matrizen) müssen in „handhabbare“ Formen (Beispiele?) umgesetzt werden (Postprocessing).
- Effiziente Pre- und Postprocessing-Werkzeuge sind bedeutend für den ökonomischen Modellierungserfolg.

Modell-Design

- Das HKM wird in eine Form überführt, die sich numerisch modellieren lässt (digitale Inputformate des Simulators).
- Diese Schritte beinhalten:
 - Vorauswahl der Werte für die Aquiferparameter
 - Auswahl und Zuweisung der Anfangs- und Randbedingungen
 - Auswahl der Zeitschritte
 - Grid-Design, Mesh-Design

Modell-Design: Geologischer Rahmen

- Geologische Karten und Schnitte
- Topographische Karten mit Oberflächen-
gewässern und Wasserscheiden
- Isolinienkarten für Aquiferbasis und -
deckschichten bzw. für Zwischenhorizonte
- Mächtigkeitkarten für Aquifere und
Zwischenschichten (Isopachenkarten)
- lithologische Homogenitätsbereiche

Modell-Design: Hydrologischer Rahmen

- Grundwassergleichenpläne für alle (Teil)aquifere
- Grundwasser- und Oberflächengewässerganglinien
- Verteilung der Durchlässigkeit bzw. der Transmissivität und der Speicherkoeffizienten in allen Aquiferen und Zwischenschichten
- Grundwasserneubildung, Wechselwirkung Grund- und Oberflächenwasser, Grundwasserzu- und -abstrom, Grundwasserentnahmen und Quellschüttungen

Modell-Design: Randbedingungen

- Randbedingungen sind mathematische Ausdrücke, die den Wasseraustausch des Modellgebietes über seinen Rand beschreiben. Es existieren unterschiedliche Arten von Rändern.
- **Physikalische Ränder** sind an physikalischen Grenzen gebunden, an denen GWL gegen GWGL oder große Wasserreservoirare grenzen.
- **Hydraulische Ränder** beinhalten Grundwasserscheiden und Stromlinien.

Modell-Design: Randbedingungen

Typ 1: Festpotenzial- oder DIRICHLET-Rand

Anwendung wo?

Typ 2: Zu(Ab)fluss- oder NEUMANN-Rand

Anwendung wo?

Typ 3: Gemischter- oder CAUCHY-Rand

Anwendung wo?

Merke: Ränder immer soweit vom eigentlichen „Modellierungsproblem“ entfernt setzen, dass sie keine direkten Auswirkungen darauf haben.

Vorsicht mit Randbedingungen !

Typ 1: Festpotenzial- oder DIRICHLET-Rand

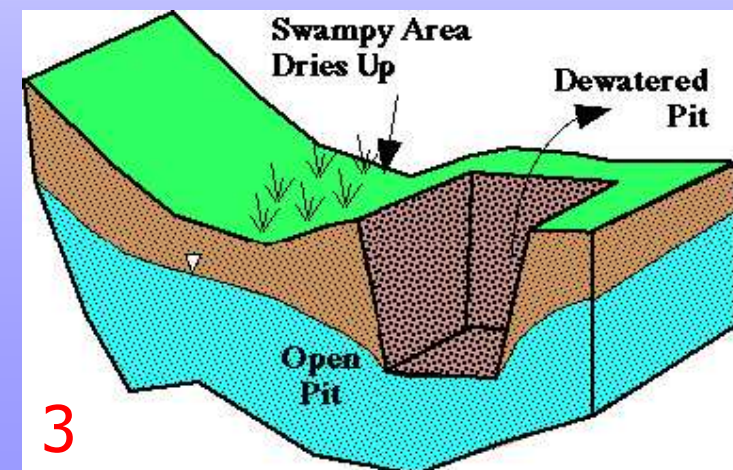
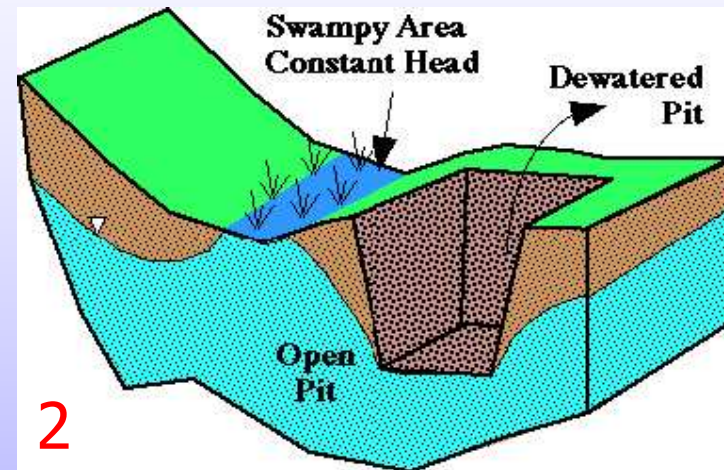
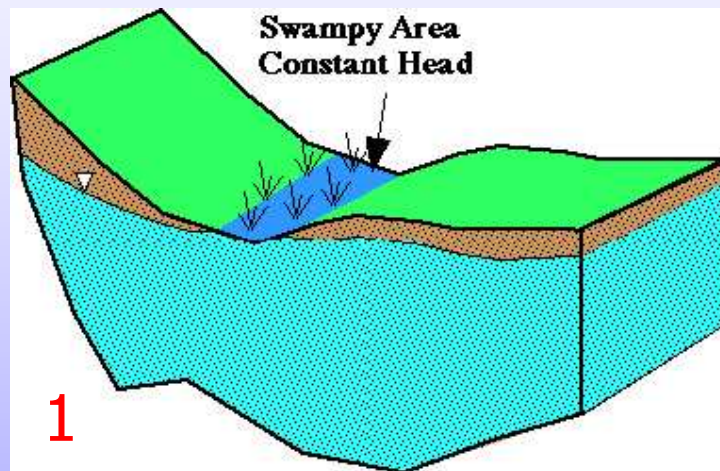
beschreiben den Wert einer hydraulischen Höhe,
definiert für bestimmte Orte und Zeiten (instationär)
oder

konstanten Wert einer hydraulische Höhe an einem
bestimmten Ort (stationär)

Annahme: Quellen sind unerschöpflich bzw. Senken
sind unauffüllbar

Vorsicht mit Festpotenzialrändern !

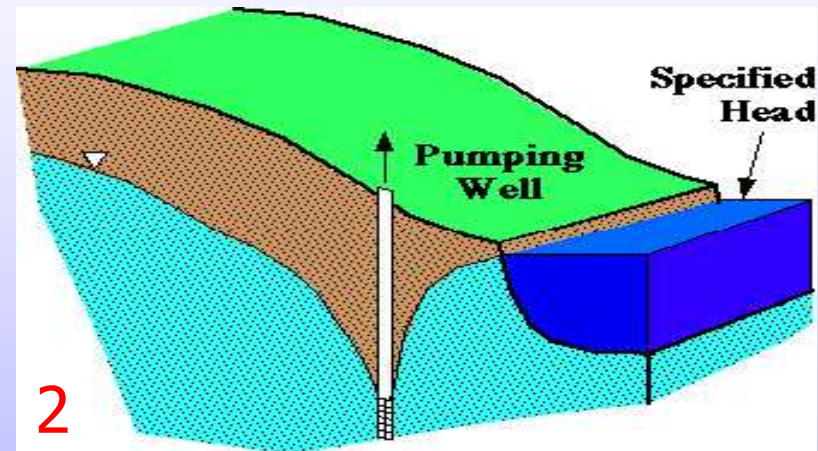
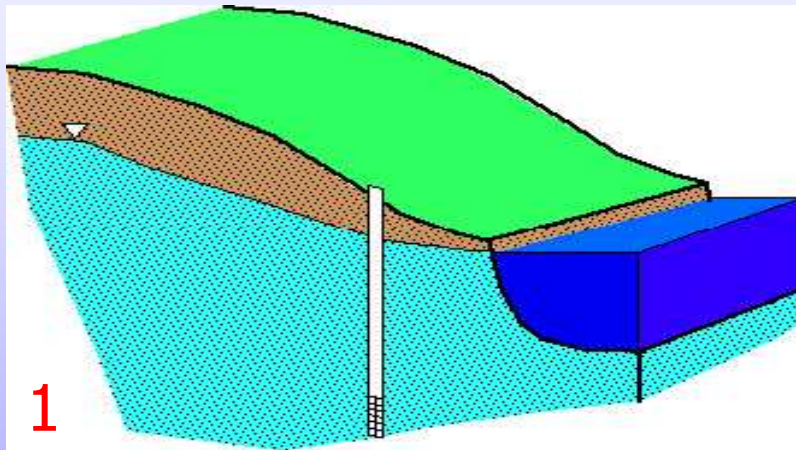
Wenn ein Festpotenzial verwendet wird, um an der Erdoberfläche einen Sumpf und in der Grube die Wasserhaltung zu simulieren, wird der Wasserfluss zwischen beiden überschätzt werden.



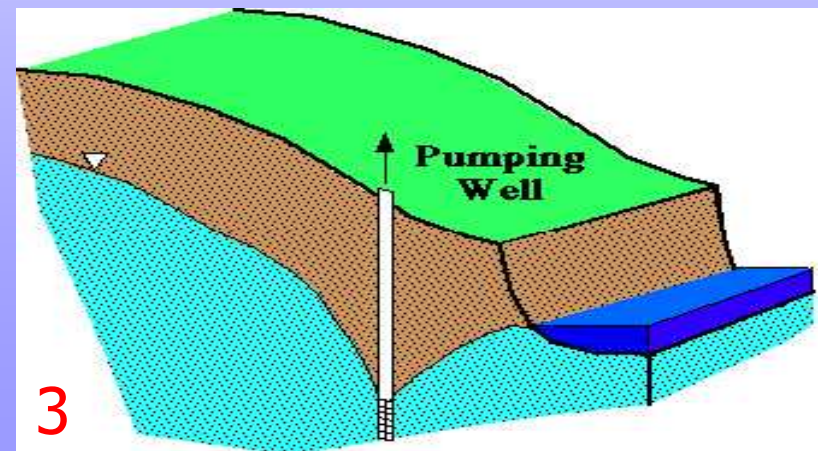
Die hydraulische Höhe im Sumpf wird „künstlich“ hochgehalten. Der Sumpf wird durch hohe Wasserstände erzeugt, er ist keine unendliche Wasserquelle. Zuflussrate am Festpotenzialrand verifizieren!

Vorsicht mit Festpotenzialrändern !

Brunnen am Fluss, der als Festpotenzialrand definiert ist, kann zu geringe Absenkung berechnen, da der Rand im Modell mehr Wasser „liefern“ kann als der Fluss tatsächlich führt .



Prüfen, ob der Wasserzustrom vom Fluss zum Brunnen tatsächlich geringer ist als der Abstrom im Fluss selbst und Wasserstände im Fluss überprüfen!



Vorsicht mit Randbedingungen !

Typ 2: Zu-/abfluss- oder NEUMANN-Rand

beschreiben den Wert eines (Wasser)massenstroms , definiert für bestimmte Orte und Zeiten (instationär) oder

den konstanten Wert eines (Wasser)massenstroms an einem bestimmten Ort (stationär) oder

keinen (Wasser)massenstrom über einen bestimmten Rand; undurchlässiger Rand

Vorsicht mit Randbedingungen !

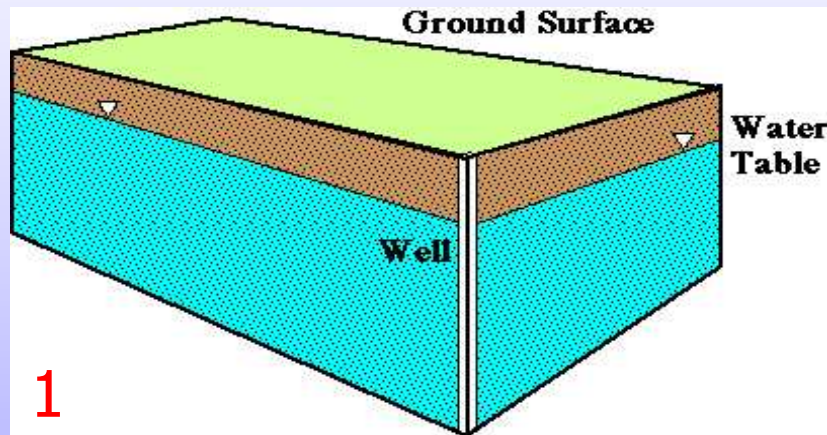
Typ 2: Zu-/abfluss- oder NEUMANN-Rand

Die hydraulische Höhe h wird berechnet als der Wert, der erforderlich ist, um eine Gradienten zu erzeugen, bei dem das zugegebene/entnommene Wasser bei der vorliegenden Durchlässigkeit ab- bzw. zufließt.

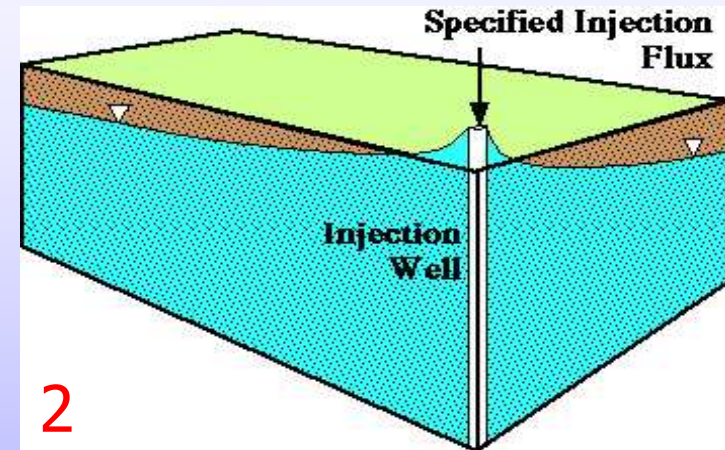
Die resultierende hydraulische Höhe kann theoretisch im ungespannten Aquifer über der Erdoberfläche oder unter der Aquifersohle liegen!

Vorsicht mit Zu-/abstromrändern !

In einem einfachen, ungespannten Aquifer werden Brunneninjektionen und Brunnenentnahmen als Randbedingung 2. Art definiert. Bei zu großer Injektion „läuft der Aquifer über“.

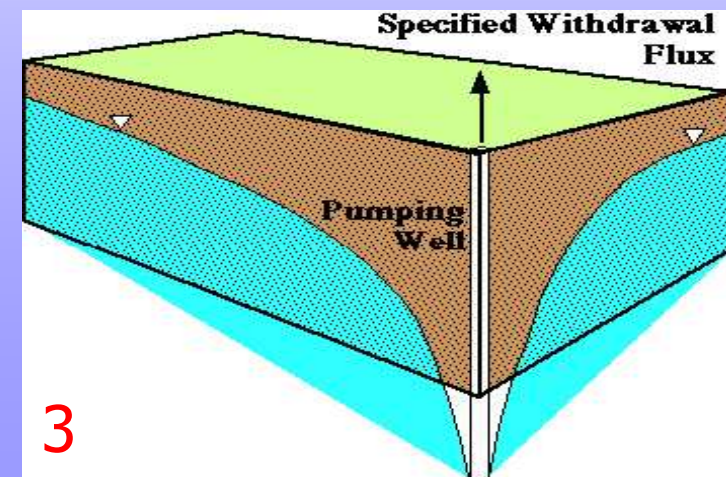


1



2

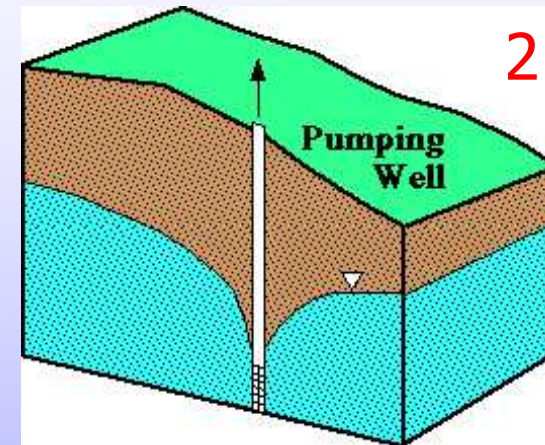
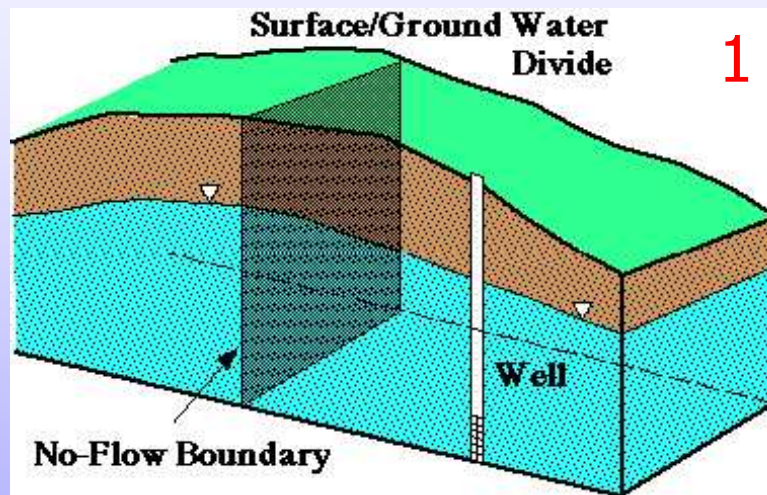
Bei zu großer Entnahme sinkt die hydraulische Höhe unter die Aquifersohle, der Aquifer „läuft leer“. Dies hängt auch von den übrigen Randbedingungen in dem Aquifer ab!



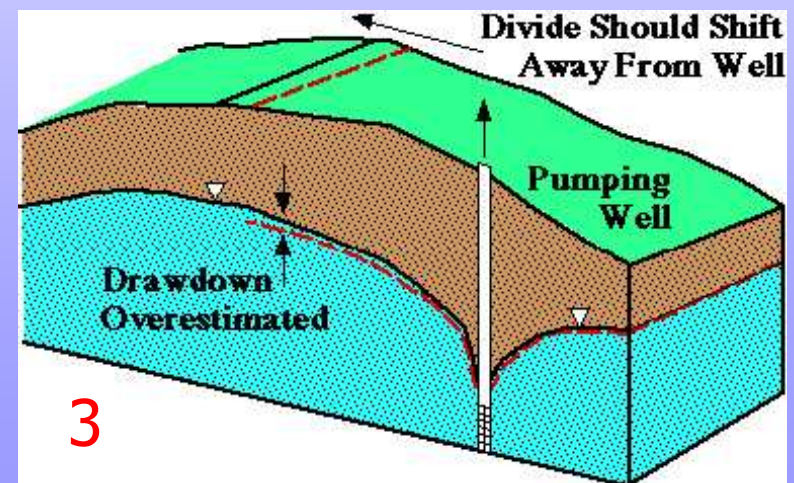
3

Vorsicht mit undurchlässigen Rändern !

Eine Grundwasserscheide wird als undurchlässiger Rand definiert. Eine benachbarte Brunnenentnahme erzeugt einen Absenktrichter - in der Realität - bis über die Wasserscheide hinaus.

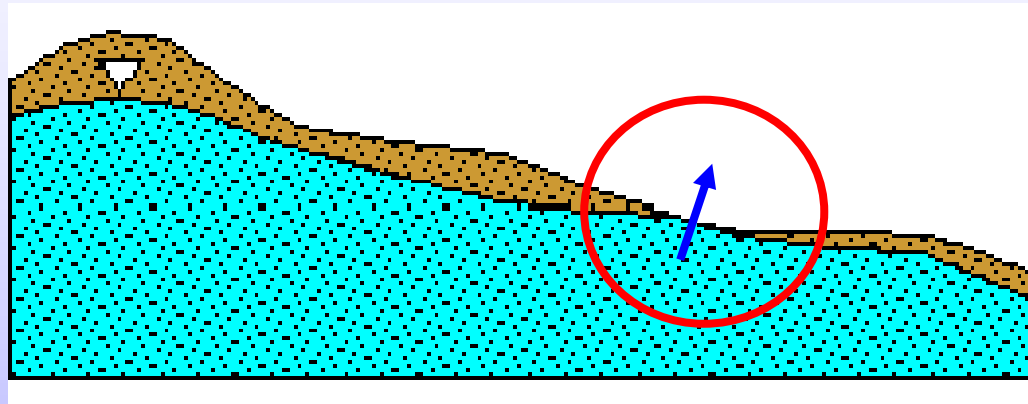


In der Realität würde sich die Wasserscheide verschieben. Im Modell begrenzt der Rand den Absenktrichter lateral und zu große Absenkungen werden berechnet.



Vorsicht mit freien Oberflächen !

Aquifer mit freier Oberfläche ohne Festlegung von Randbedingungen an der Erdoberfläche.



Die Geometrie des Fließfeldes kann natürlicher Weise variieren und damit auch die Transmissivität ($T = k_f \cdot h$) bzw. durch instationäre Vorgänge.

Wenn die hydraulische Höhe über die Erdoberfläche steigt, wird das Wasser in der Realität als Quelle oder Fluss aus dem Aquifer austreten. Das Modell kann dies aber mangels festgelegter Randbedingungen nicht repräsentieren.

Modell-Design: Netz

- Festlegung der Modellebenen (Ein-Schicht- oder Mehr-Schicht-Modell)
- Ausrichtung des Netzes (x, y und z Achsen sollten kollinear mit K_x , K_y und K_z sein)
- Auswahl der Maschenweite bzw. Knotendichte: Diskretisierungsdichte hängt von den Heterogenitäten des Aquifer(system)s und beim Transport von den Stabilitätskriterien ab. Feine Diskretisierung präzisiert das Ergebnis, bläht die Rechenzeit und Datenhandling jedoch auf!
- Tipp: zurückhaltend Diskretisieren!

Die zehn Gebote der Hydrogeologie

Dawn H. Garcia contributed the following "The Ten Hydro-geologic Commandments" from the *Directorate of Hydrogeology*, Department of Water Affairs and Forestry, Republic of South Africa, Newsletter, Vol. 2, No. 1, January, 1998.

- 1. Thou shall *not* assume isotropy, homogeneity, or uniform gradient without field evidence.**
- 2. Thou shall *not* assume wells or streams to penetrate fully or flow systems to be two dimensional.**
- 3. Thou shall *not* use regional data to make site-specific judgements.**
- 4. Thou shall *not* use color graphics to enhance lousy science.**
- 5. Thou shall *not* employ geo-statistics to obfuscate poor interpretations or weak conclusions.**
- 6. Thou shall *not* rely on stochastic methods to disguise insufficient field data.**
- 7. Thou shall *not* place geo-chemical interpretations above hydraulic interpretations.**
- 8. Thou shall *never* regard geophysics as the truth.**
- 9. Thou shall *never* use a contouring program to make a water-table map.**
- 10. Thou shall *never* use more than three significant digits.**

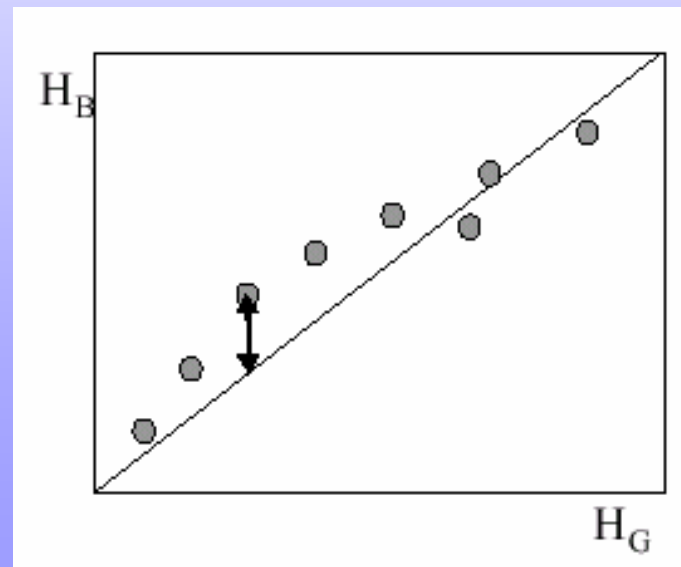
Modell-Kalibrierung

- Zweck der Modellkalibrierung (Eichung) ist die möglichst exakte Reproduktion von Feldmessungen durch das Modell.
- Kalibrierungsziel ist in der Regel ein Grundwasser-gleichenplan oder ein Satz von Grundwassergang-linien.
- Die Kalibrierung erfordert weitere Prüfkriterien:
 - Wasserbilanz für Teil- und Gesamtmodellraum
 - Verteilung von Grundwasserkomponenten
 - Grundwasserverweilzeiten, etc.

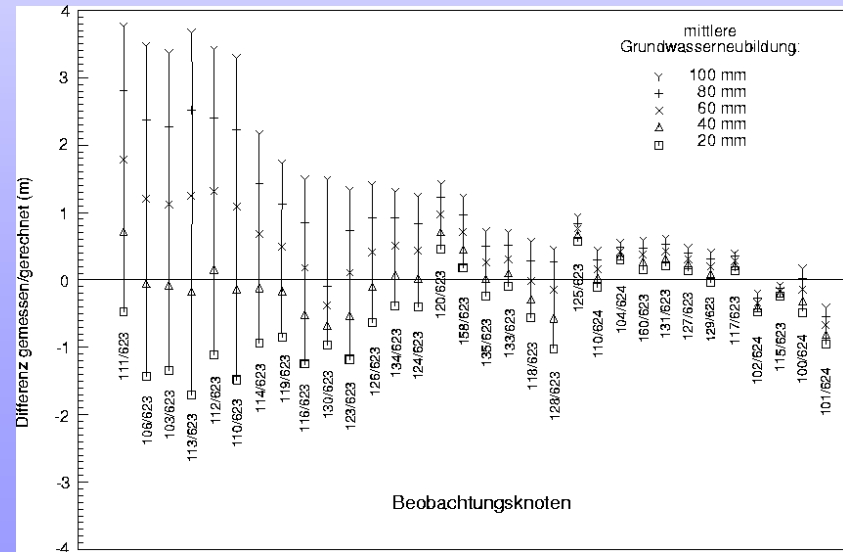
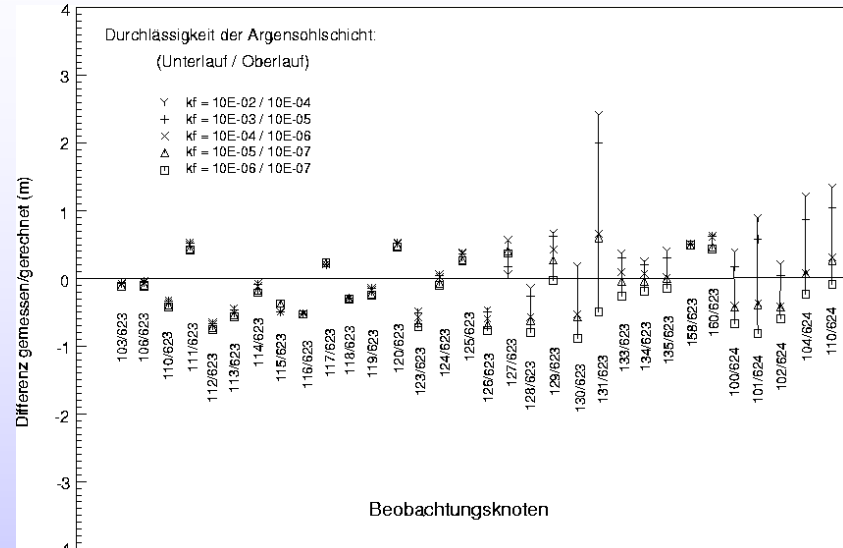
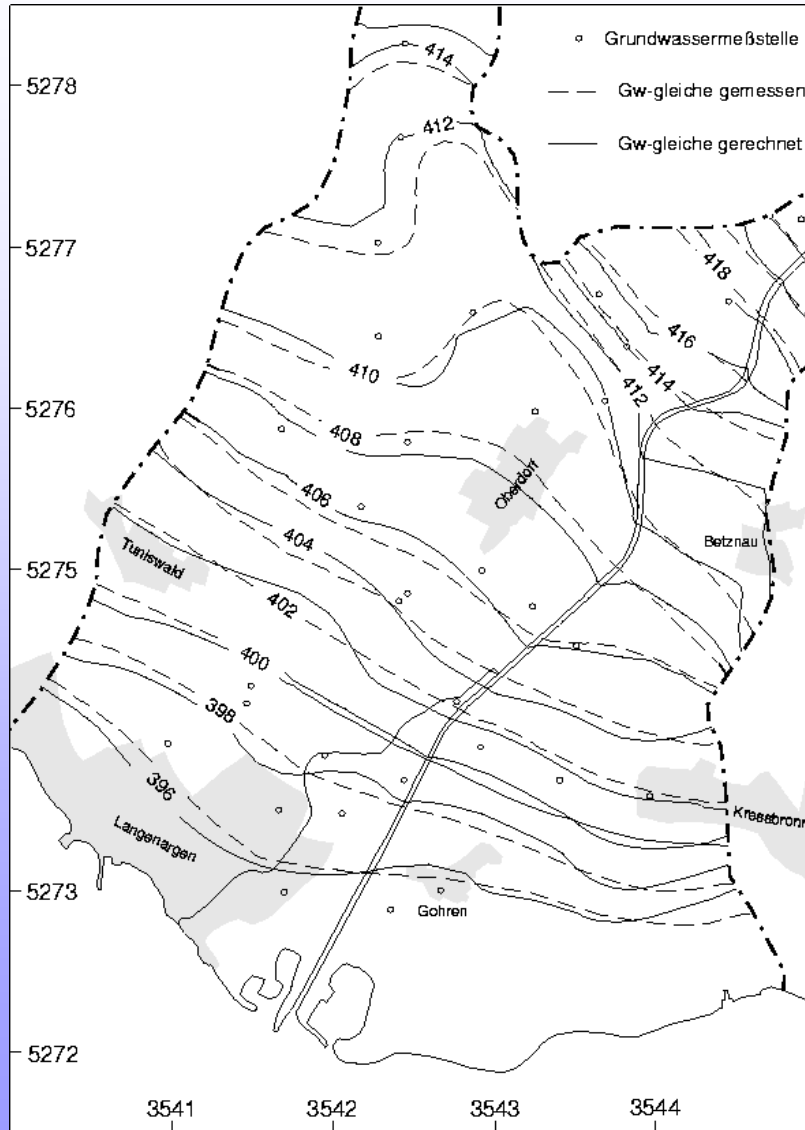
Modell-Kalibrierung

Trial-and-Error-Methode: initiale Parameter-werte werden zugewiesen; danach werden die Werte systematisch innerhalb eine realistischen Bandbreite variiert (Sensitivitätsanalyse) und so gewählt, dass die Differenz von gemessenen und berechneten $h_{i,j}$, $C_{i,j}$ minimal wird.

Cross-Plot:



Sensitivitätsanalyse Argendelta



Modell-Kalibrierung

Kalibrierungsgrößen sind:

- k_f - bzw. T-Wert-Verteilungen
- (spezifischer) Speicherkoeffizient-Verteilungen
- Verteilung der effektiven Porosität
- Leakage-Flüsse/Parameter an Rändern 3. Art
- hydrodyn. Dispersionskoeffizienten, Dispersivitäten
- Retardationsfaktor, etc.
- Problem: Grundwassermodelle haben keine eindeutige Lösung, sondern prinzipiell unendlich viele!

Inverse Modell-Kalibrierung

Automatische oder Inverse Kalibrierung:

- Minimale $h_{i,j}$ -, $C_{i,j}$ -Werte durch Variation der Kalibrierungsgrößen wird mittels eines Rechenalgorithmus` erzielt (MODINV, PEST).
- Zielfunktion sind gemessene h - und/oder C -Werte und Angaben zur räumlichen Verteilung der Kalibrierungsgrößen.
- Auch bei inverser Kalibrierung vorab die Sensitivität des Modells für einzelne Parameter prüfen.

Inverse Modell-Kalibrierung

Probleme der Inversen Kalibrierung:

- k_f -Werte sind auch Messdaten (Pumpversuche)
- Ist das Ergebnis sinnvoll ?
- Ist das erzielte Ergebnis „wahrer“, selbst wenn die Standardabweichung der Schätzung besser ist ?
- Empfehlung: Simulationsergebnisse mit anderen hydrogeologischen Feldbeobachtungen vergleichen, ggf. Transportmodell aufsetzen.

Modell-Verifikation

- Aufgrund der Parameter-Unschärfen bei der Kalibrierung, repräsentiert auch ein „geeichter“ Datensatz die reale Welt nur näherungsweise.
- Konsequenter Weise kann er das System unter veränderten Randbedingungen nicht zwingend präzise beschreiben.
- Als Modellverifikation versteht man die Simulation von gemessenen hydraulischen Stress-Zuständen, die von denen der Kalibrierung abweichen.
- Typisch: veränderte Brunnenentnahmen oder schwankende Standrohrspiegelhöhen (Ganglinien).

Modell-Verifikation

Streng genommen ist eine Verifizierung eines numerischen Modells nicht möglich. Folgende Prüfungen sind möglich.

- Vergleich analytisches vs. numerisches Modell
- Vergleich mit anderen numerischen Modellen
- Ist das Ergebnis plausibel ?
- Gilt DARCY tatsächlich im Betrachtungsraum?
(Kluft- und Karstgrundwasserleiter)

Parameter-Unschärfe

- Wesentliches Problem Parameterunschärfe:
Parameter und ihre Verteilung sind aufgrund der Heterogenitäten in der Natur nur näherungsweise genau zu ermitteln!
- Handling-Möglichkeiten:
 - hinreichende hydrogeologische Erkundung
 - Szenariotechnik
 - Stochastische Modellierung
 - Unschärfe bei der Interpretation und Anwendung "im Kopf" behalten

Modell-Prognosen

- Bei einer Modell-Prognose werden die bei Kalibrierung und Verifizierung gefundenen Parameter benutzt, um die Reaktion des Systems auf zukünftige Gegebenheiten vorauszusagen.
- Eine wichtige Aufgabe ist dabei die realistische Abschätzung von zukünftigen Randbedingungen.
- Die Vertrauenswürdigkeit der Prognosen hängt ganz wesentlich von Ergebnissen und Qualität der hydrogeologischen Felduntersuchung, Modellkonzeption, Sensitivitätsanalyse, Kalibrierung und Verifizierung ab.

Postaudit

- Ein Postaudit wird einige Jahre nach der Modellierungsstudie durchgeführt. Neue Feldbeobachtungen belegen, ob die Prognosen eingetroffen sind oder nicht. Wenn die Prognosen eingetroffen sind, spricht man von einem validierten Modell.
- Ein Postaudit sollte mit ausreichendem zeitlichen Abstand erfolgen, so dass dem System ausreichend Zeit verbleibt, signifikante Veränderungen zu zeigen.
- Beispiel: Modelle bei der Bebauung des Potsdamer Platzes in Berlin, Singener Becken (Broschüre)

Fazit

- Auch das „beste Modell“ ist immer noch ein Spielzeugauto.
- Es gibt aber keine vergleichbare Alternative.
- Auch am Ende des „besten Modells“ empfehlen sie weitere Feldbeobachtungen zu Kontrolle.
- Das Modell macht die Feldbeobachtungen nicht überflüssig, sondern hilft, diese nach Ort und Zeit zu optimieren!