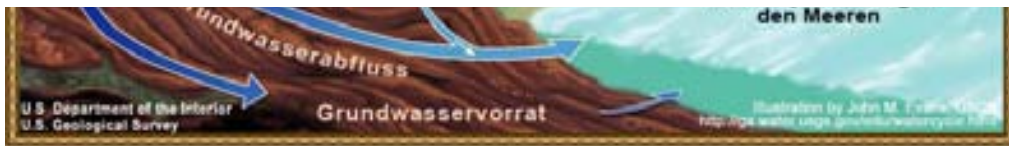




Vorlesung: Hydrologische Modellierung

Hydrologische Modellierung (im humiden Raum)



Dresden, 08.05.2015

Agnes Sachse^{1, 2}

¹Helmholtz Centre for Environmental Research – UFZ, Department of Environmental Informatics, Leipzig
² TU Dresden, Applied Environmental System Analysis, Dresden



heute: hydrologische Modellierung (im humiden Raum)

- wissenschaftliche Fragestellungen
- Lösungen? (Herangehensweise, Werkzeuge)
- Fallbeispiele (Kurzporträt)
- Ammer-Einzugsgebiet



Wissenschaftliche Fragestellungen

- 1 What is the universe made of?
- 2 How did life begin?
- 3 Are we alone in the universe?
- 4 What makes us human?
- 5 What is consciousness?
- 6 Why do we dream?
- 7 Why is there stuff?
- 8 Are there other universes?
- 9 Where do we put all the carbon?
- 10 How do we get more energy from the sun?



- 11 What's so weird about prime numbers?
- 12 How do we beat bacteria?
- 13 Can computers keep getting faster?
- 14 Will we ever cure cancer?
- 15 When can I have a robot butler?
- 16 What's at the bottom of the ocean?
- 17 What's at the bottom of a black hole?
- 18 Can we live for ever?
- 19 How do we solve the population problem?
- 20 Is time travel possible?

<http://www.theguardian.com/science/2013/sep/01/20-big-questions-in-science>

Wissenschaftliche Fragestellungen in der Hydrologie und Hydrogeologie



Interaction of hydrological parameters

discharge

forecast

water management

droughts

Human activities



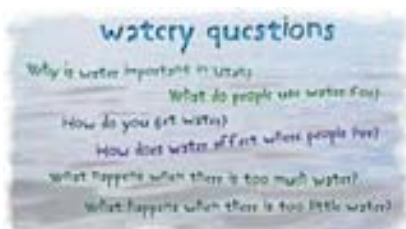
floods

stream network



Climate change

contamination



groundwater

Catchment analysis

variations in precipitation

evapotranspiration

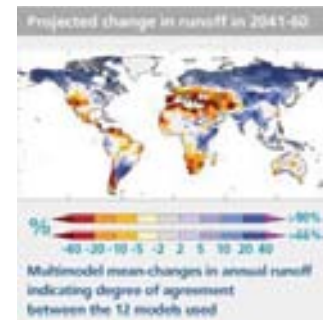
Wie können diese Fragestellungen gelöst werden?

- Herausforderungen in hydrologischen und hydrogeologischen Systemen
- Tools für die Lösung wiss. Fragestellungen
 -
 -
 -
 -
- Kurzporträt: Fallstudien
- Ammer-Einzugsgebiet

Herausforderungen in hydrologischen und hydrogeologischen Systemen

Klimawandel

- globaler Temperaturanstieg von ° C (Abflussmuster, Schneeschmelze, Wasserqualität, Verdunstung)
 - Veränderung der Niederschlagsmuster (.....)
 - Anstieg des Meeresspiegels (.....)
- Frage: Wasserverfügbarkeit: wie variieren die Wasserflüsse auf Einzugsgebietsebene in bezug auf das globale Klimageschehen?



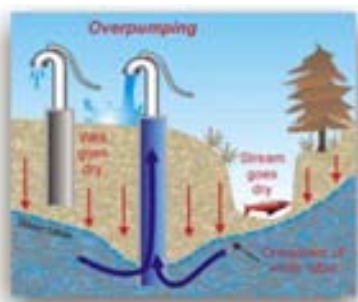
IAHS: Panta Rei-Project formulated:

1. What are the key gaps in our understanding of hydrologic change?
2. How do changes in hydrological systems interact with and feedback on natural and social systems driven by hydrological processes?
3. What are the boundaries of coupled hydrological and societal systems? What are the external drivers and internal system properties of change? How can boundary conditions be defined for the future?
4. How can we use improved knowledge of coupled hydrological-social systems to improve model predictions, including estimation of predictive uncertainty and assessment of predictability?.....

Wasserknappheit



Source: United Nations



Source: globalmapper.com



Source: maharlikafilms.com

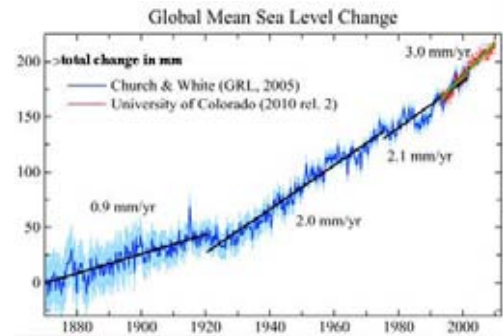
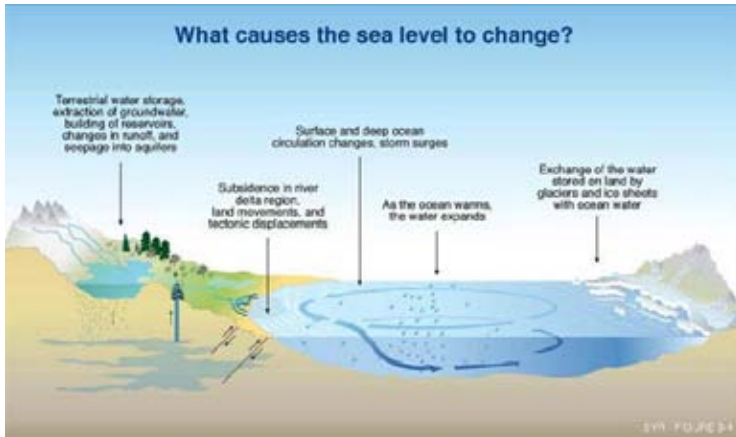


Source: amazon.de

Meeresspiegelanstieg

U.S. Climate Change Science Program (Januar 2009):

- "steigende Meeresspiegel führen zu Überflutung niedrig liegender Landbereiche, Küstenerosion, Umwandlung von Feuchtgebieten zu offenen Wasserflächen, Verschärfung von küstennahen Hochwässern und Versalzung von Flussmündungen und Süßwasseraquiferen."
- betreffende Städte:



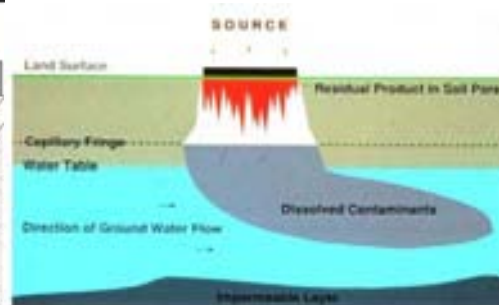
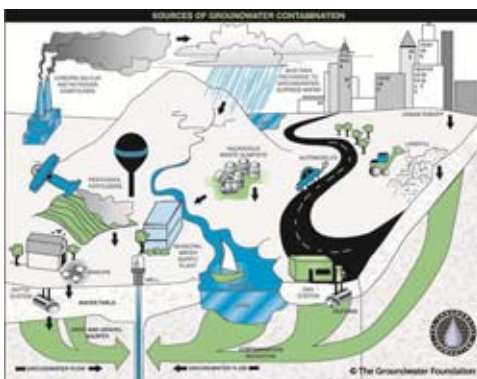
Source: worldviewofglobalwarming.org

Source: courses.washington.edu

Verschmutzung von Oberflächen- und -Grundwasser

Grundwasserkontamination:

- anthropogene Ursachen: Kontamination des Grundwassers durch
- Transport von toxischen Materialien / Flüssigkeiten durch Bodenzone
 - z.B.
 - ebenso: unbehandelte Abfälle aus Klärgruben und giftige Chemikalien aus unterirdischen Lagertanks + undichten Deponien



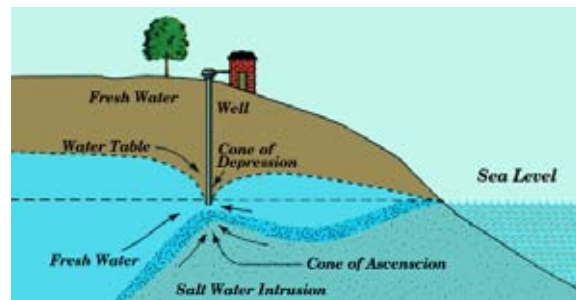
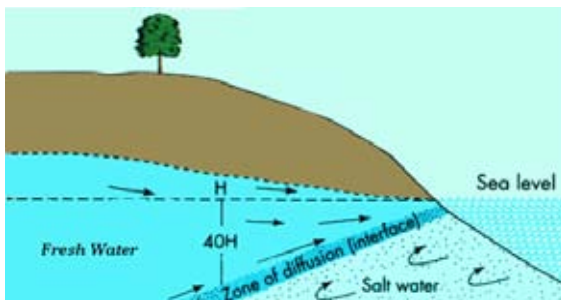
Source: wesleyan.edu

Source: britannica.com

Salzintrusion

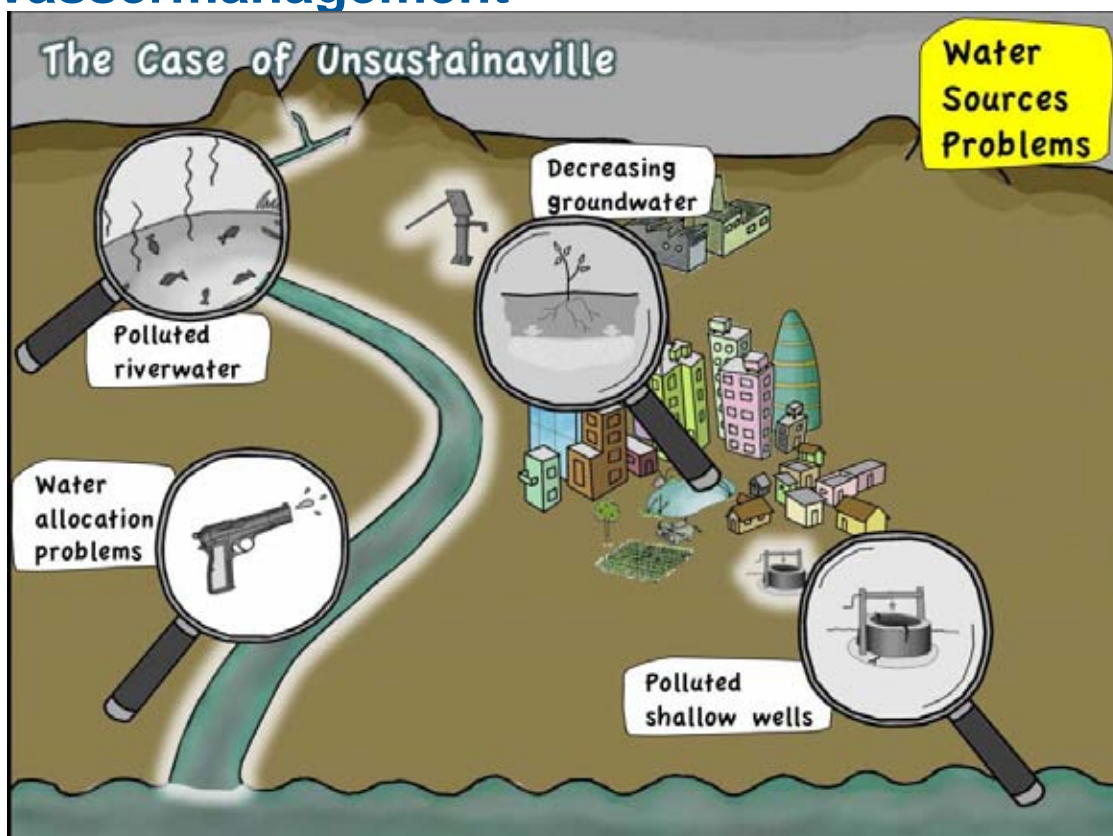
Eindringen von Meerwasser:

- Meerwasser gelangt entweder durch natürlichen oder anthropogenen Einfluss in Süßwasseraquifer
- verursacht durch
- Intrusion kann Wasserqualität beeinflussen, umfangreiche Beeinflussung des Aquifersystems



Source: lenntech.com

Wassermanagement



Was sind Werkzeuge zur Lösung wiss. Fragestellungen?

Systemanalyse

- Feldarbeit
- Experimente

Datensammlung

Datenanalyse

- ...
-

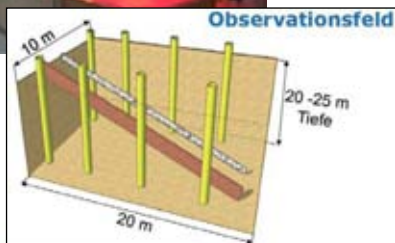
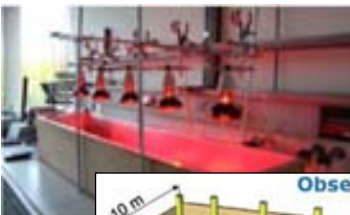
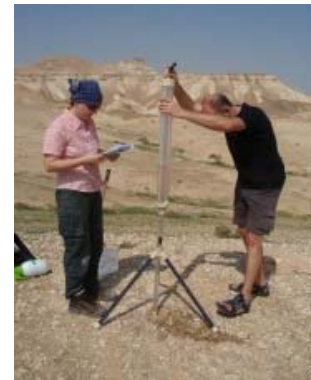
Konzeptionelles Modell

- vereinfachtes Modell

Numerisches Modell

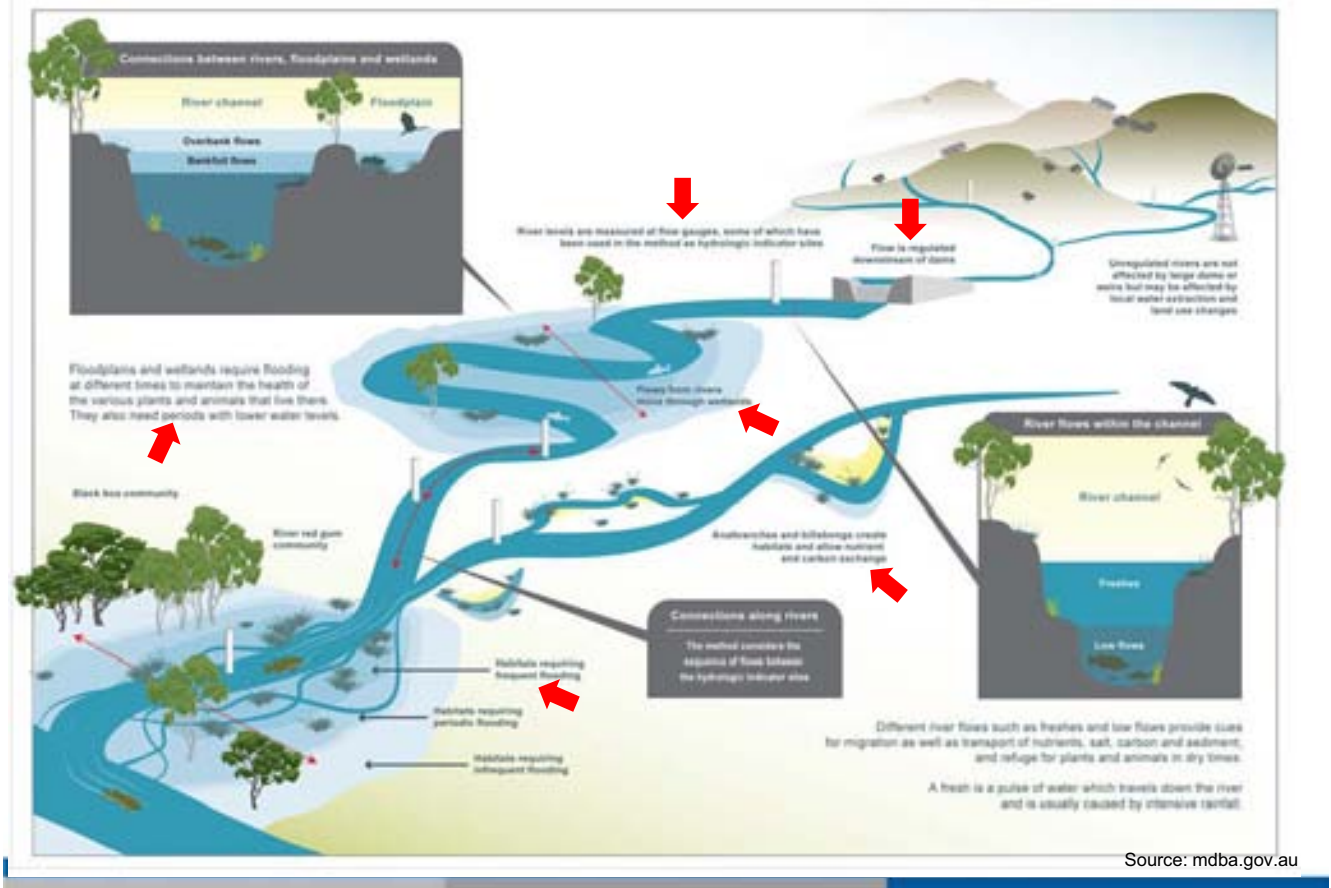
- mathematische Modellierung
 - analytische Methode:.....
 - systematische Methode:

Feldarbeiten + Experimente



Photos + Figures: C. Siebert, A. Meier, A. Sachse

Flußgebietsanalyse

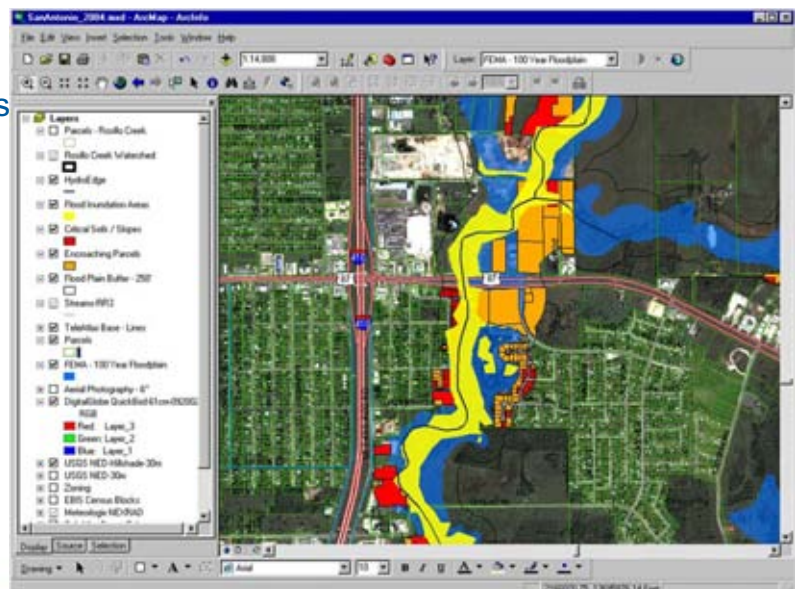


Systemanalyse

- hydrologische Parameter (räumliche / zeitliche Verteilung)
- Interaktionen der Parameter
- Prozesse
- Einzugsgebietsanalyse

→ Geographisches Informationssystem

z.B. ArcGIS



Source: esri.com

erweitertes Verständnis hydrologischer Prozesse



Source: earthobservatory.nasa.gov

Komplexes System: Hydrologisches + Hydrogeologisches System I

z.B. Gerinne: Ablaufgerinne, wird gespeist von:

-
- Oberflächenabfluss
-
- Grundwasserzufluß innerhalb Flusssystem (.....) → Modell des linearen Einzelspeichers

Zur mathematischen Beschreibung und Simulation von Wasserflüssen / Strömungen wird Folgendes benötigt:

- Gleichungssystem
- (z.B. Wasserbilanz, Massenbilanz)
- Formulierung von
- Lösungsansatz für Differentialgleichungen (analytisch oder numerisch)

Komplexes System: Hydrologisches + Hydrogeologisches System II

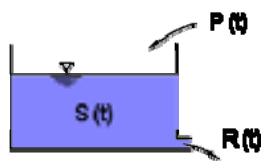
Zusammenstellung und Lösung dieser Gleichungen ist Voraussetzung für mathematische Strömungs- und Stofftransport-Modellierung

→ Modell des Einzel-Linear-Speichers

Die lineare Beziehung zwischen Speicher (S) und Abfluß (R) kann vereinfacht beschrieben werden:

- Speicher (S) und Abfluß (R) sind
- Speicherkoeffizient (k) ist

Komplexes System: Hydrologisches + Hydrogeologisches System III



S(t): Speichereinhalt
P(t): Niederschlag
R(t): Abfluss
k(t): Speicherkonstante

Ansatz des linearen Einzelspeichers: = fiktiver Speicher, bei dem der Abfluss zum Speichereinhalt ist

$$S(t) = k \cdot R(t)$$

Für den linearen Speicher gilt jederzeit die Kontinuitätsbeziehung:

$$P(t) = R(t) + dS/dt$$

input = output + change in storage

Differentialgleichung: $P(t) = R(t) + k \frac{dR(t)}{dt}$

allgemeine Lösung: $R(t) = R(t_0) \cdot e^{-\frac{(t-t_0)}{k}} + \int_{t_0}^t P(\tau) \cdot \frac{1}{k} \cdot e^{-\frac{t-\tau}{k}} d\tau$

Der erste Term beschreibt, beginnend bei t_0 und ohne Abfluss, d. h. $P(\tau > t_0) = 0$. Der zweite Term berücksichtigt den Abfluss.

Mathematische Modellklassifikationen I

a) vom Standpunkt der Systems gibt es folgende 2 Modelle:

- stationäres System (.....)
- dynamisches System (.....)

→ Aquifer: input + output sind konstant (mittlere mehrjährige Perkolations bzw. mittlere Entnahmemengen durch Wasserwerk)

→ stationäres Modell: ermöglicht Bestimmung des hydraulischen Potentials des Aquifers, unabhängig von der Zeit

Mathematische Modellklassifikationen II

b) bei Beachtung des mathematischen Charakters von Modellformulierungen:

- lineare Modelle
- nicht-lineare Modelle

→ Natur: meist

→ Modellstudien: lineare Beziehung zwischen Variablen wird akzeptiert

Mathematische Modellklassifikationen III

c) bezüglich Zeitfaktor:

- diskrete Modelle
- kontinuierliche Modelle (Zeitreihen)

→ dabei hängt Auflösung der Zeitachse vomab (Hochwasser: Minuten – Stunden; Aquifer: Tage-Jahre)

Mathematische Modellklassifikationen IV

d) je nach Grad der Kenntnis des analysierten System:

- physikalisch basierte Modelle (.....);
- Bilanz- Modelle:
 - input-output Modell (.....)
 - konzeptionelle Modelle (.....)

Mathematische Modellklassifikationen V

e) je nach Grad der Parameter-Variabilität:

- Modell mit Global-Parametern (.....)
- Modelle mit zeitlich/räumlich veränderlichen Parametern

→ global: jederzeit Ein- und Ausgangsparameter, Zustandsvariablen etc., z.B. Homogenität des Systems

→ räumlich/ zeitlich diskretisiert: Parametern, z.B. unbekannte Systemstruktur oder innere Systemzustände nicht messbar / nicht vorhanden / nicht von Interesse



Mathematische Modellklassifikationen VI

f) Hydrologische Modelle können auch nach:

- deterministische Modelle:

.....
.....

- stochastische (oder Wahrscheinlichkeits-) Modelle:

.....
.....



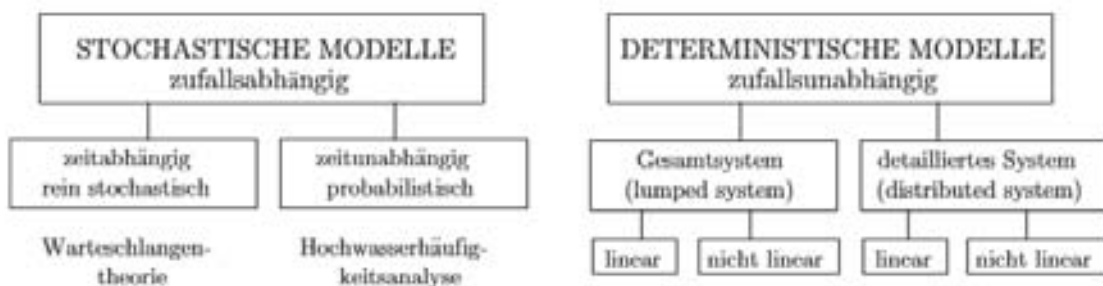
Mathematische Modellklassifikationen VI

deterministisches Modell:

- Input (bereits bekannt) produziert immer den gleichen Output
- Beziehung zwischen Input und output kann durchbeschrieben werden

Stochastische Modelle können untergliedert werden in:

-
- Regressionsmodelle
-
- Modelle mit zufälligen Koeffizienten
-



Catchment Hydrology – Modelldiskretisierung

Kleinskalige-Einzugsgebiete:

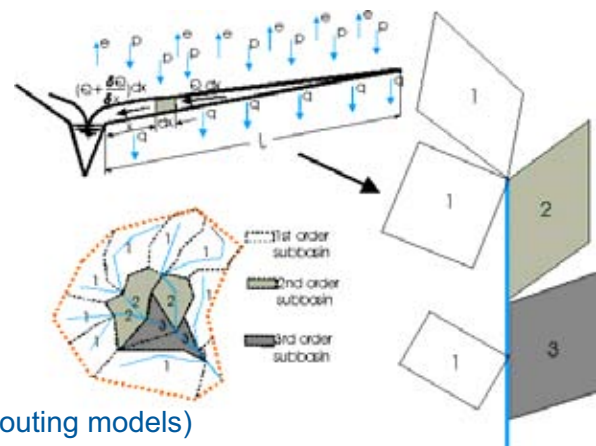
- z.B. Bestimmung des maximalen Abflussvolumen einer Flutwelle
→ z.B. SHE Model (Système Hydrologique Européen, Institute of Hydrology – Wallingford, UK): Evapotranspiration, Schneeschmelze,... mit den mathematischen Modellen: Penman-Monteith, Richards Gleichung
- Modell der kinematischen Welle

Mittlere Einzugsgebiete:

-
-

Großskalige Einzugsgebietsmodellierung:

- Einzugsgebiet mit Unter-Einzugsgebieten (flood routing models)



Scheme of the kinematic wave model (Source: epfl.ch)

Welche Modellierungswerkzeuge sind bekannt?

Hydrologische Modelle:

- seit 1960er Jahren exponentieller Anstieg verfügbarer Modelle (Nemec, 1993)

Abflussmodell (empirisch):

- curve-number-Verfahren:
- Abfluss-Modell (Reservoir): beschreibt Niederschlag-Abfluss Beziehungen nach dem Konzept eines (nicht) linearen Speichers: z.B. Vflow (commercial)

Transportmodellierung:

- Strömung + Routing innerhalb eines Fluß/Fließgewässer-systems + Transport gelöster und ungelöster Stoffe im porösen Medium + Fluß/Fließgewässer: z.B.

Verbundmodelle (modular):

- Kombination/Kopplung verschiedener Modelle, z.B. MIKE SHE oder WEAP (Kopplung aus Oberflächen-und Grundwassermodellen)

Beispiele für weitere hydrologische Modelle:

-
-
-
-
-



Hydrologische Modelle

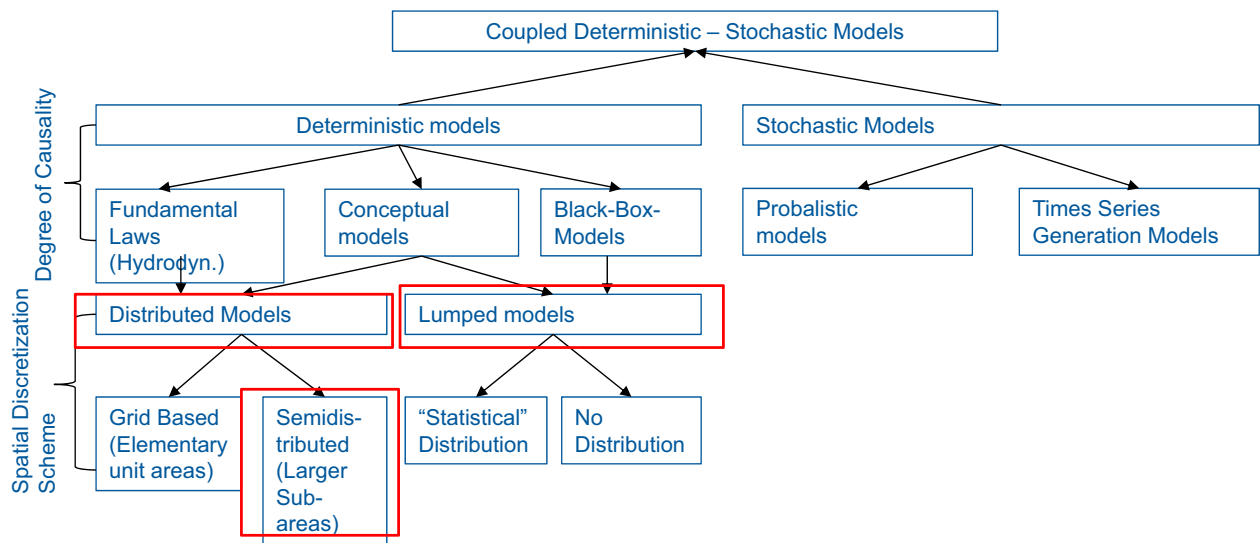
anwendungsbezogene Modelltypen:

- Echtzeit - Modelle
- Vorhersagemodelle (.....)
- Planung und Design (.....)
- weitere Zwecke (.....)

Hydrologische System-Typen:

- Elementare Systeme:
 - Hydrotop
 -
 - Flusslauf
 - Speicher oder Seen
- Komplexe (oder gekoppelte Systeme):
 - Oberflächenmodelle (mit mehreren Flussläufen,...)
 - Einzugsgebiete

Klassifikation hydrologischer Modelle I



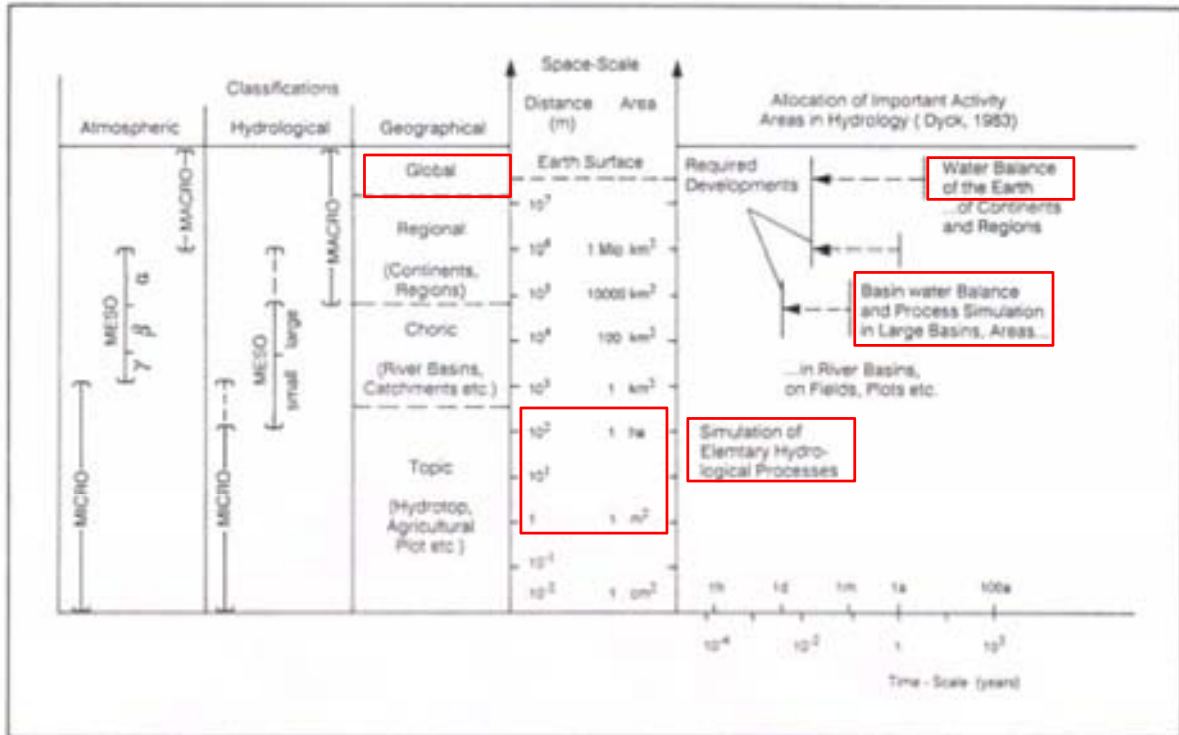
Klassifizierung von hydrologischen Modellen in Bezug auf Anwendungszweck, der Grad der Kausalität und angewandte räumliche Diskretisierung (Nemec, 1993)

Klassifikation hydrologischer Modelle II

Model category	Main fields of application	Advantages	Special requirements and problems
Distributed, grid-based and physically based (IG)	<p>Detailed investigation of hydrological processes, including erosion, matter transport, water quality in their real areal distribution</p> <p>Study and prediction of effects of human activities, i.e. of land-use practices and changes (small or larger scale) on the hydrological regime and water resources</p>	<p>Application of fundamental laws of hydro- and thermodynamics, etc.</p> <p>Applicability to gauged or ungauged basins or areas</p> <p>Model parameters are identical with prototype characteristics</p> <p>Direct useability of available areal information, e.g. remote-sensing information (satellite images, etc.)</p>	<p>Enormous effort in model development and operation</p> <p>Large amount of required input data (basin characteristics, system inputs, etc.)</p> <p>Problems in assessing areal interactions, feedbacks, etc.</p> <p>Demand for high-capacity computers</p> <p>Difficult to operate</p>
Semi-distributed, physically-based or conceptual (IS)	<p>As above, but for larger-scale investigations</p> <p>Real-time hydrological forecasting</p>	<p>Use of larger sub-areas as elementary modelling units</p> <p>Applicability to gauged or ungauged basins or areas</p> <p>Some parameters are identical with others, others are related to prototype characteristics</p> <p>Relatively easy to understand and user-friendly in application</p> <p>Acceptable amount of input data for model calibration and operation on small computers</p>	<p>Limited possibilities of applying fundamental laws of hydro- and thermodynamics</p> <p>Derivation of several parameters by empirical relations of regionalization</p> <p>Limited areal resolution, i.e. not useable for small-scale investigations</p>
Lumped conceptual or black box (LS, LB)	<p>Extrapolation of time series and "quick", approximate predictions of basin discharge</p> <p>Real-time hydrological forecasting</p>	<p>Easy to understand and to operate, even on small computers</p> <p>Small amount required input data</p>	<p>Very limited range of application (only gauged basins)</p> <p>Possibly beyond the limits defined by the calibration</p>

Allgemeine Merkmale und Anwendungsfelder der hydrologischen Modelle für Flusseinzugsgebiete und andere Landflächen

Skalen in hydrologischen Modellen



Classification of scales and allocation of important activities areas in hydrology

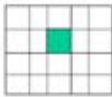
Nemec, 1993


Dimensionen und räumliche Diskretisierung


1D:

2D:

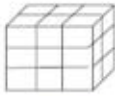
Discretisation methods (2D)

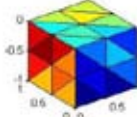
Finite differences  Balance of box


Finite elements  Balance over patch

Finite volumes  Balance over FV

Discretisation methods (3D)

Finite differences  Balance of box

Finite elements  Balance over patch

Finite volumes  Balance over FV

Kinzelbach, 2013

Daten für 3D Modelle und Datenquellen

- Punktdaten:
- Flächendaten:
- Zeitreihen
- indirekte Daten: Daten, aus denen relevante Daten durch Korrelation oder Modellierung berechnet werden können (z. B. Umwelttracerdaten,

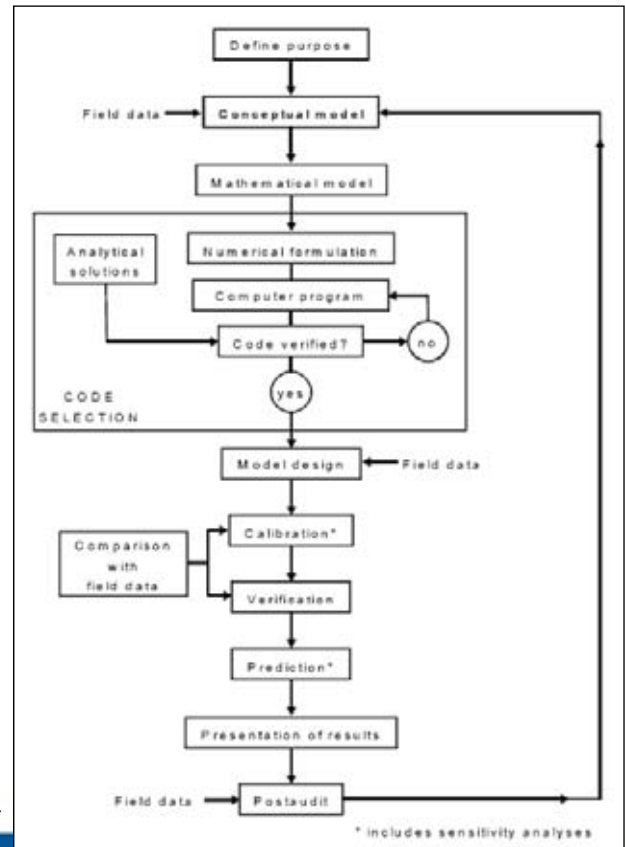
Name	Data type	Aquifer type	Available data
<u>Aquifer data:</u>			
Layer top/bottom elevation	s	u	geological sections
hydr. conductivity	s	u	pumping test data
transmissivity	s	c	pumping test data
storage coefficient	s	c	pumping test data
Specific yield	s	u	pumping test data
<u>Hydrological data:</u>			
recharge from precipitation	s, t	u, c	climate data, lysimeter data
abstractions/injections	s, t	u, c	records from pumping wells
<u>Exchange with surface waters:</u>			
river bottom elevation	s	u, c	topographic maps
river water level	s	u, c	gauge data
leakage factors	s	u, c	--
<u>Boundary conditions:</u>			
prescribed heads	s, t	u, c	observation well data
boundary fluxes	s, t	u, c	--
<u>Calibration and validation:</u>			
piezometric heads or groundwater tables	s, t	u, c	observation well data
Spring/drainage flow			Flow data

Model data: s spatial, t temporal, u unconfined, c confined
(Kinzelbach, 2013)

Herangehensweise in der hydrologischen Modellierung

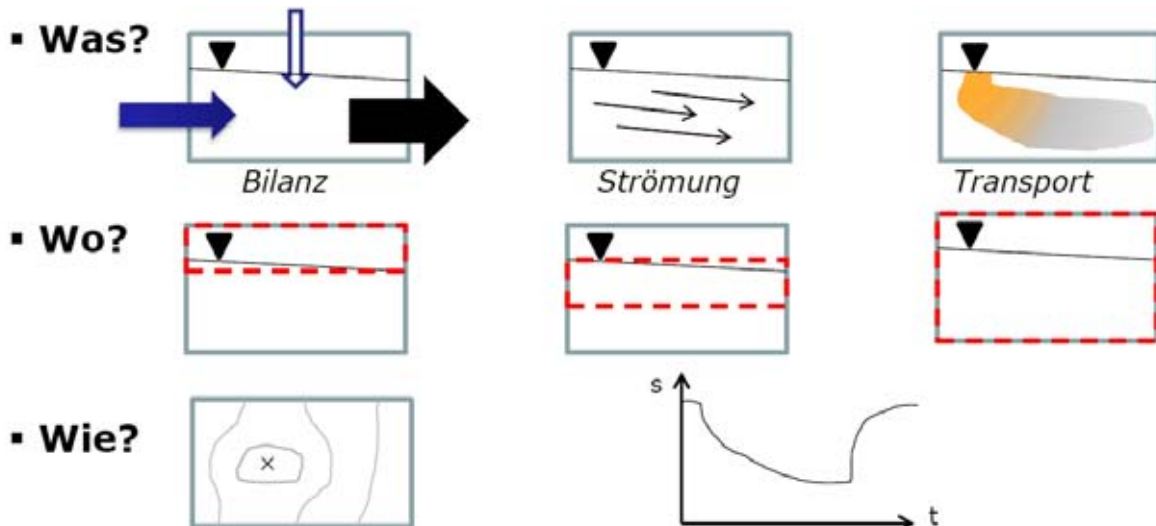
Arbeitsplan der (hydrologischen) Modellierung

- 1)
- 2)
- 3)
- 4)
- 5)
- 6)



Quelle: M. Walther

Problemanalyse



Wasserentnahme / Isohypsen Wasserentnahme / Absenkungsverlauf

- Datenlage
- Nach Notwendigkeit und Verhältnismäßigkeit eingrenzen
- Vorhandene Informationen / Defizite?

Quelle: M. Walther, T. Reimann, TU Dresden

Problemanalyse

Raumdimensionen:

.....

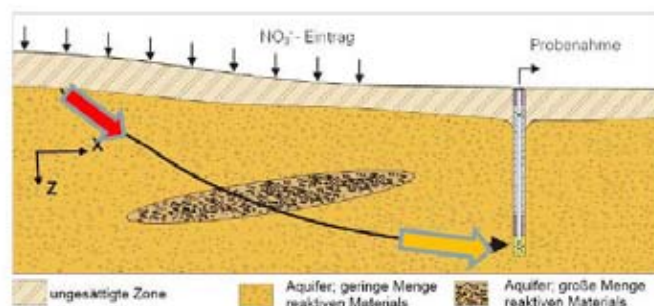
zusätzlicher Aufwand für weitere Dimensionen beträchtlich!

- deshalb: Fragestellung beachten
- Realität ist 3D --- 1D/2D begründen, z.B. mit
 - Aufgabenstellung / Notwendigkeit
 - Eigenschaften (z.B. homogener Untergrund)
 - Eingangsinformationen beschränkt / unzureichend

Problemanalyse

Beispiel zur Wahl Raumdimension: Transport von Nitrat im Untergrund

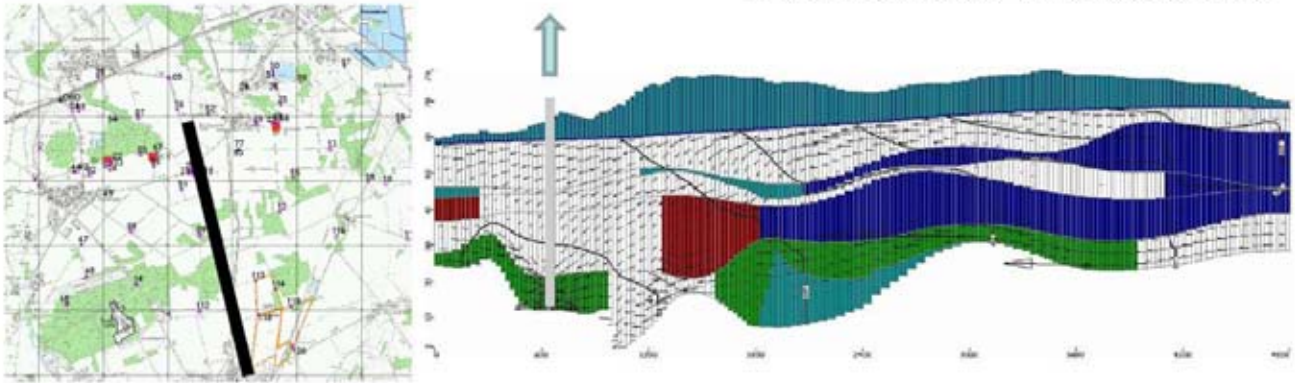
1-dimensional: Säulenversuch / Stromlinie → Ziel: Verhalten des Stoffs entlang Fließweg



Problemanalyse

Beispiel zur Wahl Raumdimension: Transport von Nitrat im Untergrund

2-dimensional: z. B. Schnitt (x-z) → Ziel: Hydraulik und Stofftransport für einen Brunnen / eine Messstelle

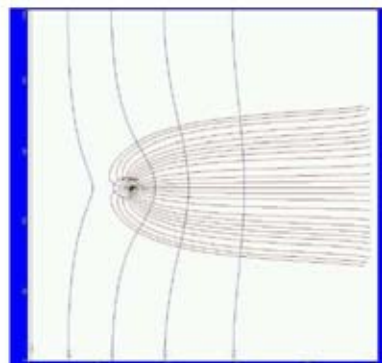
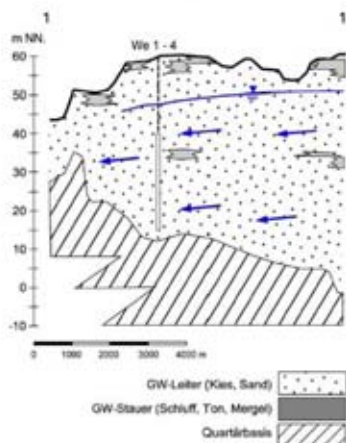


Quelle: M. Walther, T. Reimann, TU Dresden

Problemanalyse

Beispiel zur Wahl Raumdimension: Transport von Nitrat im Untergrund

2-dimensional: z. B. horizontal-ebenen (x-y) → Ziel: Hydraulik für einen tiefen, homogenen GWL



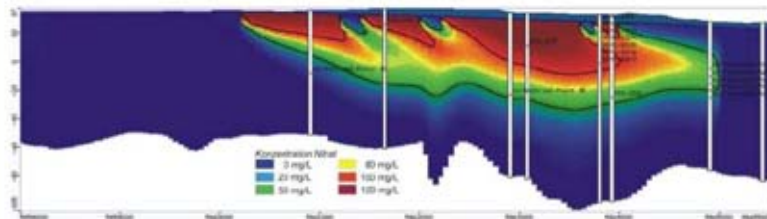
Quelle: M. Walther, T. Reimann, TU Dresden

Problemanalyse

Beispiel zur Wahl Raumdimension: Transport von Nitrat im Untergrund

3-dimensional:

→ Ziel: Hydraulik und Stofftransport für komplexes Gebiet (Interaktionen)



Quelle: M. Walther, T. Reimann, TU Dresden

Problemanalyse

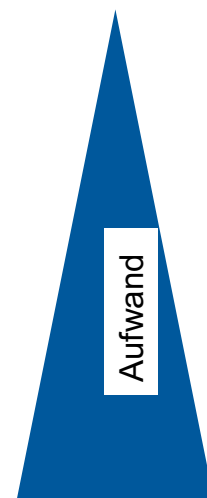
Zeitskala

Zeitunabhängig → stationär (.....)

- benötigt kein Speicherterm
- keine Beachtung von:
 - Variation der Grundwasserhöhe, Grundwasserneubildung, Fließgewässern
 - veränderliche Entnahmeraten (Pumpen)

Zeitabhängig → instationär (transient)

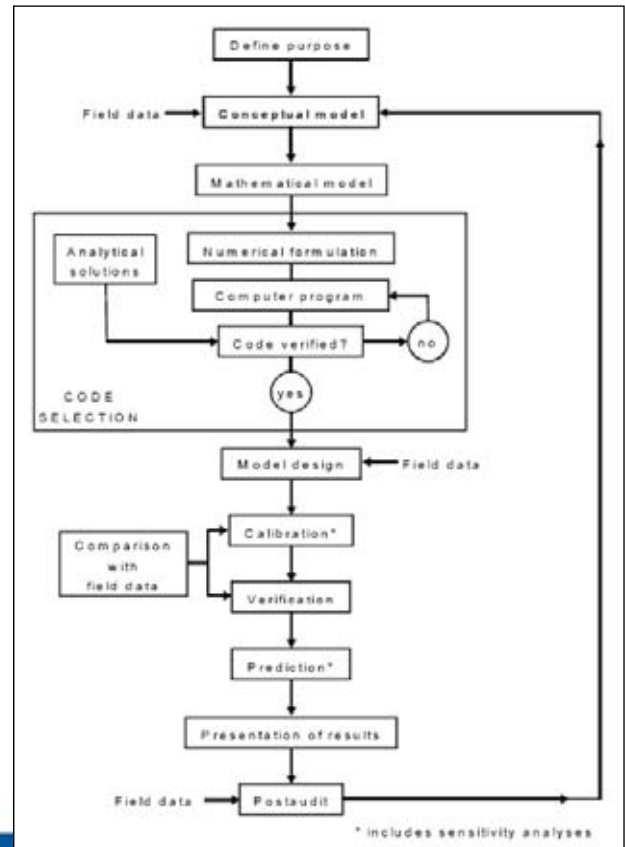
- benötigt
- Eingabedaten (Zeitreihen)
- Aufwand zur Modelleichung (mehr



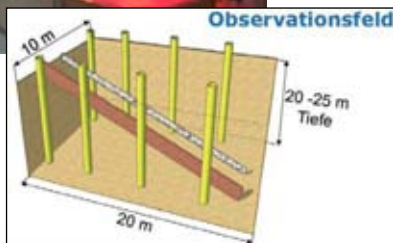
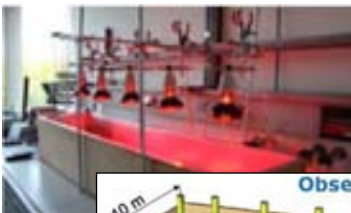
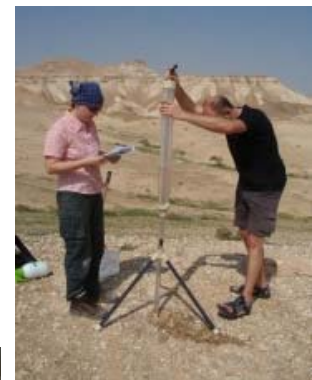
Arbeitsplan der (hydrologischen) Modellierung

- 1) Problemanalyse
- 2) Datenerhebung
- 3) Konzeptionelles Modell
- 4) Modellaufbau/-prüfung
- 5) Modellanwendung
- 6) Modellpflege

Quelle: M. Walther, T. Reimann, TU Dresden



Datenerhebung



Photos + Figures: C. Siebert, A. Meier, A. Sachse

Datenerhebung

- Grundwasserstände
- Stoffe: Konzentrationen
- geolog. Schichtenaufbau
- hydraulische Parameter (Pumptest)
- Randzuflüsse
- GW-Neubildung

.....

..... + →

Von geologischen Eingabedaten zur numerischen Modellierung

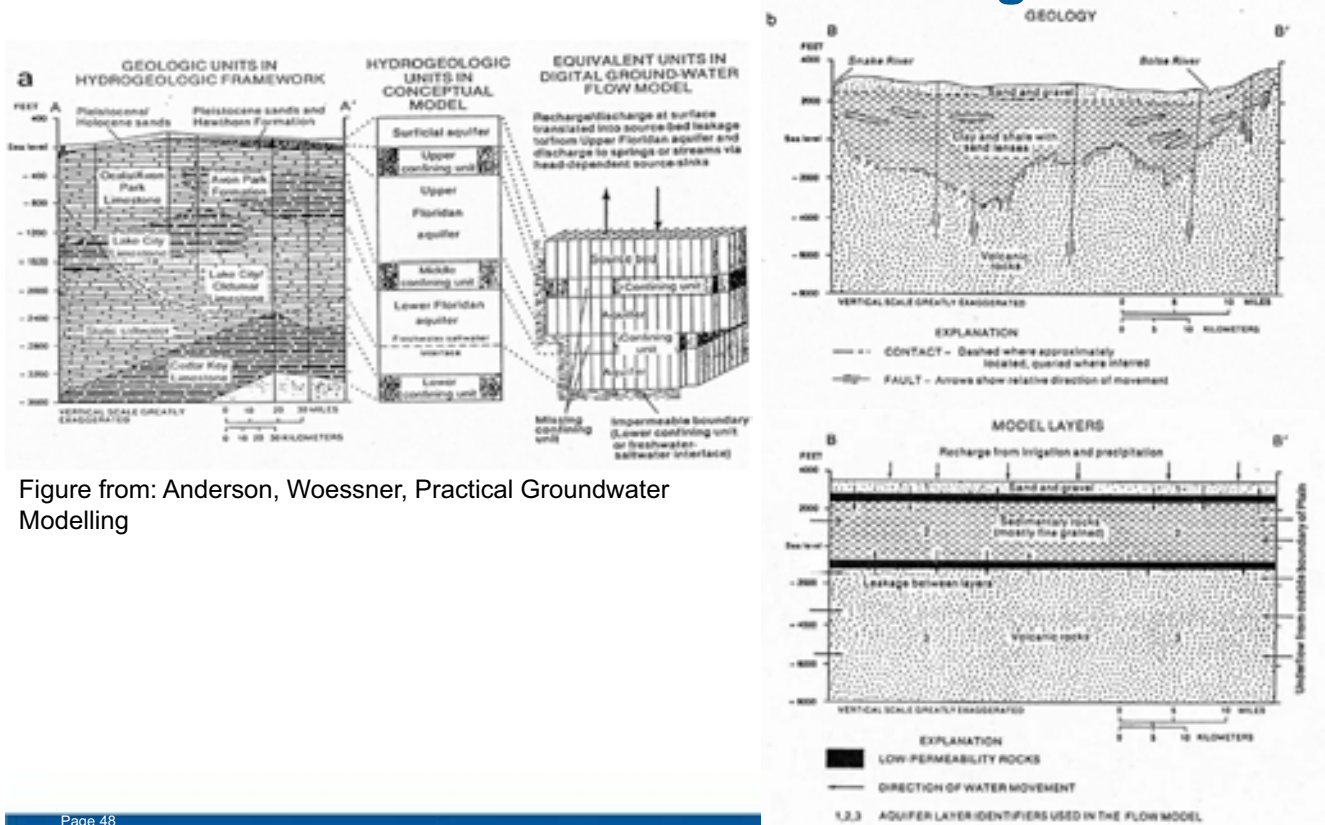
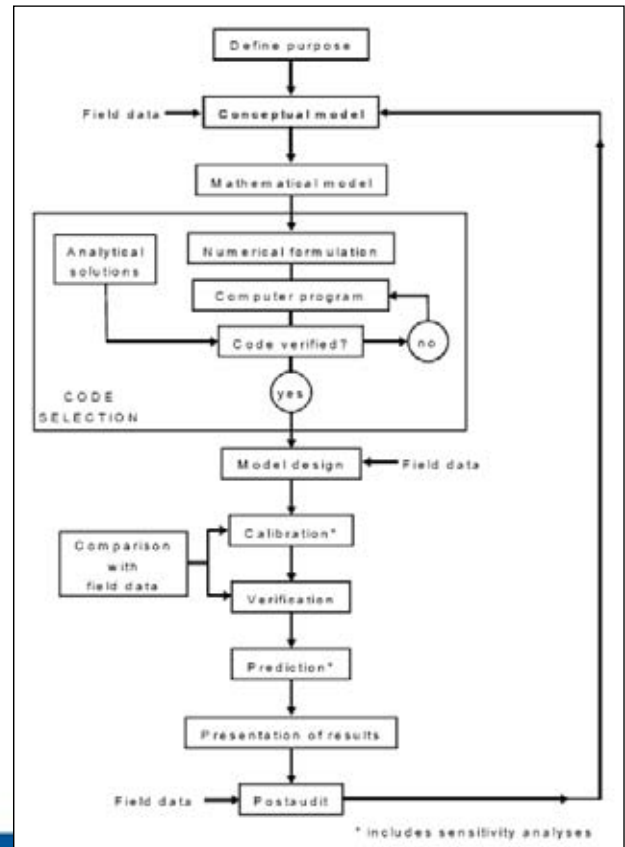


Figure from: Anderson, Woessner, Practical Groundwater Modelling

Arbeitsplan der (hydrologischen) Modellierung

- 1) Problemanalyse
- 2) Datenerhebung
- 3) **Konzeptionelles Modell**
- 4) Modellaufbau/-prüfung
- 5) Modellanwendung
- 6) Modellpflege



Quelle: M. Walther, T. Reimann, TU Dresden

Konzeptionelles Modell

Komplexe hydrologische / hydrogeologische Sachverhalte adäquat abstrahieren

→ Entwickeln der hydrologischen /hydrogeologischen Modellvorstellung:

-
- Bilanzraum
- Modellraum
-
- Aquiferparameter
- Dynamik
-
- Beschaffenheit (homogenität, Heterogenität)
-

Konzeptionelles Modell

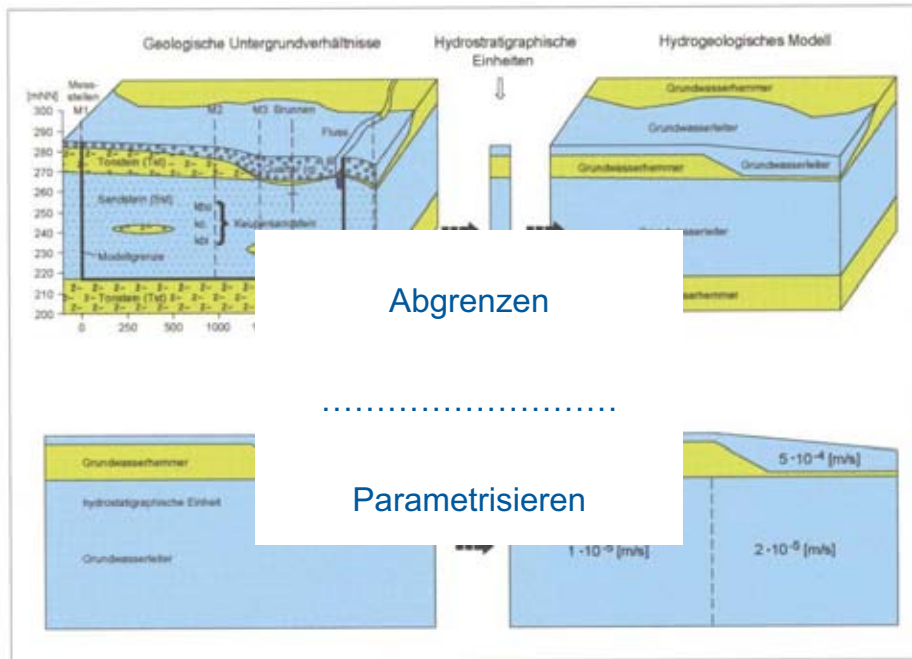


Abb. A1.2: Entwicklung des Hydrogeologischen Modells: Abstrahierung und Vereinfachungen von Strukturen, Evaluierung des Hydrogeologischen Modellkonzepts

Quelle: M. Walther, T. Reimann, TU Dresden

Konzeptionelles Modell

In Hinblick auf eine Wasserressource werden dargestellt:

- das aktuelle Verständnis der maßgebenden Prozesse,
- funktionale Zusammenhänge verschiedener Systeme (Grundwasser, Oberflächenwasser ...),
- Abhängigkeiten und Einflüsse ...

= Grundlage für

Entscheidender Schritt der Modellierung!

Konzeptionelles Modell

Arbeitsschritte

- Modellraum abgrenzen
-
- Hydrostratigraphische Einheiten
- Zonierung / Regionalisierung
- Randbedingungen
- Informationsdefizite ausweisen, weitere Informationen (Dynamik , Beschaffenheit, Bilanzen),

Konzeptionelles Modell

Abgrenzen

Modellränder – wie festlegen?

-
- möglichst eindeutige Randbedingungen
- ausreichender Abstand zum relevanten Modellgeschehen (Brunnen, Schadensfall) → kein Einfluss durch RB

→ Hilfsmittel:

Konzeptionelles Modell

Randbedingungen

=

A) Physikalische Randbedingungen

- resultieren aus den real vorhandenen Gebietseigenschaften
- z.B.

B) Hydraulische Randbedingungen

- resultieren aus den hydrologischen Bedingungen (!)
- z.B.

Konzeptionelles Modell

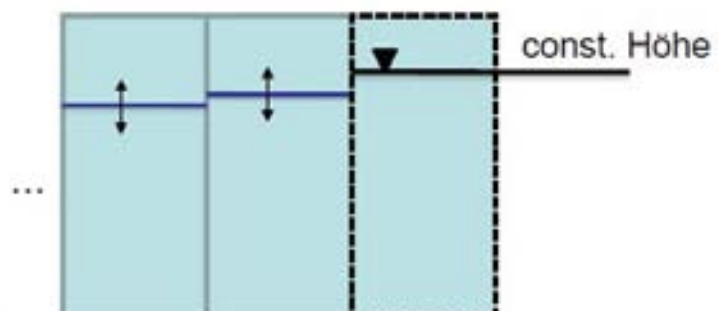
Randbedingungen

Arten der mathematischen Umsetzung:

1) RB erster Art (.....)

= fester Wasserstand (fixed head, specified head)

→ z. B. Isohypse,



Konzeptionelles Modell

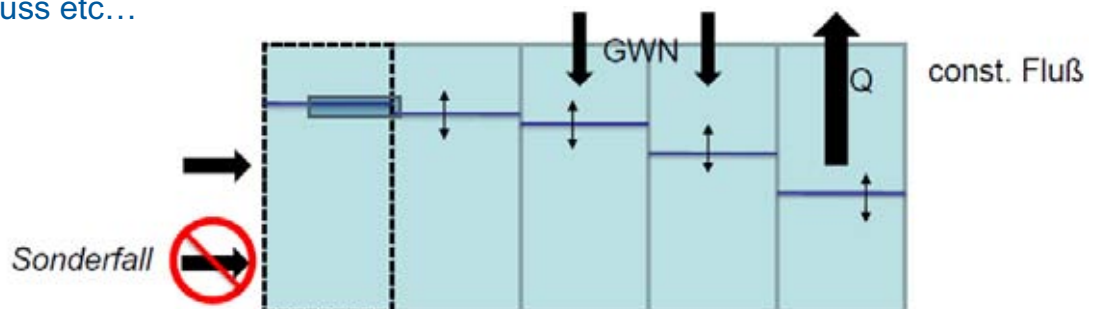
Randbedingungen

Arten der mathematischen Umsetzung:

2) RB zweiten Art (.....)

= Zufluß oder Abfluß auf dem Rand (specified flow, fixed flow)

→ GW-Neubildung, NO-FLOW Rand = senkrecht zu Isohypsen, Brunnen, Randzufluss etc...



Konzeptionelles Modell

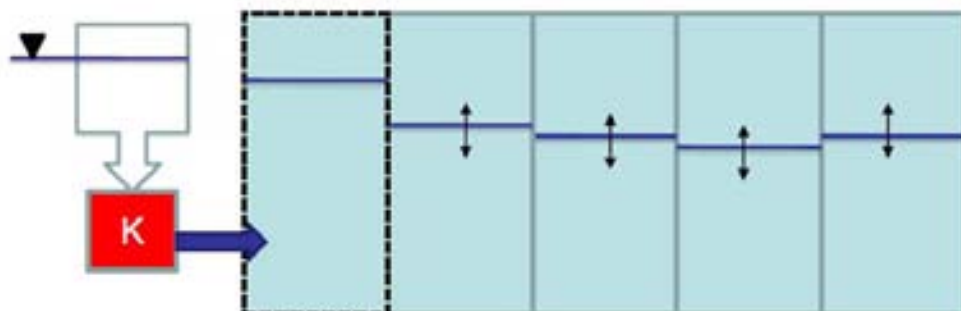
Randbedingungen

Arten der mathematischen Umsetzung:

3) RB dritter Art (.....)

= Kombination aus RBArt (head dependent flow)

→ z. B. Grundwasser-Oberflächenwasser Interaktion mit Kolmation, Interaktion zwischen Aquiferen etc...

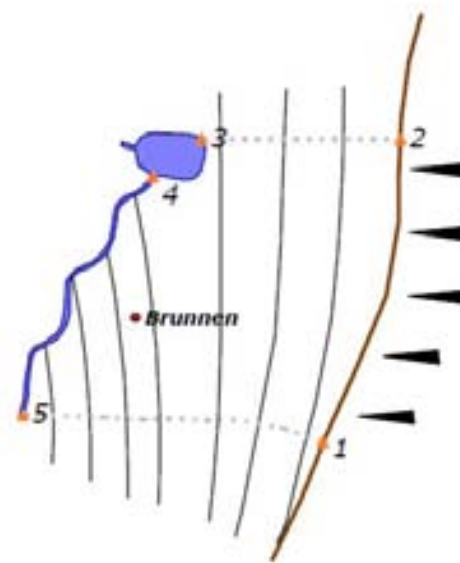


Konzeptionelles Modell

Randbedingungen

Beispiel

- 1-2: Randzufluss (RB.)
- 2-3: Randstromlinie (RB.)
- 3-4: Rand mit vorgegebener
Piezometerhöhe (RB.)
- 4-5: Halbdurchlässiger Rand (RB.)
- 5-1: Randstromlinie (RB.)



Quelle: M. Walther, T. Reimann, TU Dresden

Page 59

Zusammenfassung: Arbeitsablauf hydrol. Modellierung

- Problemanalyse
- Räumliche Dimension (1D / 2D / 3D)
- Betrachtung Zeit (stationär / instationär)

Hydrologisches / Hydrogeologisches Modell

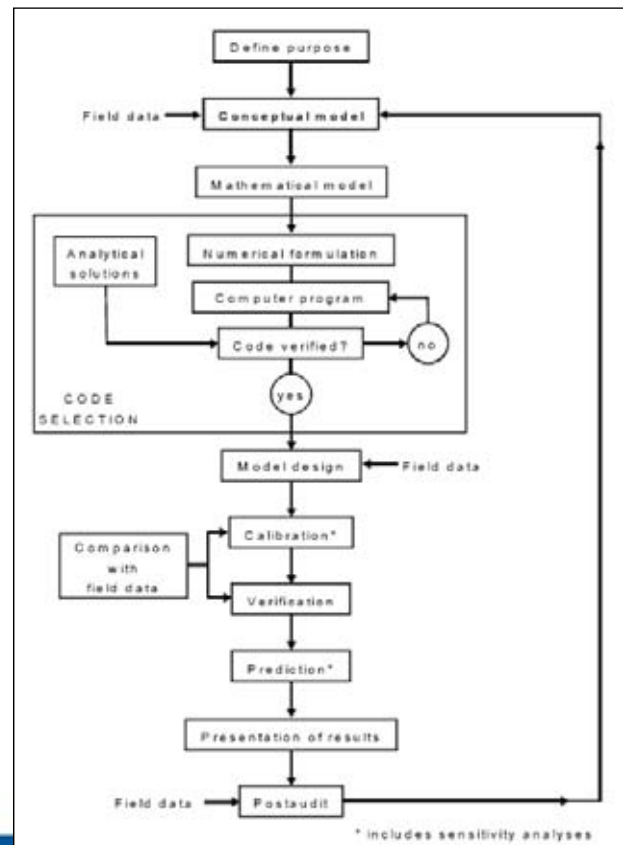
- Begriffe, Bedeutung
- Abgrenzen / Randbedingungen

→ Auf einfache Gebiet anwenden! → siehe Fallbeispiel Ammer-Einzugsgebiet

Page 60

Arbeitsplan der (hydrologischen) Modellierung

- 1) Problemanalyse
- 2) Datenerhebung
- 3) Konzeptionelles Modell
- 4) **Modellaufbau/-prüfung**
- 5) **Modellanwendung**
- 6) **Modellpflege**



Quelle: M. Walther, T. Reimann, TU Dresden

Hydrologische Modelle-Software

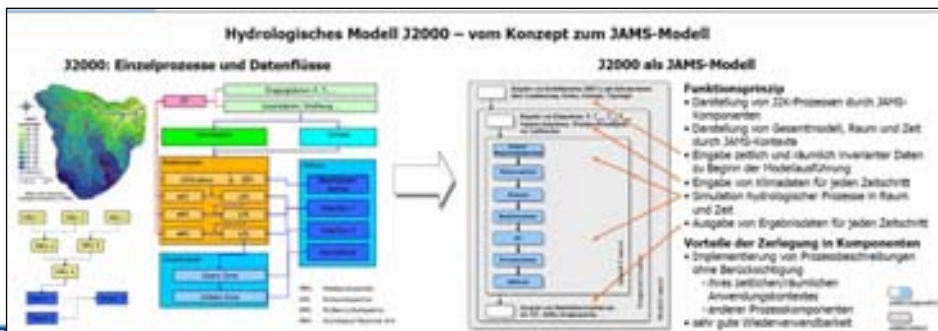
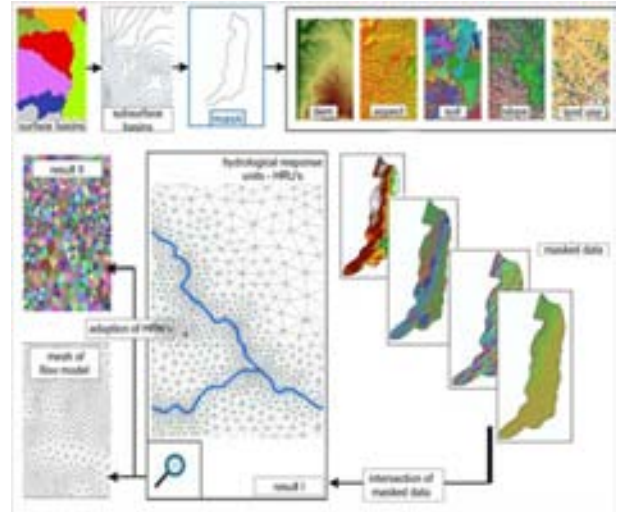
Beispiele

JAMS

- Jena Adaptable Modelling System (JAMS)
- J2000g Modellierungssystem: mit objektorientiertem modulare Ansatz
- basierend auf dem HRU-Prinzip

Randbedingungen der Modellierung:

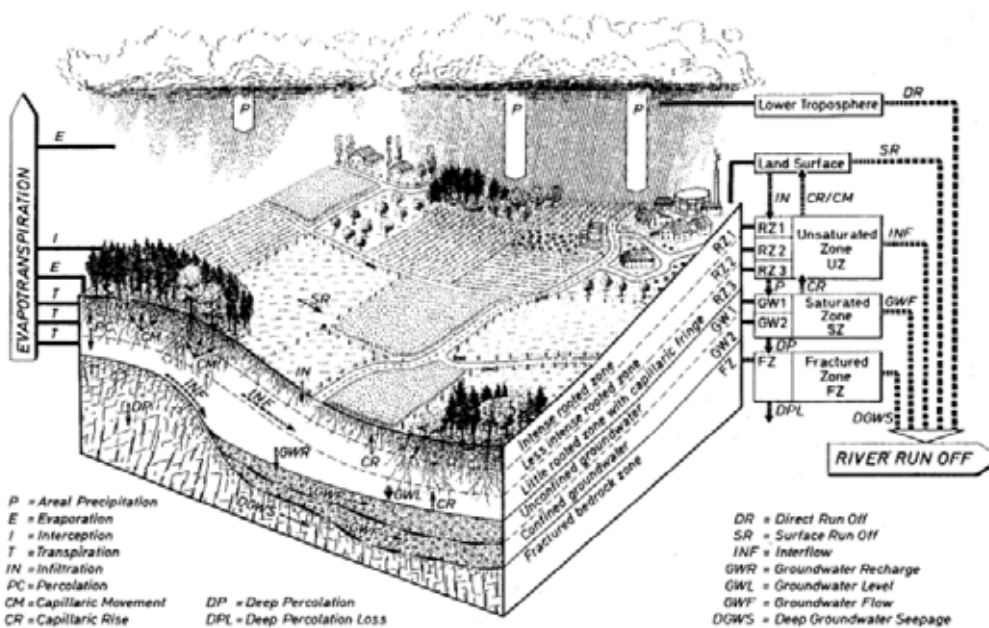
- kontinuierliche Modellierung in Tages- oder Monatszeitschritten,
- anwendbar für komplexe, aber auch Einzel-Einzugsgebiete
- robust, mit wenig Kalibrierparametern
- anwendbar für historische und zukünftige Klimaszenarien
- flexibel anpassbar an Fragestellung und Region



Source: multiview.com

Kralisch et. al, 2000

Physiographisch-prozessorientiertes Konzept der HRUs



Quelle: Flügel (1996)

SWMM (engineers model)

Simulation des Abflusses in offen/geschlossenen Gerinne-Systemen

- Vorhersage von
- z.B. Vorhersage der Flutwelle für detaillierte Abflussereignisse in Kanalsystemen

Modell: instationäre, ungleichförmiges Fließverhalten wird berücksichtigt um Wellenausbreitung innerhalb des Flusses / Kanalsystem zu modellieren

Methode:

-
 - ein-dimensionaler, instationärer, ungleichmäßiger Fluß kann durch 2 unabhängige Variablen beschrieben werden:
 - mögliche Kombinationen
 - Wassertiefe (h) und Abfluss (Q)
 - head (z) und Abfluss (Q)
- Wassertiefe (h) und Fließgeschwindigkeit (v)

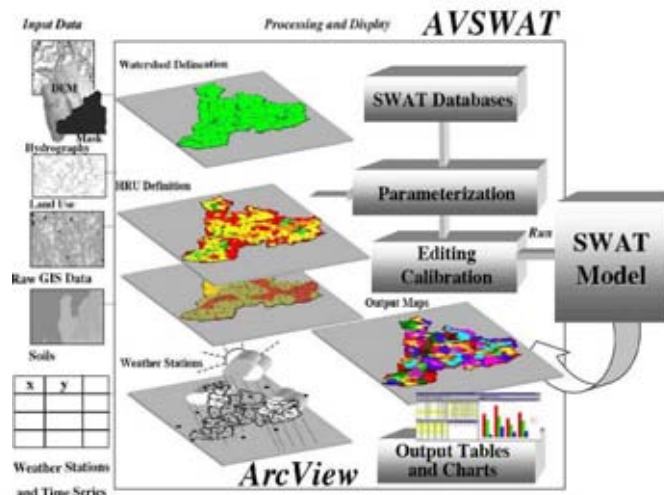


Source: Rossman L. (2010)

Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

- Einzugsgebiets- + Transport-Modell
- quantifiziert Einfluß vonin großenräumigen, komplexen Einzugsgebieten
- frei verfügbares Modell: unterstützt durch USDA Agricultural Research Service at the Grassland, Soil and Water Research Laboratory in Temple, Texas, USA
- enthält folgende Komponenten:

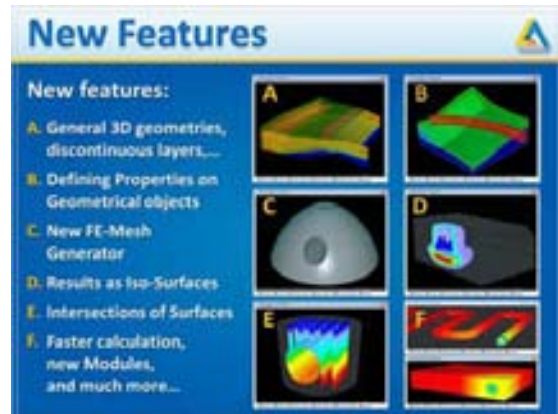
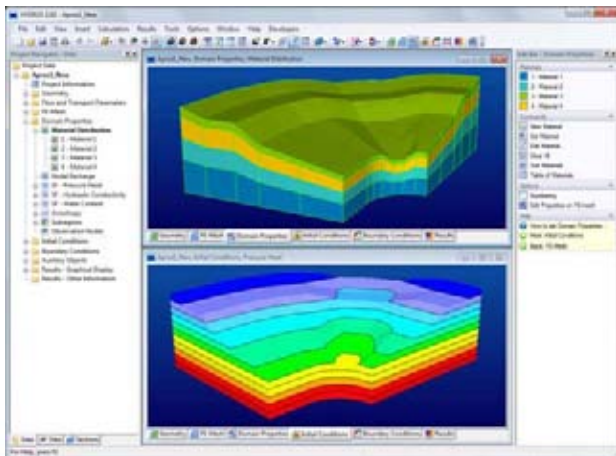
-



Source: geo.arc.nasa.gov

HYDRUS-2D

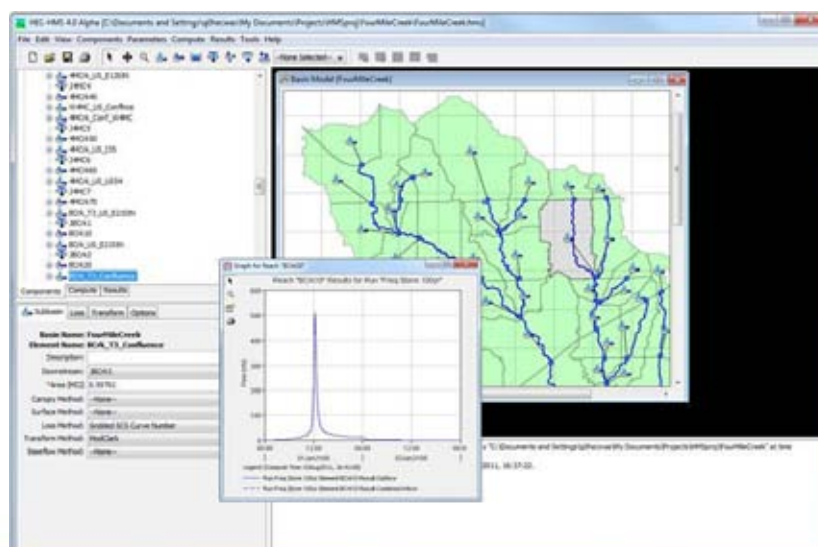
- Simulation von Wasserbilanz und Massentransport in zweidimensionalen gesättigten und ungesättigten Systemen (Windows-basierend)
- Finite-Element-Modell:
- Analyse von Wasserfluss und –Transport in porösen Medien
- Interaktive graphisches Interface zur Datenvorbereitung, Mesh + Simulationsergebnis enthält div. Parameteroptimierungsalgorithmus
- Anwendung:



Source: igwmc.mines.edu

HEC-HMS

- simuliert die Prozesse von dendritischen Einzugsysteme
- umfasst große Flusseinzugsgebiete der Wasserversorgung und Hochwasserhydrologie und kleinen städtischen oder natürliche Einzugsgebiete
- simulierte Hydrographen können von anderen Programmen weiterverwendet werden für Wassermanagements-Studien, Stadtentwässerung, Hochwasservorhersage, zukünftige Urbanisierung



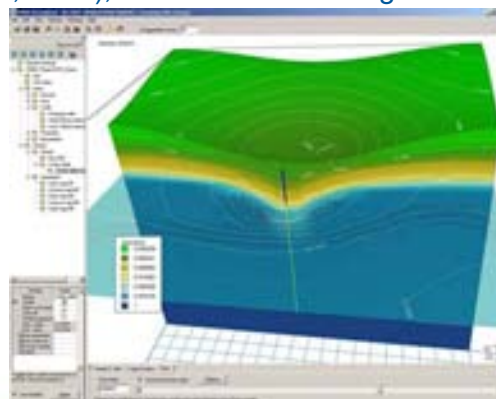
Grundwasserströmungsmodelle–

Beispiele

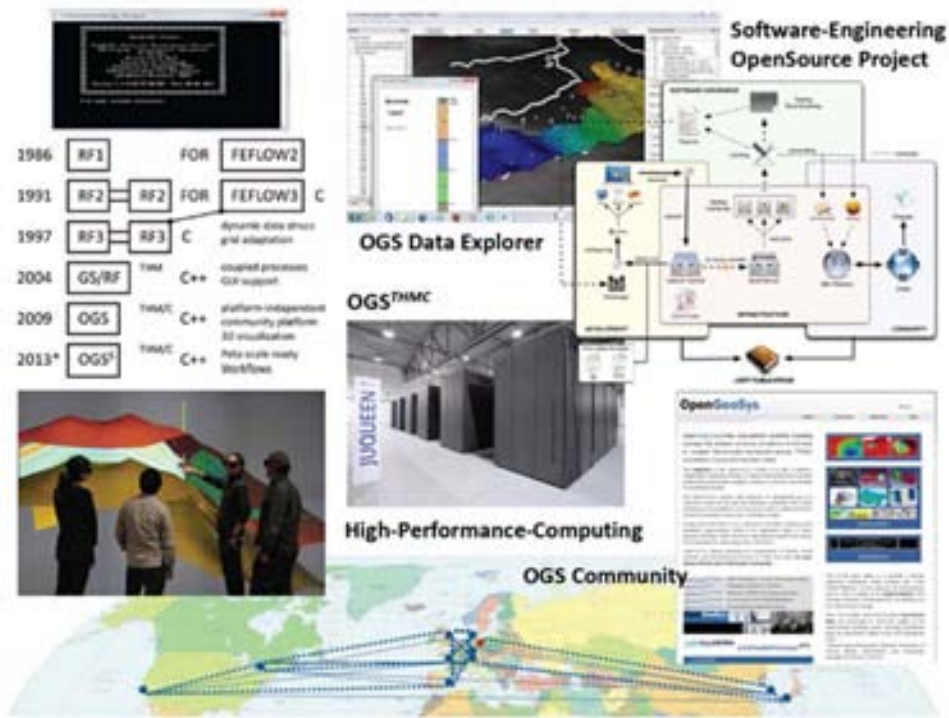


Modflow

- GW_Modell, entwickelt vom U.S. Geological Survey (USGS) mit modularer Struktur bestehend aus Hauptprogramm und div. unabhängige Programmpakete:
 - hydrologisches Paket: Simulation des Flusses zwischen benachbarten Zellen
 - hydrol. Stress-Paket: z.B. für GWN
 - Solver-Paket: Unterstützung bei Implementierung von Algorithmen von Finite-Differenzen-Gleichungen
- simuliert steady state und transient Bedingungen in gespannten, ungespannten oder gemixten Aquiferen
- Kompatibel mit automatischen Parameter-Abschätzungs-Tool UCODE (Poeter et al., 2005)
- MODFLOW-2005 (Harbaugh, 2005), frei für wiss. Nutzung



OpenGeoSys



Kolditz, 2012

Page 71

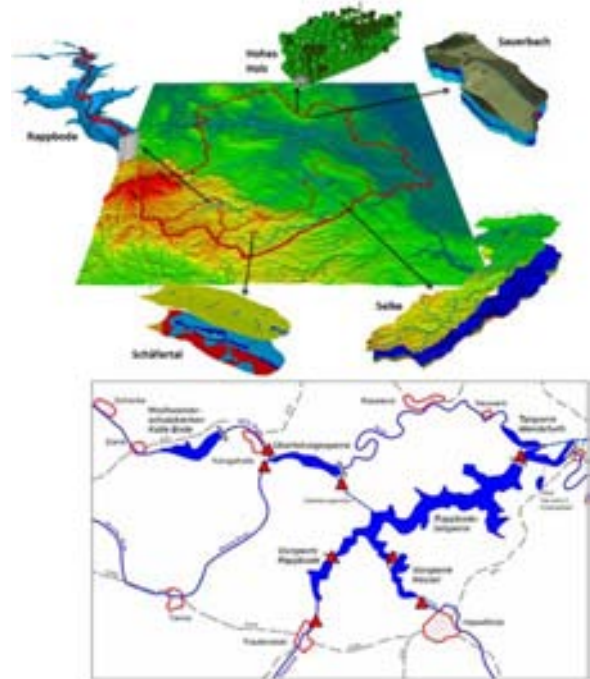
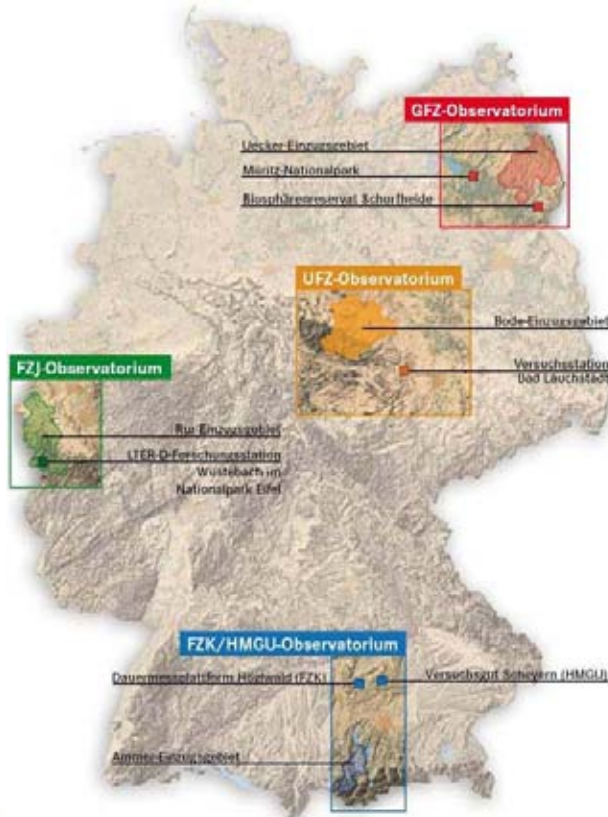
Fallbeispiele und deren wissenschaftliche Fragestellung

Page 72

To study long-term influence of land use changes, climate changes, socioeconomic developments and human interventions in terrestrial systems

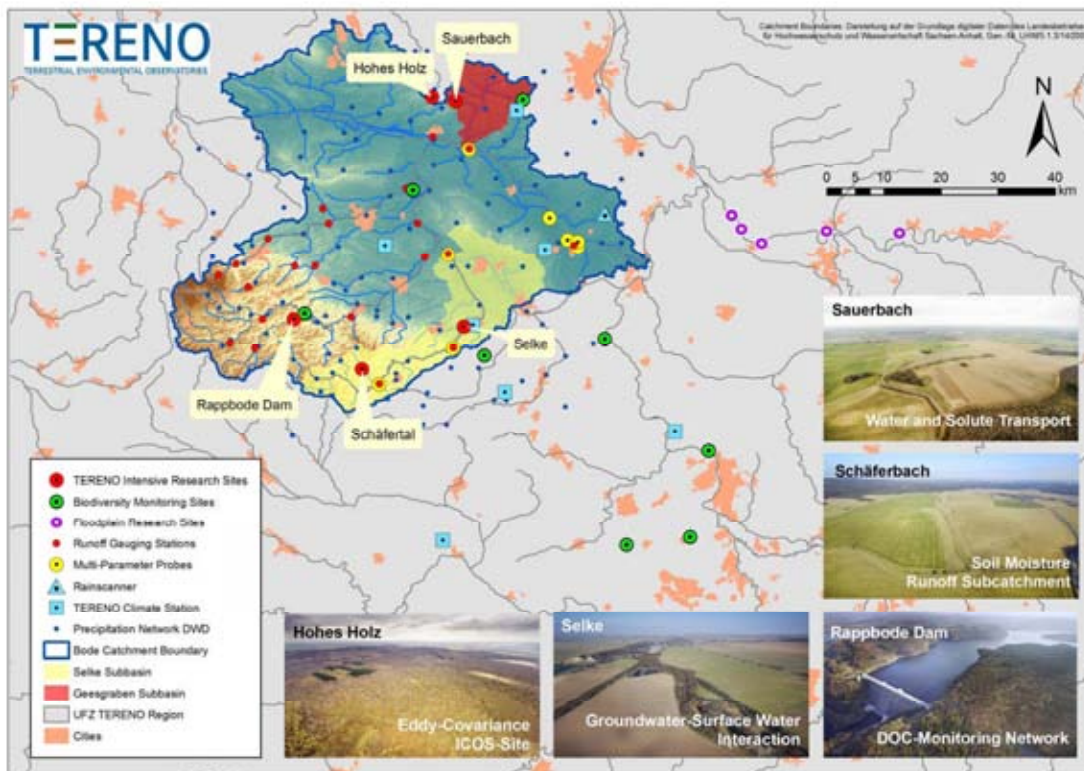
TERENO

www.tereno.net



Zacharias, 2012

Hydrologisches Observatorium Bode



Long time model to simulate groundwater flow and mass transport of Untere Mulde / Fuhne-catchment

Scientific Question:

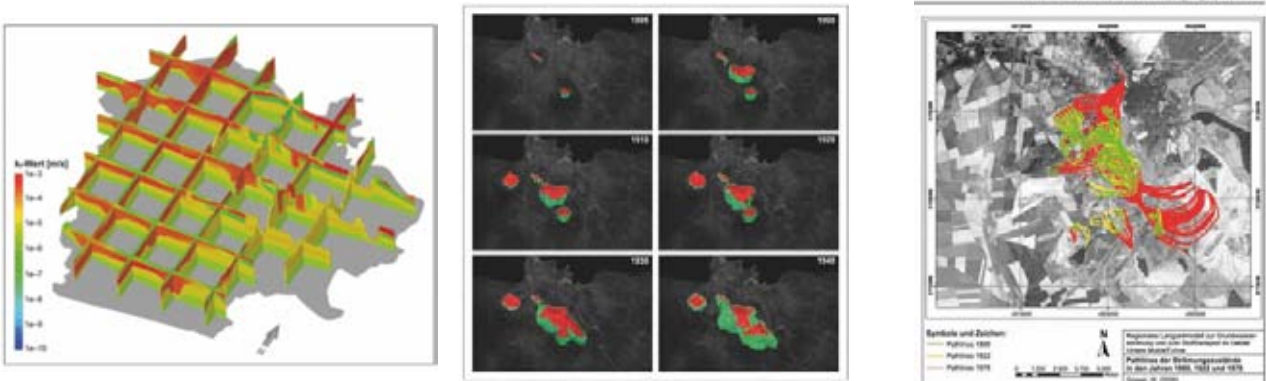
The mining activities around Bitterfeld led to a large-scale pollutant discharge from the chemical industry. Objective of the long-term model was to develop strategies that explain the current pattern of complex pollutant patterns better than local and short-term models.

Method:

three-dimensional groundwater flow and transport model was set up to path lines of contamination

Result:

Contamination concentrates on the quaternary channels, which are also preferred outflow tracks and reinforce the contamination inflow in the tertiary aquifer



Wycisk, Peter, et al. "Integrated methodology for assessing the HCH groundwater pollution at the multi-source contaminated mega-site Bitterfeld/Wolfen." Environmental Science and Pollution Research 20.4 (2013): 1907-1917.

Regional groundwater flow model of the Western Dead Sea Escarpment (SUMAR-Project)

Scientific Question:

The cretaceous aquifer system is the only fresh water resource in the arid catchment of the Western Dead sea escarpment. Unsustainable water management led to an overexploitation of the aquifer and to an enormous decrease of the water level of the Dead sea. The aim of the modeling was the quantification of the water balance parameters and the current groundwater recharge.

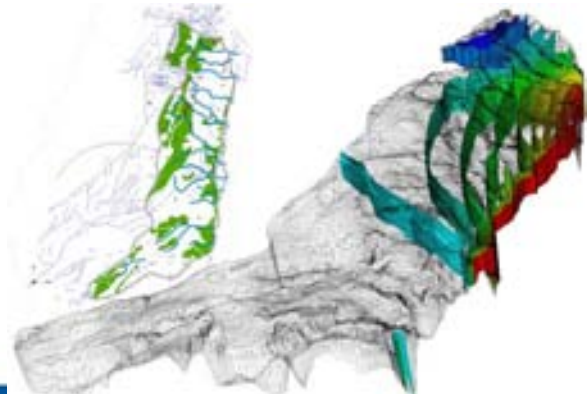
Method:

hydrological model
model to simulate g

Thema der nächsten Vorlesung ^{w (OGS)}

Result:

Waterbalance of cretaceous multi-aquifer system, groundwater recharge scenarios and transient groundwater flow model



Ukraine – Western Bug Catchment (IWAS-Project)

Scientific Question:

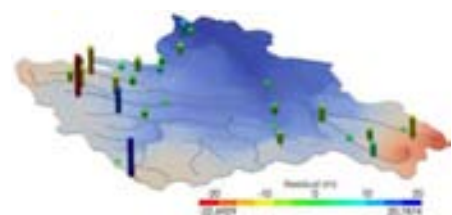
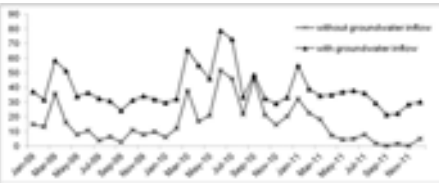
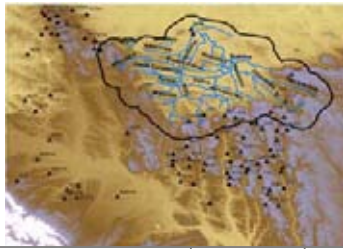
Inverse determination of groundwater inflow using water balance simulations and the analysis and quantification of current water balance components of the catchment Western Bug under the challenge of scarce data and the complexity of local hydro-geology and hydrogeology.

Methods:

hydrological modeling (BROOK90), hydrogeological modeling (OGS)

Result:

Water balance of the Bug-catchment and the quantification of groundwater inflow from the Carpathian mountains



Parameter	Precip	Snow	Q_surface	Recharge Aquifer_shallow	Recharge Aquifer_deep	Recharge Aquifer_total	ET	PET
average annual values [mm]	749.1	106.86	33.48	131.69	8.40	157.00	455.7	690.4

Oman I - Recharge and residence times in an arid area aquifer

Scientific question:

The study investigates recharge to the Najd groundwaters as part of an active flow system and evaluates the mean residence time in the deep groundwaters.

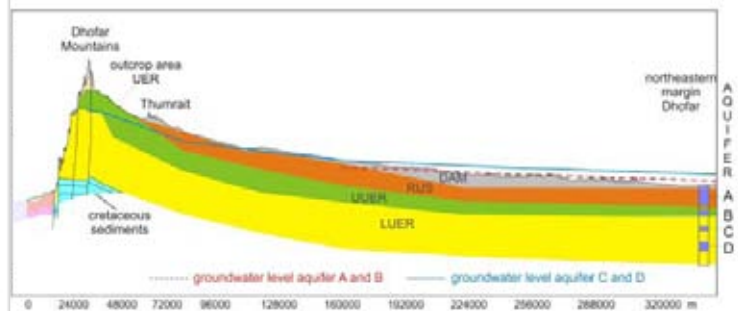
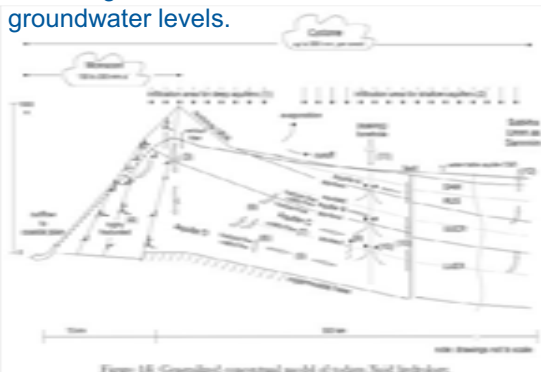
Methods:

groundwater flow model combined with environmental isotope tracer data (Modflow)

Results:

The two-dimensional flow model replicates the characteristics of the aquifer system from the potential recharge area in the south (Dhofar Mountains) to the discharge area in the north (Sabkha Umm as Sammim).

Based on the used parameters the model calibration indicated, that a recharge rate of around 4 mm a⁻¹ is sufficient to reproduce current groundwater levels.



Oman II

Scientific question:

Saltwater Intrusion in an Agricultural Used Coastal Aquifer System.

The "Al-Batinah" plains, a coastal region in Oman, are used for agriculture. Irrigation water is taken from limited, non-renewable subsurface water. Due to groundwater levels lowering: marine saltwater pollutes the aquifer.

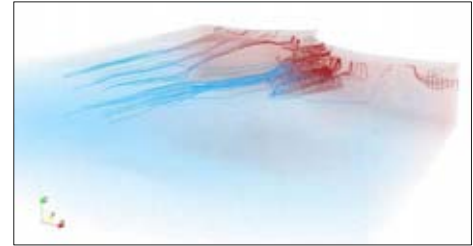
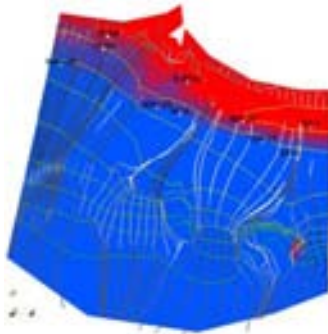
Method:

three-dimensional gro

Result:

best-case scenario sir
saltwater in a long-term perspective

**evt. Thema der Vorlesung mit
Marc Walther**



Stream tracers show areas of
main groundwater flow paths

Advanced visualization techniques
helped to validate complex model
output

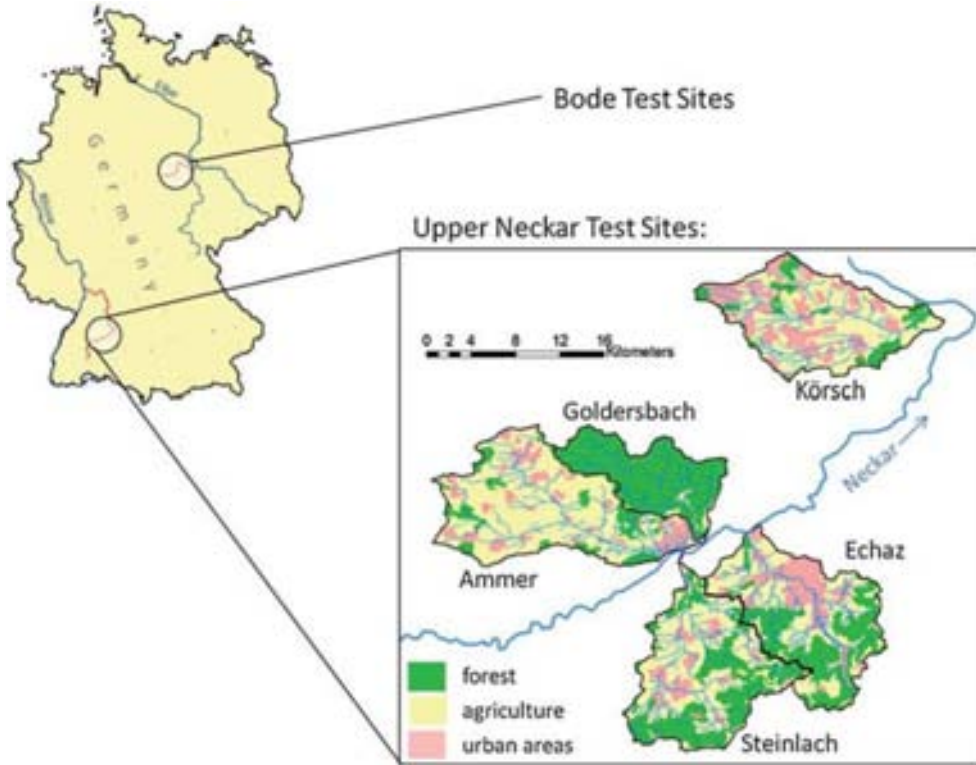
Exkurs: Fallbeispiel Ammer-Einzugsgebiet

Grundwassermodellierung in Süddeutschland zum Einfluss von GWN- und Abfluss auf Grundwasserverweilzeiten und Fließpfade innerhalb des Ammer-Einzugsgebietes (B. Selle)

WESS-Projekt



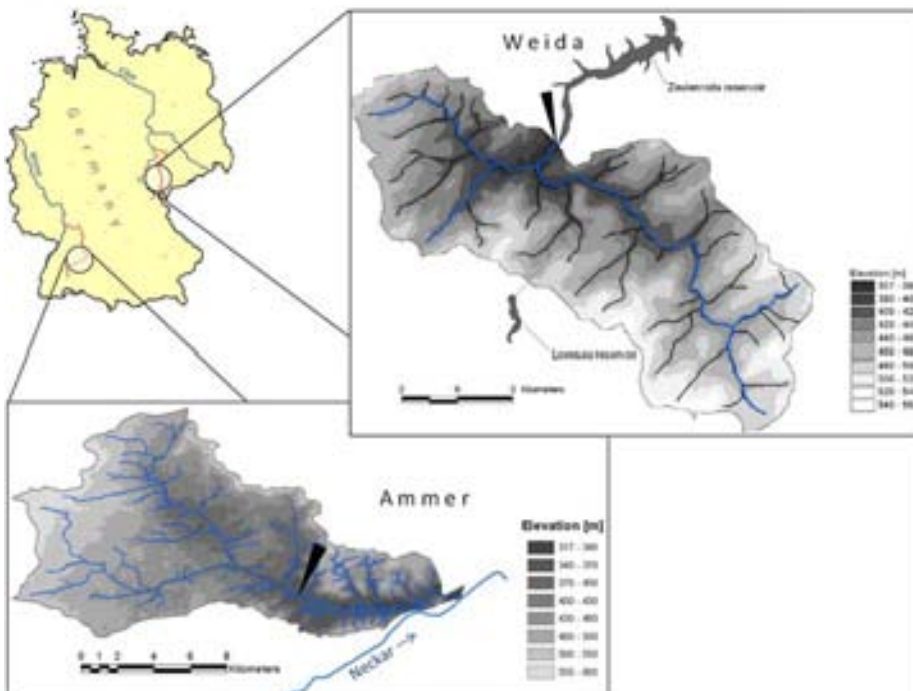
WESS workflow from the soil–plant–atmosphere to the groundwater–surface water interface including integrated modeling and future climate and land use scenarios (Grathwohl et al., 2012)



Locations of River Bode and Upper River Neckar test sites. (Grathwohl, 2012)

Recharge and discharge controls on groundwater travel times and flow paths to production wells for the Ammer catchment in southwestern Germany

Selle et al., 2013

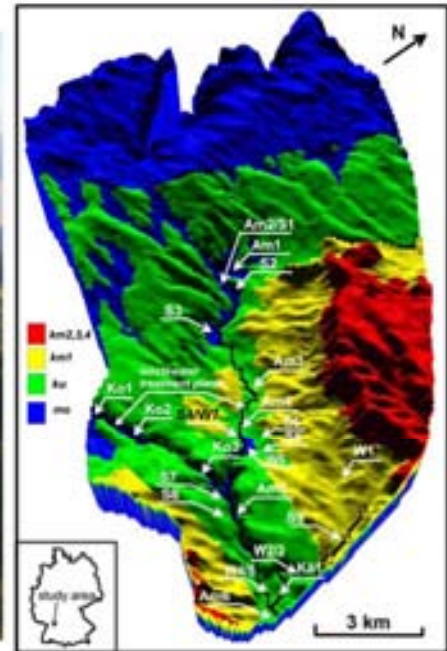


Recharge and discharge controls on groundwater travel times and flow paths to production wells for the Ammer catchment in southwestern Germany

A. Selle, K. Ren, F. Kolditz

Abstract: Travel times and flow paths of groundwater from the recharge area to drinking water production wells will govern the quality of ground water supply to consumers. Thus, to reduce the 100-year average lifespan in southwestern Germany, which is currently used for groundwater production from a carbonate aquifer, long-term groundwater management, four alternative representations of discharge and recharge were systematically explored to understand their impact on groundwater travel times and flow paths. First, geologically, flow recharge was obtained from different German hydrologic atlas and two plausible alternative discharge scenarios were used. Second, the groundwater flow across the entire catchment of the Ammer River and its major tributaries and (2) groundwater discharge via the major springs feeding the Ammer River. For each of these scenarios, the groundwater model was first calibrated using water levels and subsequently travel times and flow paths were obtained for production wells using particle tracking methods. Then, completed travel times and flow paths were subjected to statistical analysis. Additional data from the wells including measured concentrations of major ions and inorganic nitrogen concerning groundwater quality were used to assess the impact of the different discharge and recharge scenarios on groundwater quality. The results show that the discharge and recharge scenarios have a significant impact on groundwater travel times and flow paths. The discharge and recharge scenarios have a significant impact on groundwater travel times and flow paths. The discharge and recharge scenarios have a significant impact on groundwater travel times and flow paths.

Ammer-Einzugsgebiet



Quelle: B.Selle

Geologie

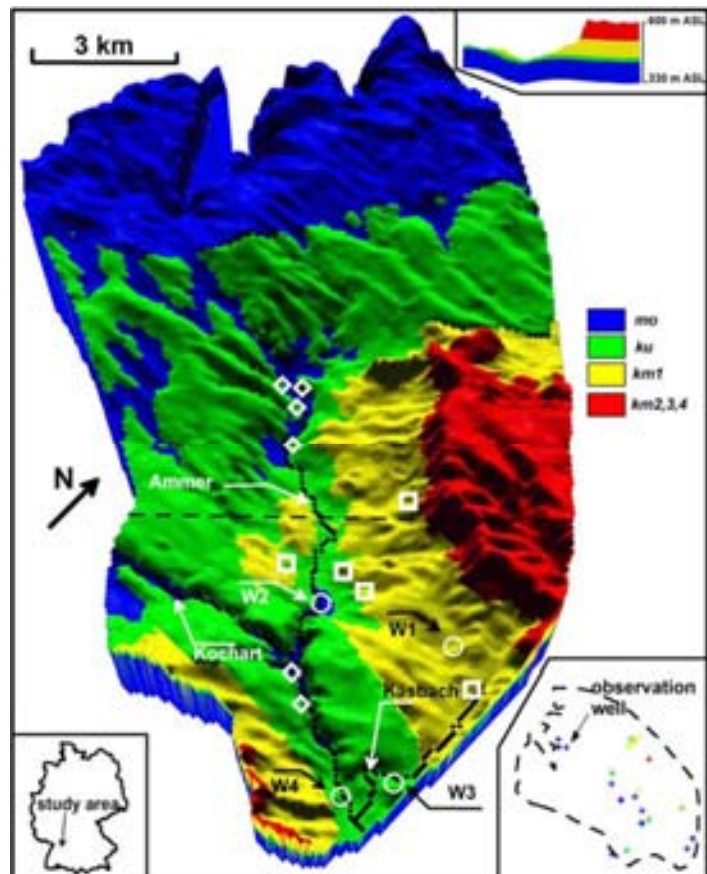
3-D Ansicht des Ammer-Einzugsgebietes mit den Flüssen Ammer, Kochart und Käsbach

- Gipskeuper-Quellen (Quadrat) und Obere Muschelkalk-Quellen (Trapez)
-(Kreise W1, 2, 3, 4).

Hydrogeologische Einheiten:

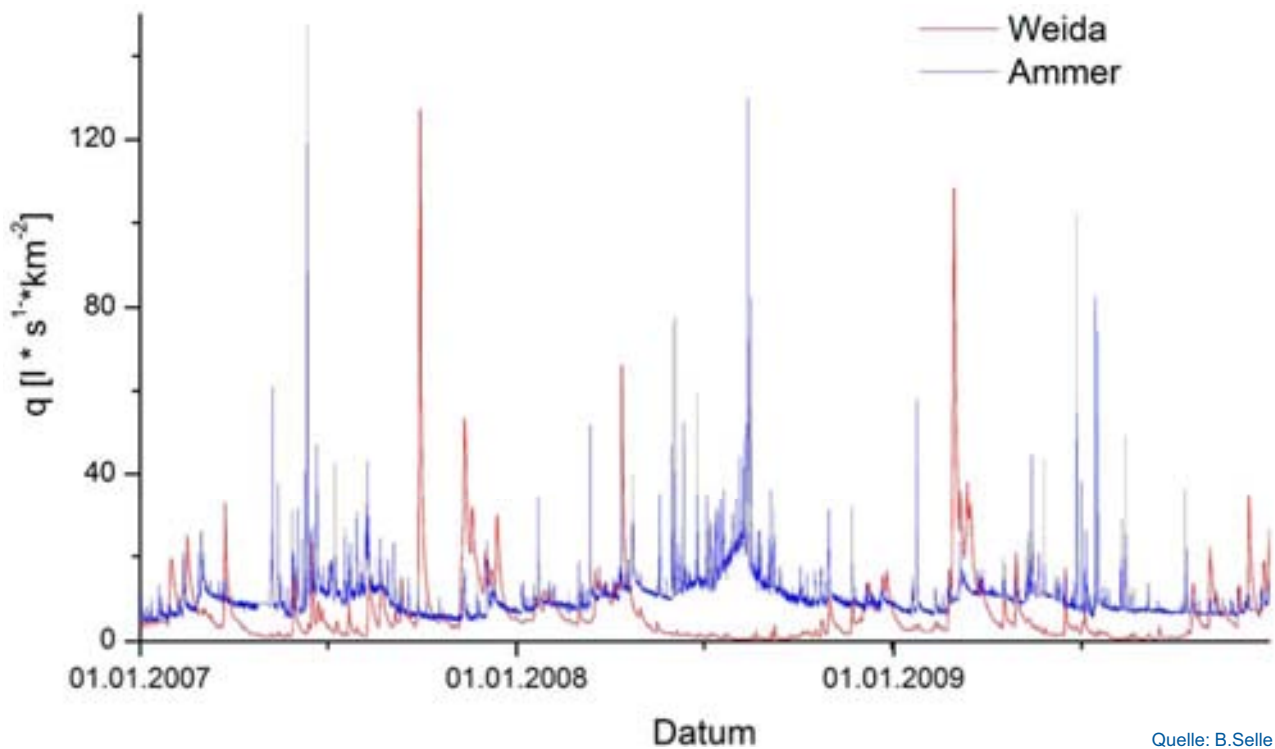
-(mo)
- (km1)
- Lettenkeuper (ku)
- Schilfsandstein (km2)
-(km3)
- Stubensandstein (km4)

kleine Karte: Observationsbrunnen zur Kalibrierung



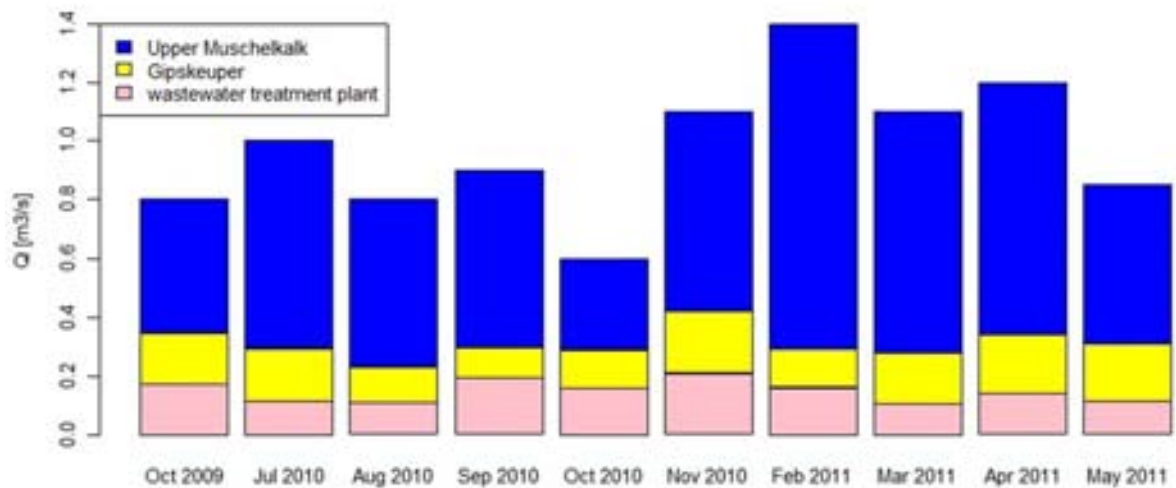
Quelle: B.Selle

kontinuierlicher Abfluss



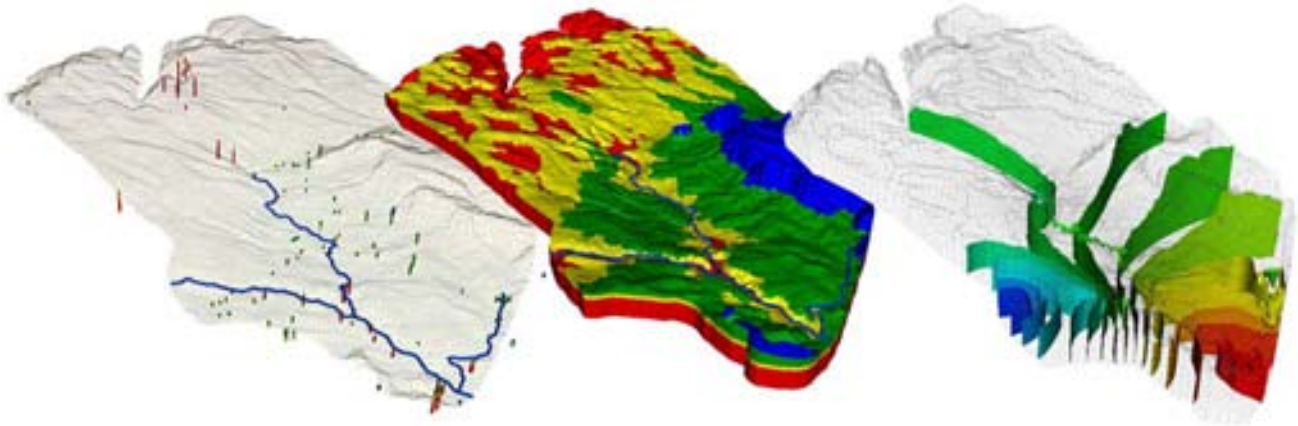
Herkunft des Grundwasserausflusses am Gebietsauslass

.....(EMMA): Gebietsauslass



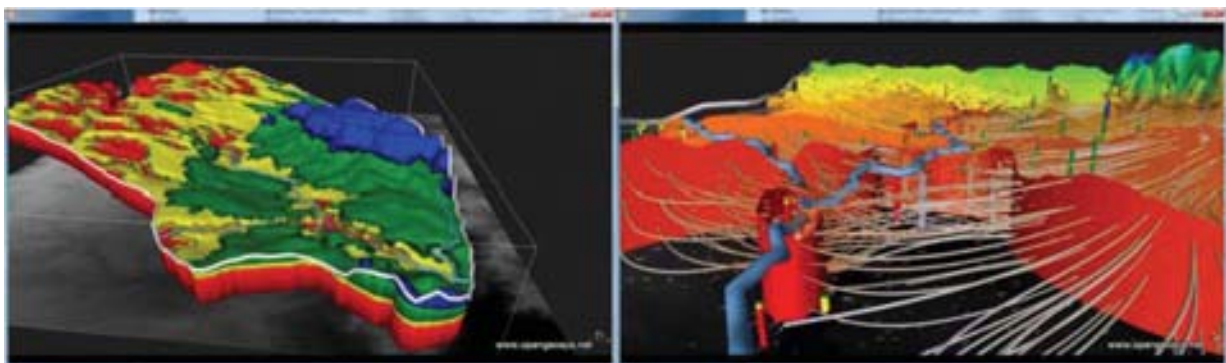
Step by step Modellierung

- Datenaufbereitung: z.B. im
- Modellierung des Grundwasserströmungsmodells (OGS)
- → **Vorlesung am 12.06.2015 (Laptop mitbringen!!!)**



Quelle: K. Rink

Visualisation of the Ammer catchment



The Ammer catchment: Geometrical representation (left) Groundwater flow model (including flowpaths to groundwater abstraction wells; right). Data visualization by Bilke (2012)

- **Exkursion ins Vislab, UFZ Leipzig**

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Fragen?

verwendete Literatur

u.a.

- Nemeč, 1993: Groundwater modeling
- M. Walther + T. Reimann: Ü Grundwasserbewirtschaftung “Hydrogeologische Modellierung, TU Dresden
- "An Overview on Current Free and Open Source Desktop GIS Developments - Steiniger and Bocher". Retrieved 2011-Aug-05.
- Prof. Dr.-Ing. Manfred W. Ostrowski: V Ingenieurhydrologie I, TU Darmstadt