



Modellierung von Hydrosystemen

Hydrologische Modellierung

- Einführung -



Dresden, 24.04.2015 | 20.04.2018

Agnes Sachse^{1, 2}

¹Helmholtz Centre for Environmental Research – UFZ, Department of Environmental Informatics, Leipzig

²TU Dresden, Applied Environmental System Analysis, Dresden

Vorlesung

- Wasserquantität und numerische Methoden [Kolditz]
- Wasserqualität (Schadstoffhydrologie) [Walther]

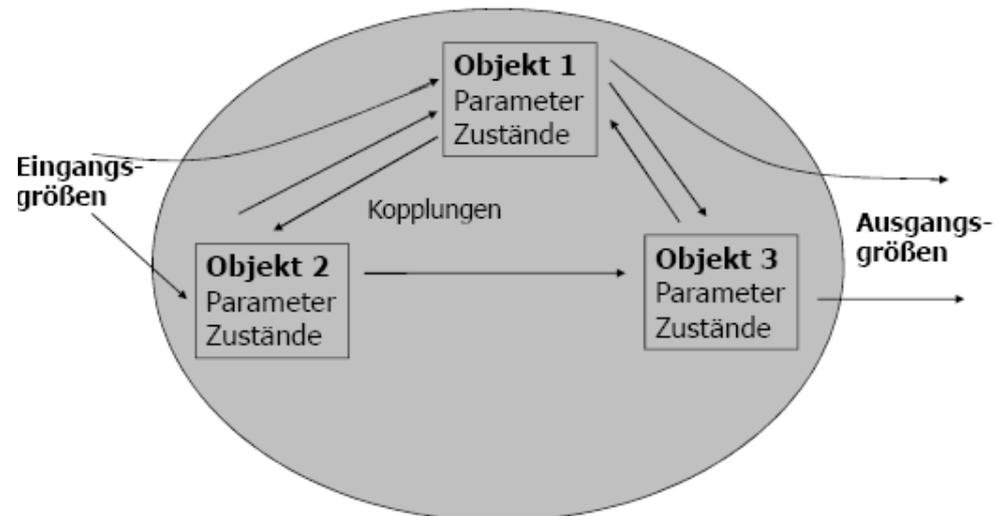
Datum	V	Thema
		Grundlagen
13.04.2018	1	
20.04.2018	3	Hydrologische Modellierung: Wasserquantität [Agnes' Lecture]
27.04.2018	5	Hydromechanik / Numerische Methoden: Wiederholung
		Numerische Methoden
04.05.2018	7	Einzugsgebiet: Übung
11.05.2018	9	Numerik: Finite-Differenzen-Verfahren (2D): Vorlesung
18.05.2018	11	Numerik: Finite-Differenzen-Verfahren (2D): Übung
25.05.2018	--	Pfingsten
01.06.2018	13	Software: Objekt-Orientierte FDM
08.06.2018	15	Numerik: Implementierung von Anfangs- und Randbedingungen
15.06.2018	17	Selke-Modell: Übung
22.06.2018	19	VISLAB Exkursion
29.06.2018	21	Numerik: Finite-Elemente-Verfahren
		Datenbasierte Methoden
06.07.2018	23	Hydrologeologische Modellierung: Datenbasierte Verfahren I
13.07.2018	25	Hydrologeologische Modellierung: Datenbasierte Verfahren II
20.07.2018	27	Klausurvorbereitung

Vorlesung

- System-Modellierung
- Basiswissen Hydrologie
- Grundlagen der hydrologischen Modellierung

System-Modellierung

- was ist ein System?:
 - definiert durch unterscheidbare Objekte
 - Kopplung zwischen diesen Objekten
 - Eingangs- und Ausgangsgrößen
- Ökosystemmodellierung
- Hydrosystemmodellierung
-



Ziele und Zweck der System-Modellierung

- Prüfung von Hypothesen
- Prozessaufklärung
- Erstellung von Normen und Faustregeln
- Parameterbestimmung
- Prüfung von Varianten (Designoptimierung, Strategien)
- Vorhersagen

Typisierung

Prozessmodell (Realparameter)

deterministisch

Gleichgewicht

analytisch

Management

Black-Box-Modell (Fitting-Parameter)

stochastisch

Ungleichgewicht

numerisch

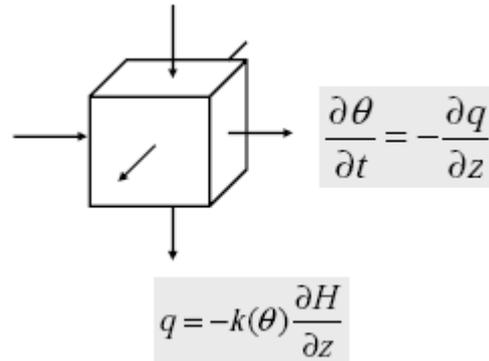
Forschung

“White-Box”-Modell

- Deterministische Modelle
- Physikalisch basierte Modelle
- Prozessorientierte Modelle

z.B. lokale Massenbilanz

Transportgleichung



Physikalisch basierte Modelle

	Lokale Bilanz	Flußdichte	Transportgleichung
Wasser-transport	$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z}$	$q = -k(\theta) \frac{\partial H}{\partial z}$	$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right]$
Wärme-leitung	$\frac{\partial (c_v T)}{\partial t} = -\frac{\partial j}{\partial z}$	$j = -\lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial z}$	$\frac{\partial (c_v T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial z} \right]$
Diffusion	$\frac{\partial (\theta C)}{\partial t} = -\frac{\partial i}{\partial z}$	$i = -D(\theta) \frac{\partial C}{\partial z}$	$\frac{\partial (\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial C}{\partial z} \right]$

W. Durner, S. C. Iden: V Unsicherheiten in der Ökosystemmodellierung, SS 2011

Input → F(p) → Output

Modellparameter bestimmbar

“Black-Box”-Modell

- Statistische Modelle (z.B. Regression)
- Zeitreihenanalyse



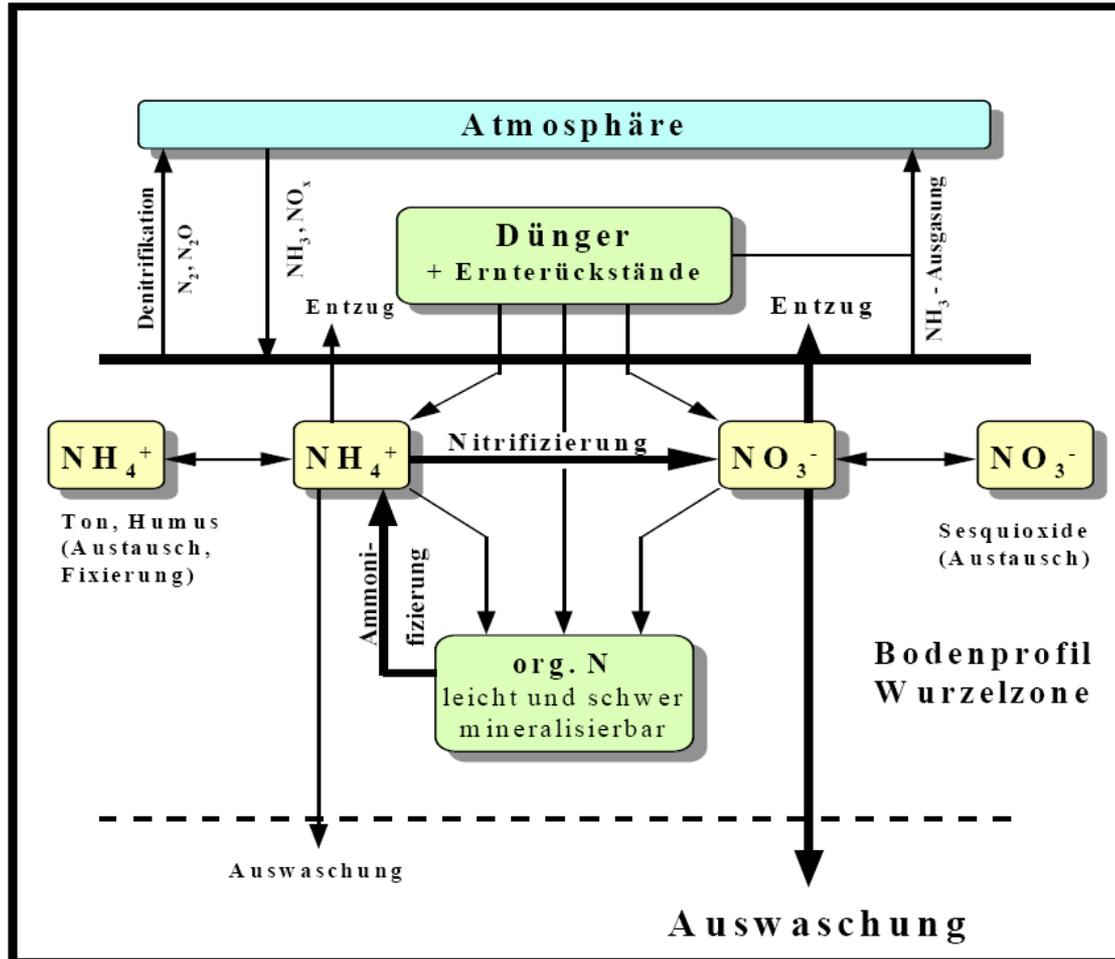
z. B. Pedotransferfunktion:

bodenhydraul. Eigenschaften: Leitfähigkeit

%Sand, %Schluff,....%org. Substanz

“Grey-Box”-Modelle

- häufigster
- wesentlich
- Prozesse u
- Parameter
- Parameter



N-Dynamik landwirtschaftlich genutzter Einzugsgebiete

Modellerstellung

Modellkonzept

- Definition System (Skala)
- Zweck der Modellierung?
- Formulierung konzeptionelles Modell
- Formulierung wesentlicher Zusammenhänge
- lumping /splitting: Vermeidung “Modellsaurier” + übertriebene Zusammenfassung von Einzelprozessen

Modellerstellung

Mathematisches Modell

- Formulierung in Gleichungen
- Parametrisierung der inneren Beziehungen (subskalige Prozesse werden “gelumpt”)

Modellerstellung

Numerisches Modell

- Diskretisierung des mathematischen Modells
- Numerische Lösung (partielle DGL: finite Elemente, finite Differenzen)
- Codierung: höhere Programmiersprache
 - Basic
 - FORTRAN
 - C/C++

Modellerstellung

Diskretisierung

- EULER Verfahren: Simulation auf festem Gitter
- LAGRANGE-Verfahren: Simulation auf beweglichem Gitter
- EULER – LAGRANGE-Verfahren: Mischverfahren, z.B. Lösung der Konvektion

mit Lagrange-Verfahren, Simulation Dispersion mit Euler-Verfahren

Modellerstellung

Simulationsmodell

- Modellinput (Grenzen, Parameter, Def. Anfangszustand, Randbedingungen, Konvergenzparameter, Zeitschrittsteuerung)
- Simulation
- Auswertung Modelloutput
- Präsentation und Interpretation

Fragen?



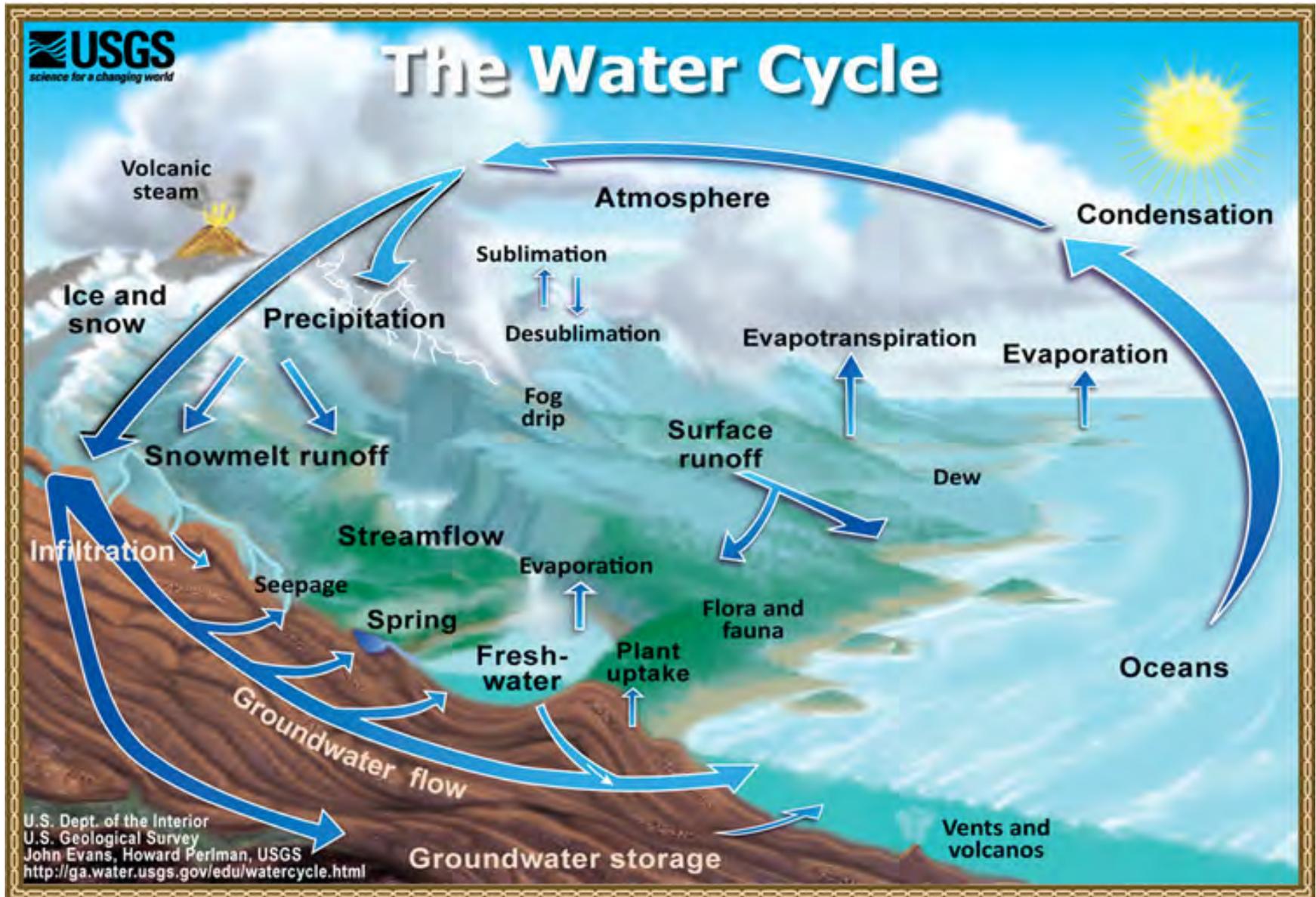
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN



HELMHOLTZ
CENTRE FOR
ENVIRONMENTAL
RESEARCH - UFZ

Basiswissen Hydrologie

Wasserkreislauf



Wasserbilanz

Bilanzierung des Wasserkreislauf eines

Einzugsgebietes:

$$P + G_{in} - (Q + ET + G_{out}) = \Delta S$$

→ generelle Formulierung in der Hydrologie

(Grundsatz: Input = Output + Speicheränderung)

P: Niederschlag

Q: Abfluß

G_{in} : Grundwasserzufluß

G_{out} : Grundwasserabfluß

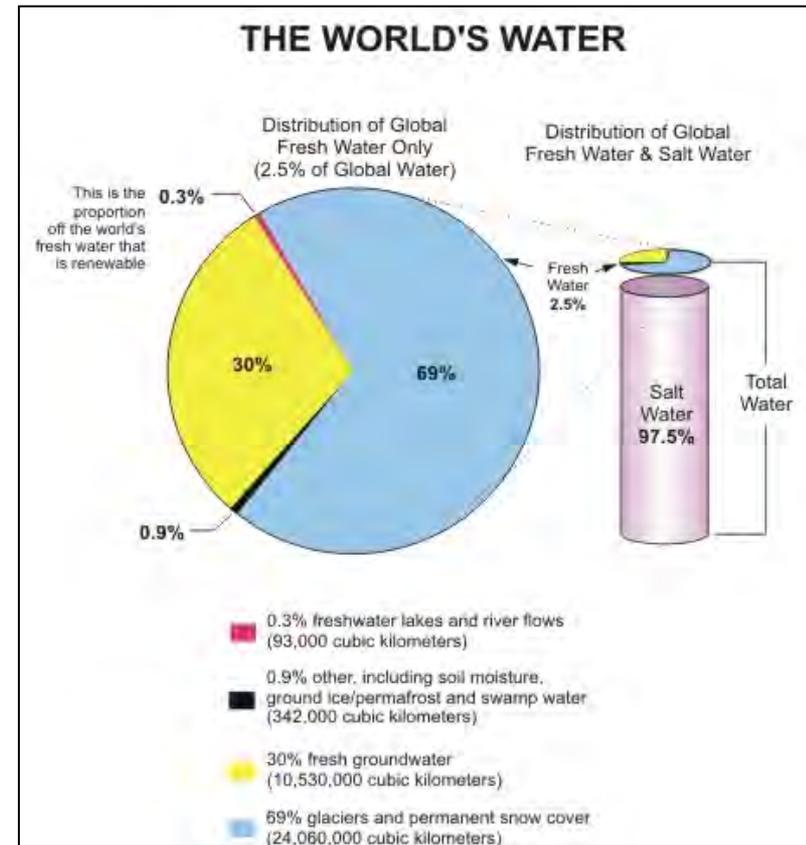
ET: Evapotranspiration

ΔS : Speicheränderung

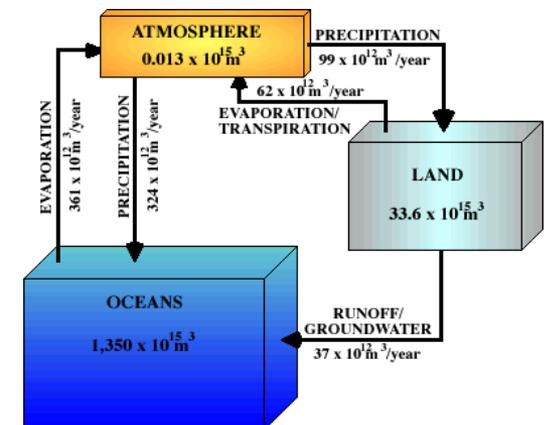
zeitliche Änderung der Komponenten:

Berücksichtigung der Bodenbedingungen,

Vegetationsbedeckung, Landnutzung



Source: desware.net



Source: ww2010.atmos.uiuc.edu

Hydrologie und Hydrogeologie

Ungesättigte Zone (vadose Zone):

- OK: Erdoberfläche, UK: Kapillarraum
- Porenräume zwischen Bodenpartikeln bzw. Porenraum in Rissen + Spalten teils mit Wasser, teils mit Luft gefüllt
- Mächtigkeit: Meter bis mehrere hundert Meter

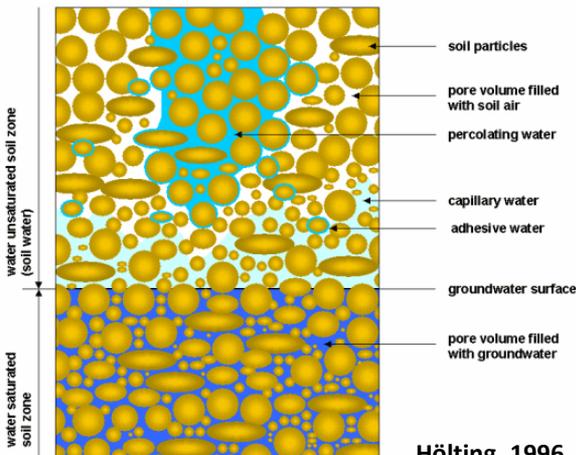


Source: dbstephens.com

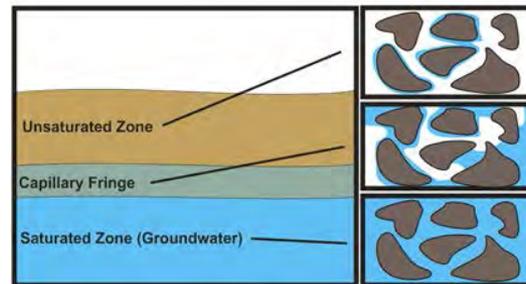
Gesättigte Zone

- Wasser füllt komplett Hohlräume zwischen Gesteins- und

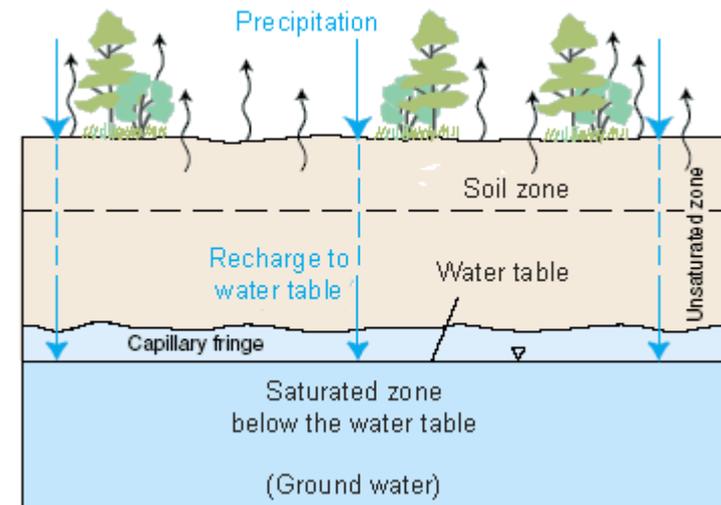
Bodenpartikel



Hörling, 1996



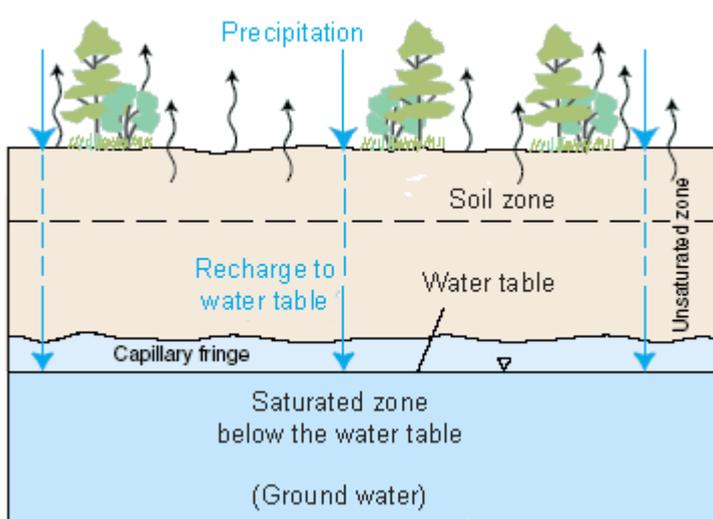
Adini, 2009



Source: USGS

Hydrologie und Hydrogeologie

- Prozessverständnis -



Source: USGS

Prozesse + Parameter, hydrol. Modellierung: **A. Sachse**

Numerik, Grundwasserhydraulik: **O. Kolditz**

Bodenhydrologie: **T. Kalbacher**

Stofftransport im Grundwasser: **M. Walther**

Hydrological response analysis

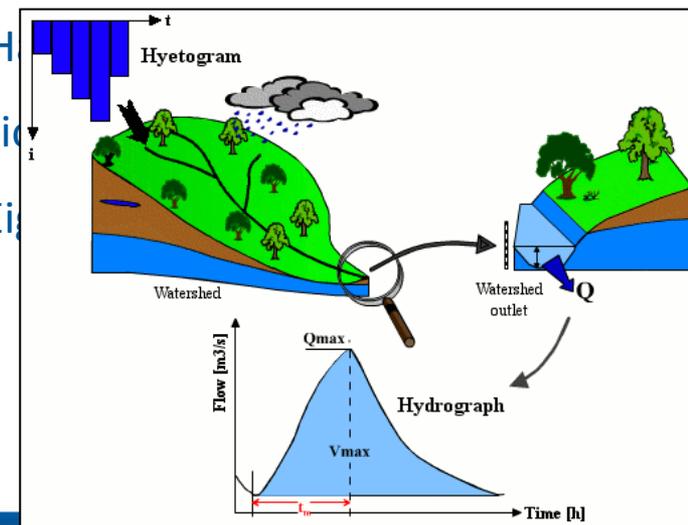
Niederschlag beeinflusst Einzugsgebiet → was ist die hydrologische “Antwort”?

- schnell → Oberflächenabfluss
- verzögert → unterirdischer Abfluss

Hydrologische Reaktion eines Einzugsgebietes wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst, die bezogen sind auf:

- klimatische Bedingungen der Umgebung
- Niederschlag (zeitl. + räuml. Verteilung, Intensität, Niederschlagsdauer)
- Gebietseigenschaften (Profil, Dimension, Hangneigung, H
- physikalische Eigenschaften des UGs (Bodentyp, Vegetation)
- Struktur des Gewässernetzes (Dimension, hydraulische Ei
- Bodenfeuchte

Hydrological response of a catchment (Musy, 2001)



Basiswissen der Hydrologie

- Einzugsgebietscharakteristik
- Hydrologische Parameter (P, ET, Q,....)
- Infiltration (Darcy-Gesetz)
- Bodenwasserspeicherung

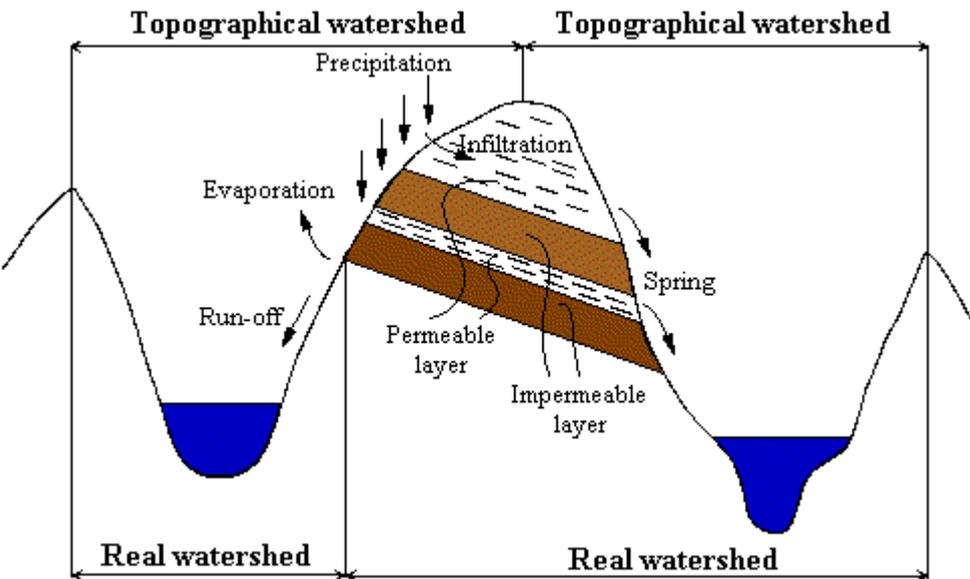


Einzugsgebiets-Charakteristik I

Einzugsgebiet: = Gebiet bzw. die Fläche, aus der ein Gewässersystem seinen Abfluss bezieht

→ Tool für Abgrenzung Einzugsgebiet: ArcGIS

→ Vorlesung am 22.05.2015



Difference between topographical and real (hydrological) watershed (Musy, 2001)

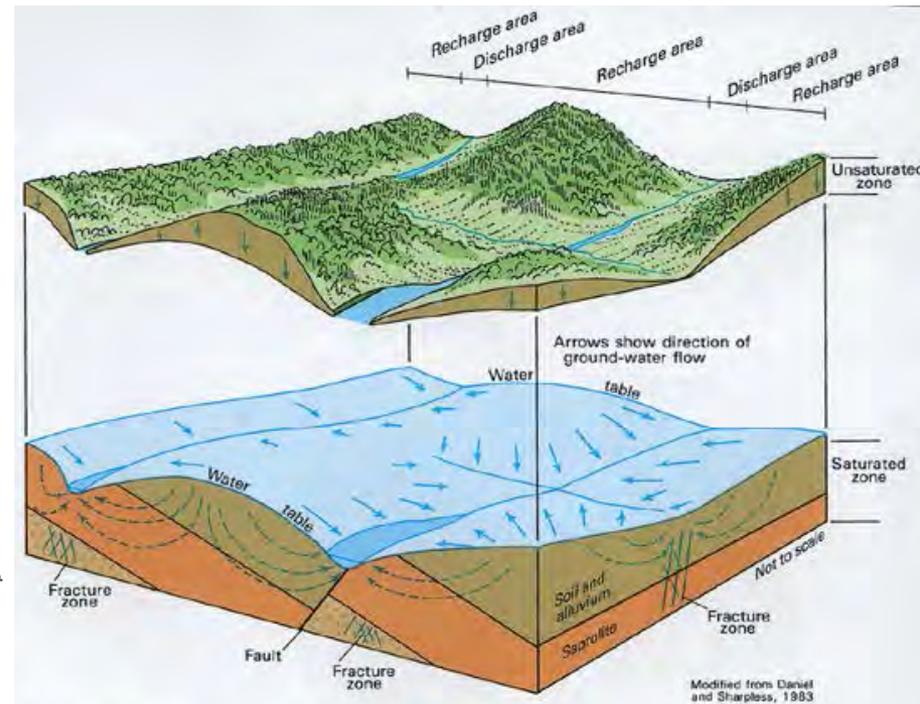


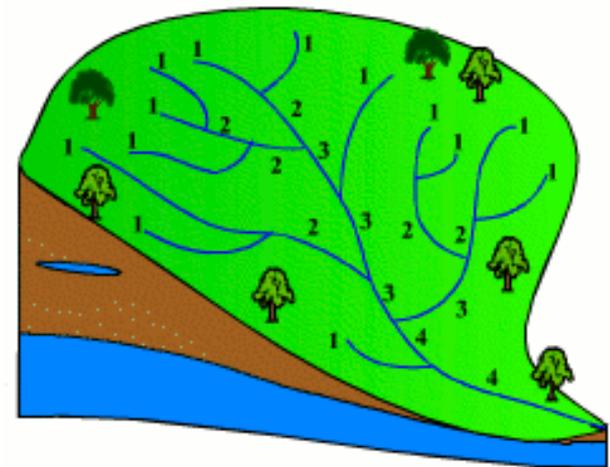
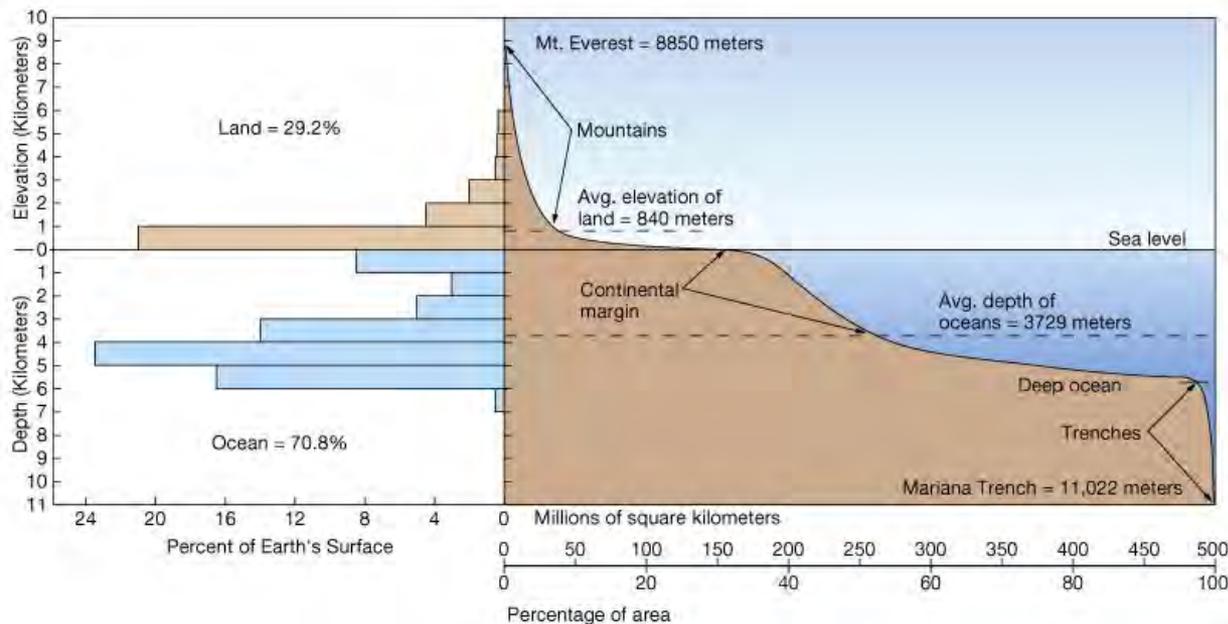
Figure 92. Ground water percolates downward through the unsaturated zone (shown lifted up) to the water table, then moves laterally to discharge points. In the bedrock, the water is channeled through fractures.

Source: USGS

Einzugsgebiets-Charakteristik II

Physikalische Eigenschaften:

- Geomorphologie (Oberfläche, Profil)
- Topographie (hypsografische Kurve, Hangneigung, Höhe, Exposition)
- Hydrographie (Strahler: Flussordnung)
- Agro-Pedo-Geologischen Faktoren (Boden, Vegetation, Geologie)



Strahler's system of hydrographic network classification (Musy, 2001).

Hypsografische Kurve der Erde.

Source: <http://wps.prenhall.com/>

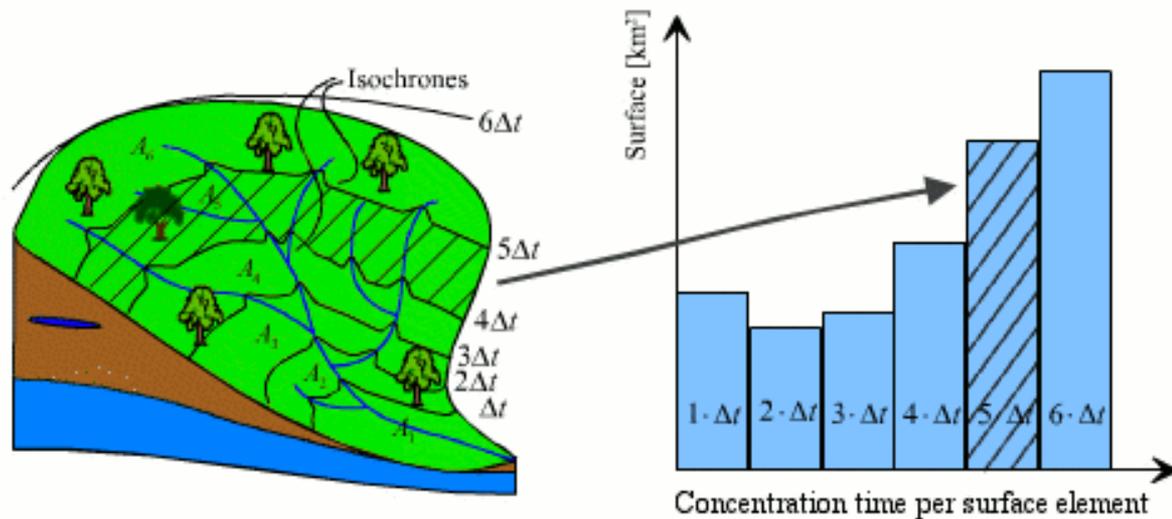
Einzugsgebiets-Charakteristik III

Hydrologische Eigenschaften:

Konzentrationszeit (time of concentration):

- die Zeit, die das Wasser aus dem hydraulisch entferntesten Punkt in einem Einzugsgebiet zum Einzugsgebietsauslass benötigt, in der Regel in Stunden
- abhängig von Vorfeuchte, Abfluß, Laufzeit

Isochrone (=Linien gleicher Zeit)



Representation of isochrones from a watershed (Musy, 2001).

Hydrologische Parameter

Niederschlag

Niederschlagstypen: Tau, Regen, Eis, Schnee, Hagel, Nebel

Globalverteilung des Niederschlages:

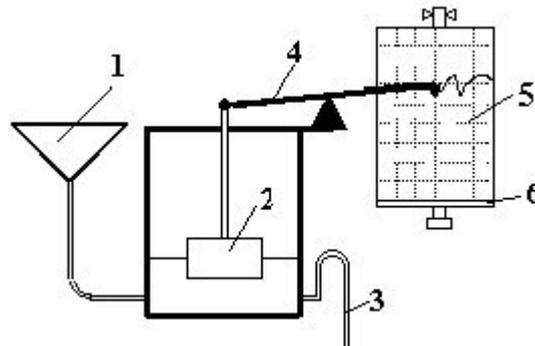
- abhängig von geograph. Faktoren (Äquatorzonen, subtropische Zonen, Monsun, arktische Gebieten)

Messmethoden:

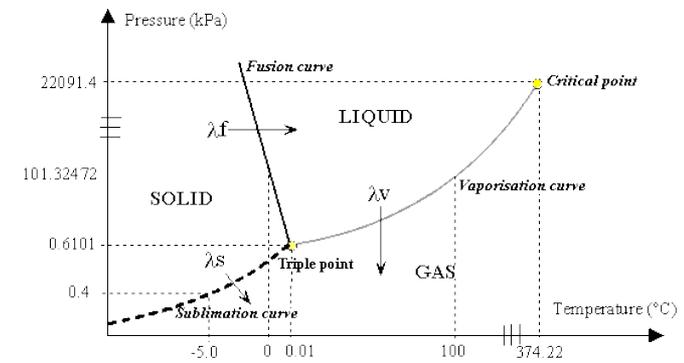
- Regenmesser
- Regenschreiber
- Niederschlagswaage
- meteorologisches Radar



Hellmann Rain Gage (Pluviometer)

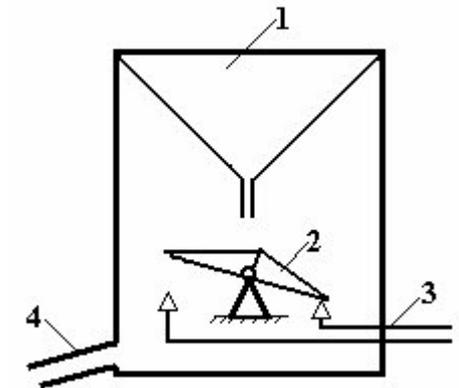


The graphic rain gauge. 1-receiver; 2-floater; 3-siphon; 4-recording needle; 5-drum with diagram; 6-clock mechanism.



The transformation phases of the water

$$\frac{1 \text{ l}}{1 \text{ m}^2} = \frac{1 \text{ dm}^3}{1 \text{ m}^2} = \frac{10^{-3} \text{ m}^3}{1 \text{ m}^2} = 10^{-3} \text{ m} = 1 \text{ mm}$$



The tele-rain-gauge. 1 - collecting funnel, 2- tilting baskets; 3- electric signal; 4 -evacuation.

Hydrologische Parameter

Evaporation und Transpiration I

Evaporation:

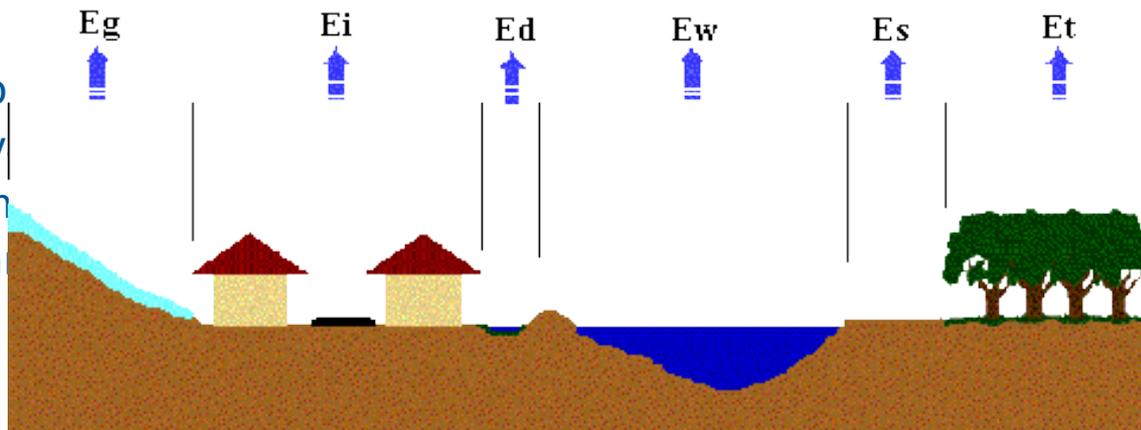
- Prozess, bei dem Wasser aus offenen Wasserflächen (Ozeane, Meere, Seen und Flüsse), von unbedecktem Boden und von bedeckten Oberflächen (Schnee und Gletscher) in dampfförmigen Zustand übergeht
- meteorologischen Einflussfaktoren der Verdunstung: verfügbare Wassermenge, Sonneneinstrahlung, Luftdruck und Wind-, Wasser- und Lufttemperatur, Luftfeuchte

Transpiration:

- Prozess, der die Verdunstung von Wasser über die Spaltöffnungen in den Blättern der Pflanzen beschreibt

Evapotranspiration

- Summe aus Evaporation und Transpiration
- Wassermenge, die in Form von Wasserdampf in die Atmosphäre verdunstet



Summe an Wasserdampf, die in die Atmosphäre verdunstet

The components of evapotranspiration

Hydrologische Parameter

Evaporation und Transpiration II

Verdunstungsberechnung

- Empirische und semi-empirischen Formeln
- physikalisch basierte Berechnungsverfahren
 - Penman (1948) – Aerodynamisch Ansatz:

$$ET_0 = \frac{R_n \cdot \Delta + \frac{\rho \cdot c_p \cdot \delta e}{r_a}}{\lambda(\Delta + \lambda)}$$

Penman-Monteith:

$$ET_0 = \frac{R_n \cdot \Delta + \frac{\rho \cdot c_p \cdot \delta e}{r_a}}{\lambda \left[\Delta + \lambda \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right) \right]}$$

wobei:

Rn	net solar radiation [W/m ²]
Δ	Rate of change of saturation specific humidity with air temperature
λ	Psychrometric constant (vaporization constant heat at constant pressure, (= 2.45 [MJ/kg]))
ρ	air volume mass [kg/m ³]
δe	humidity deficit [kPa]
cp	Specific heat capacity of air (J kg ⁻¹ K ⁻¹)
ra	aerodynamic resistance [s/m]
rs	diffusion resistance of evaporation surface [s/ m]

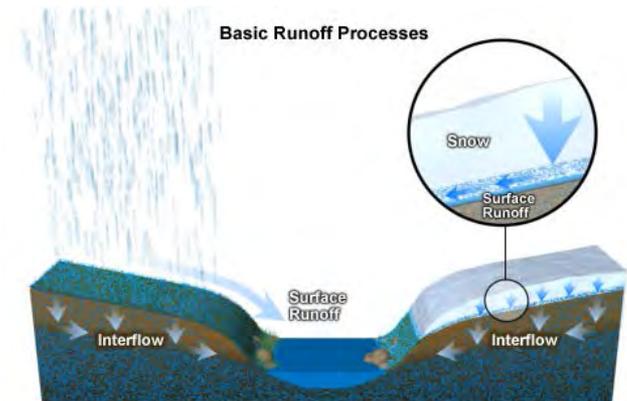
- notwendig: Tagesmitteltemperatur , Windgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit und Sonneneinstrahlung
- Monteith (1981) hat Penman Formel durch Verwendung des Effekts des Diffusionswiderstandes an der Verdampfungsoberfläche verbessert (Serban, Stanescu, Roman, 1989)

Hydrologische Parameter

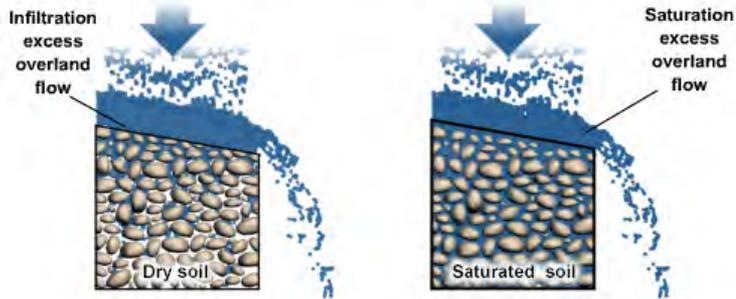
Abfluss I

Abflusstypen:

- oberirdischer Abfluss (Overland Flow)
- unterirdischer Abfluss (Lateraler Abfluss, Interflow)
- Basisabfluss (Stream Flow)

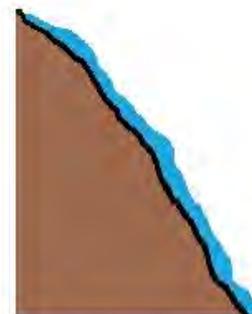


Types of Surface Runoff

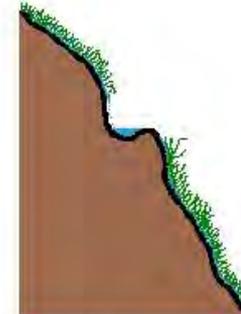


Note: Enlarged soil particles are not drawn to scale.

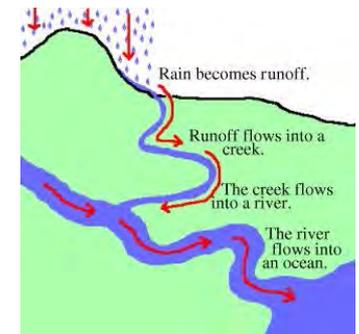
©The COMET Program



Bare ground has a great deal of runoff.

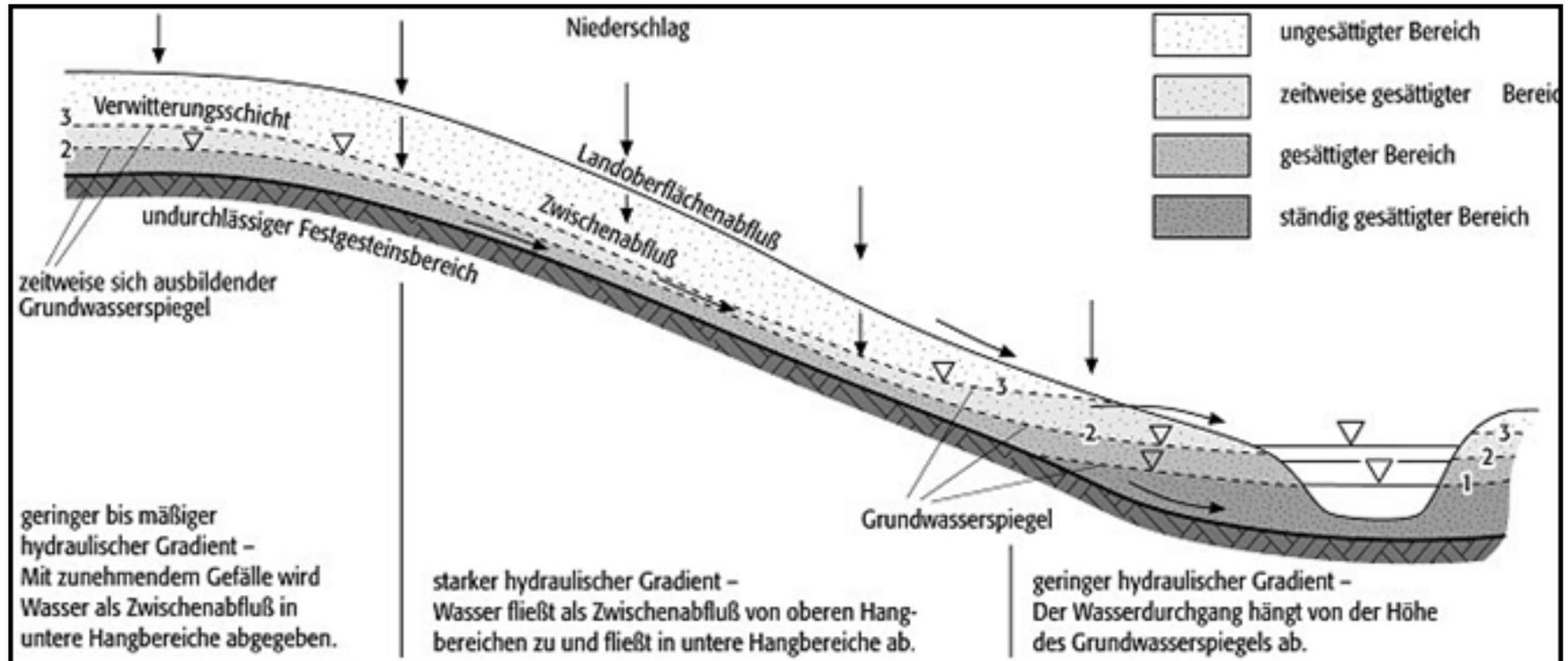


Vegetation and ponds reduce runoff.



Exkurs: Abflussentstehung in der Landschaft

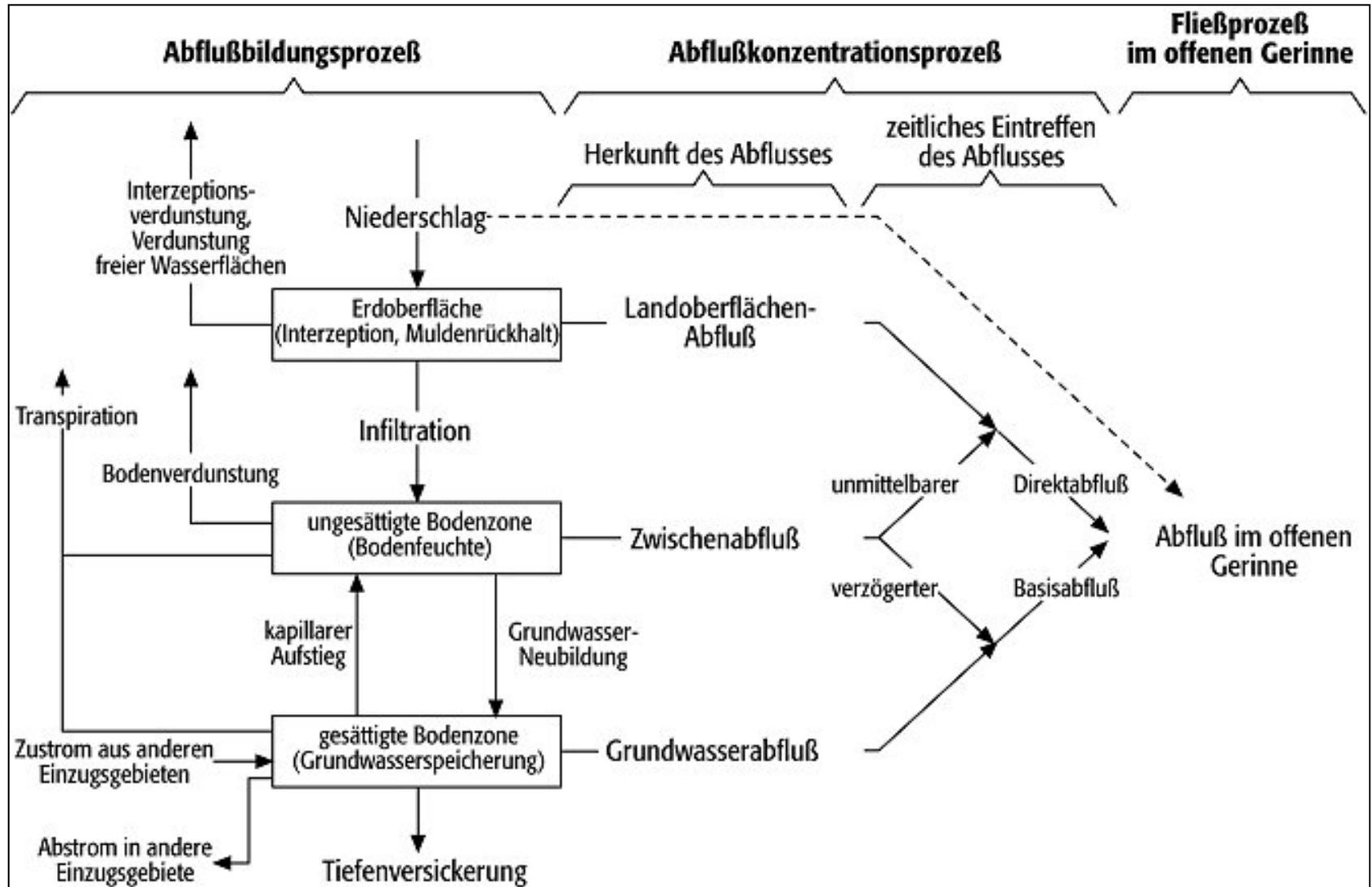
Abflussentstehung in der Landschaft



Quelle: spektrum.de

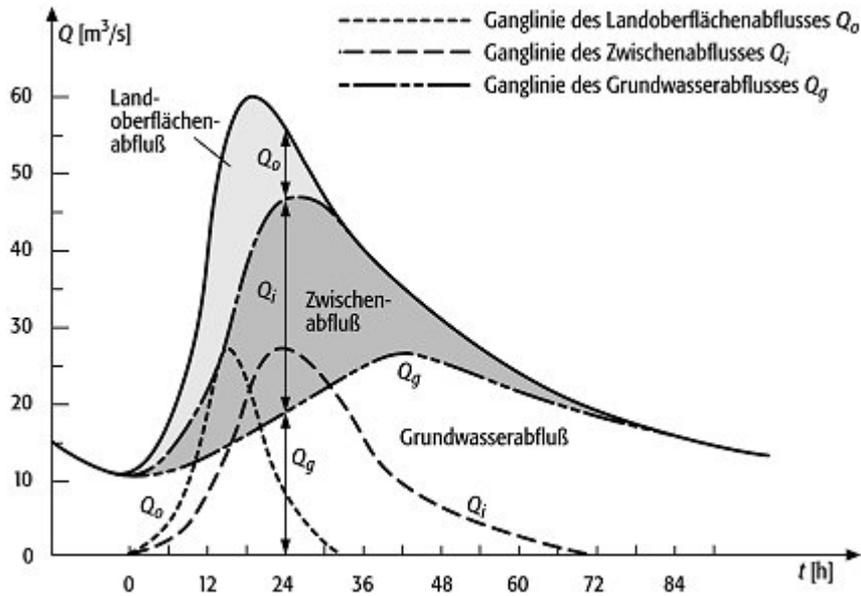
Zusammensetzung einer Abflußganglinie aus ihren Komponenten Landoberflächenabfluß, Zwischenabfluß und Grundwasserabfluß.

Abflussentstehung in der Landschaft

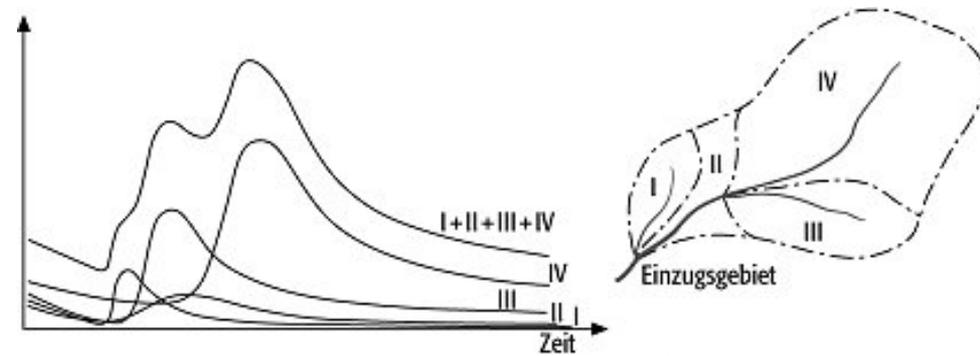


Quelle: spektrum.de

Abflussganglinie



Quelle: spektrum.de



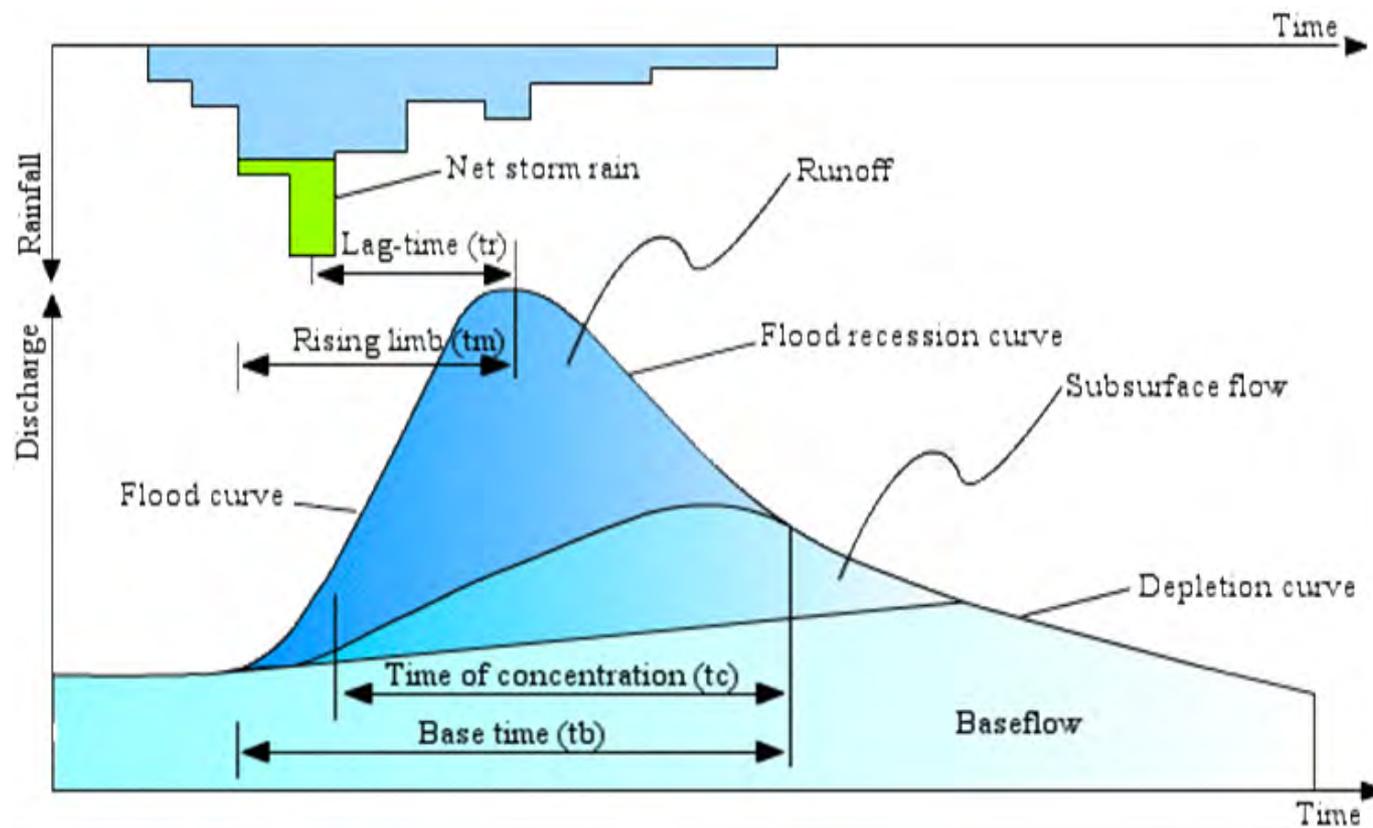
Quelle: spektrum.de

Hydrograph: zeigt Gerinneabfluss eines Fließgewässers im Zeitverlauf

Entstehung einer Durchflußganglinie aus Zuflüssen von Teilbereichen des Einzugsgebietes.

schnelle + langsame Komponente Q

Eigenschaften von Abflussganglinien



Hyetogram and hydrograph resulting from a storm event (rain - flow) (Musy, 2001).

Oberflächenabfluss



Von einer konventionell gepflügten Ackerfläche (Kartoffeln) stammender Oberflächenabfluss während eines extremen Niederschlagsereignisses beim Eintritt in einen Bach.

Oberflächenabfluss, oberirdischer Abfluss, (surface runoff) [m^3/s]: Teil des Abflusses, der dem Vorfluter als Reaktion auf ein auslösendes Ereignis (Niederschlag oder Schneeschmelze) über die Bodenoberfläche unmittelbar zufließt.

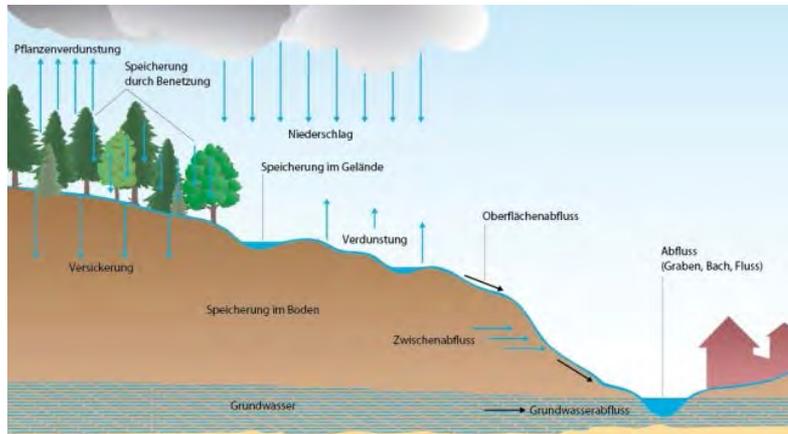


Quelle: sachsen.de

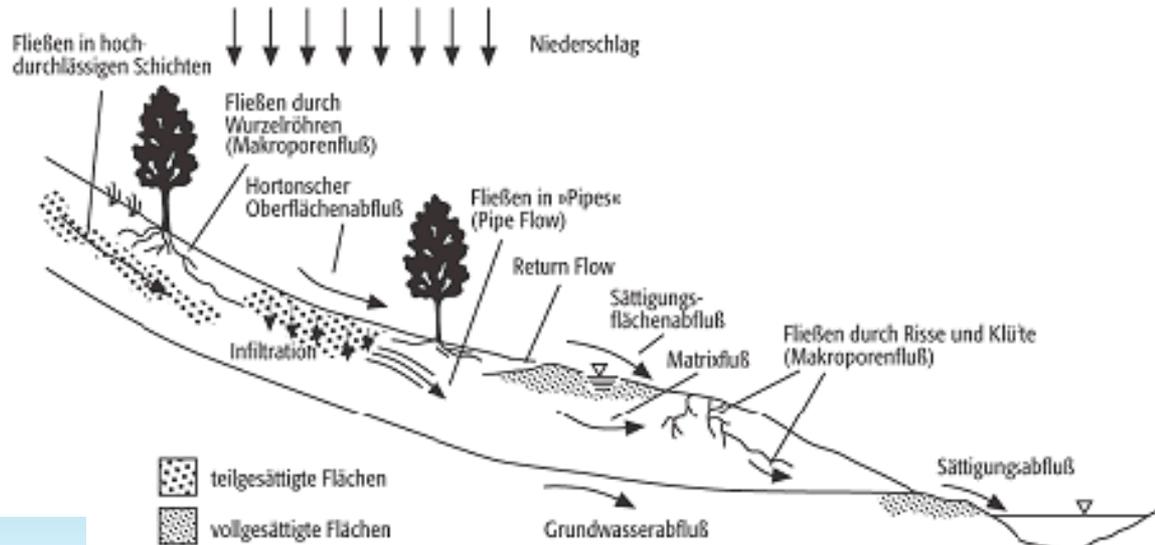
Vermindertes Infiltrationsvermögen des Bodens auf dem Vorgewende infolge einer Schadverdichtung

Zwischenabfluss

Zwischenabfluss (interflow) [m^3/s]:
 Teil des Abflusses, der dem Vorfluter
 als Reaktion auf ein auslösendes
 Ereignis aus den oberflächennahen
 Bodenschichten zufließt.



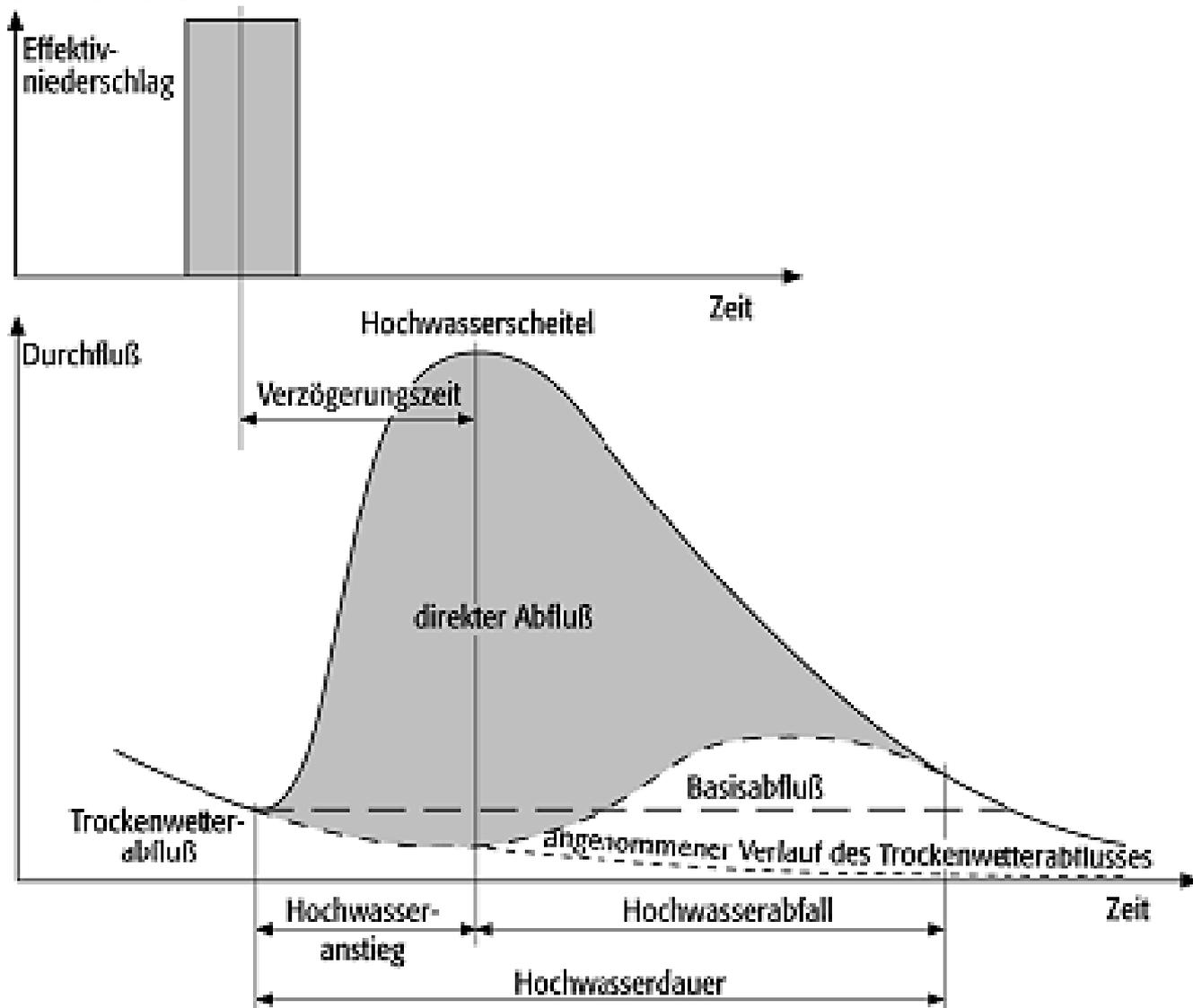
Grafik: Claus J. Lienau, München



http://www.geodz.com/deu/d/images/2603_zwischenabfluss.png

schematische Darstellung der sich in einem
 Hang abspielenden und zum Zwischenabfluss
 führenden Prozesse.

Basisabfluss



http://www.geodz.com/deu/d/images/1301_hochwasserganglinie.png

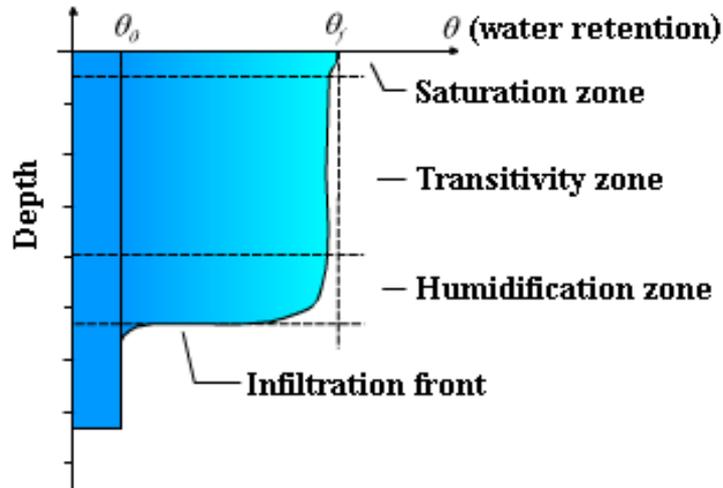
Infiltration I

Infiltration:

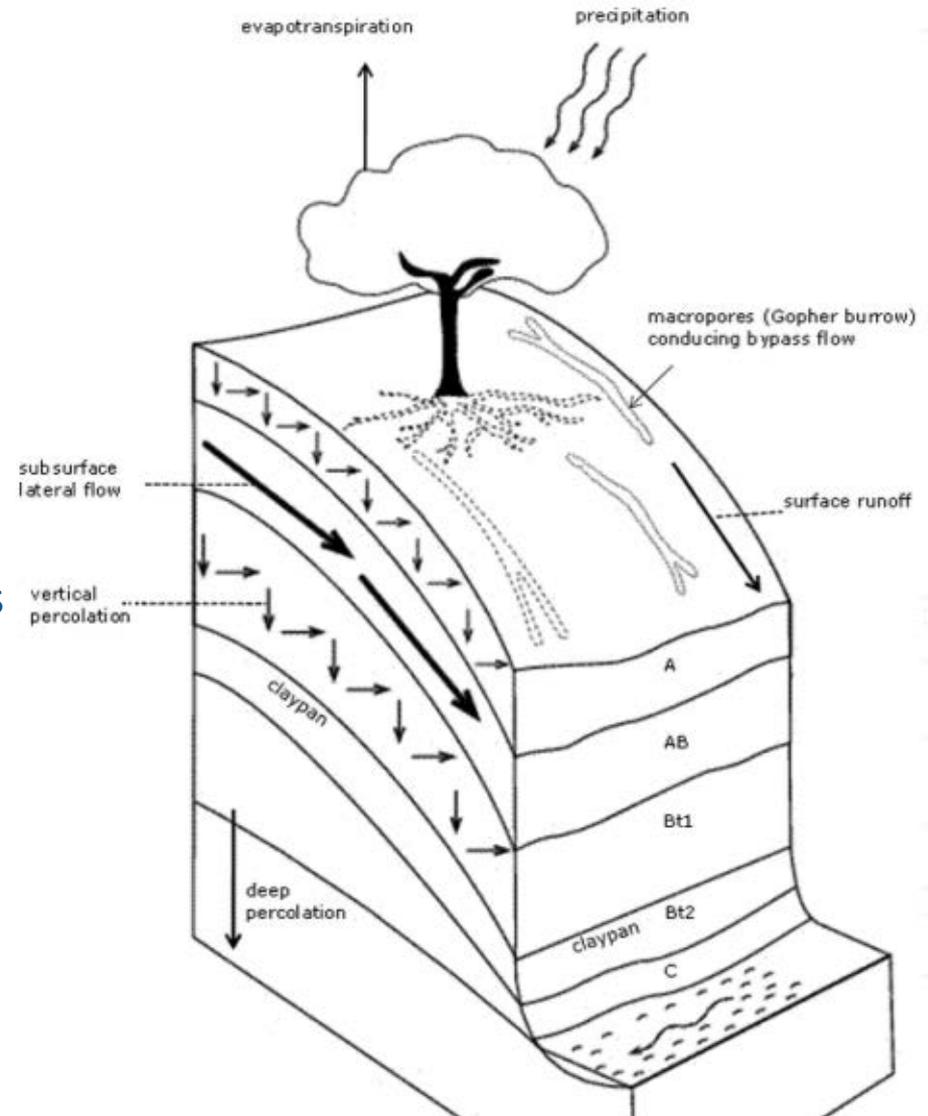
- ist der Wasserfluss durch die Bodenoberfläche in einem porösen Medium unter Schwerkraftwirkung und Druckeffekten

Perkolation:

- vertikale Wasserströmung in den Böden (poröse ungesättigten Zone) unter Einfluss der Schwerkraft



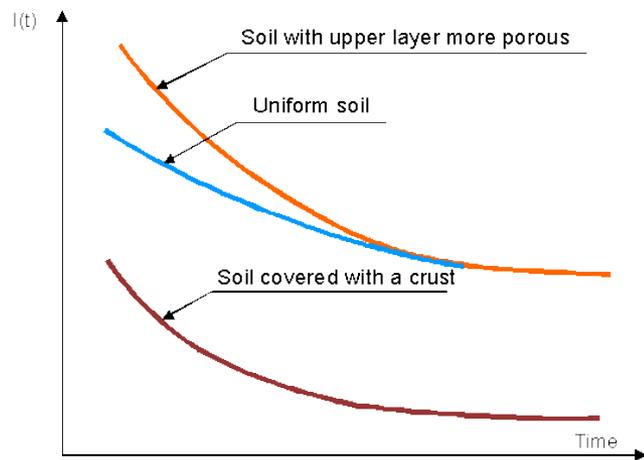
Characteristics of the hydric profile during infiltration (Musy, 2001).



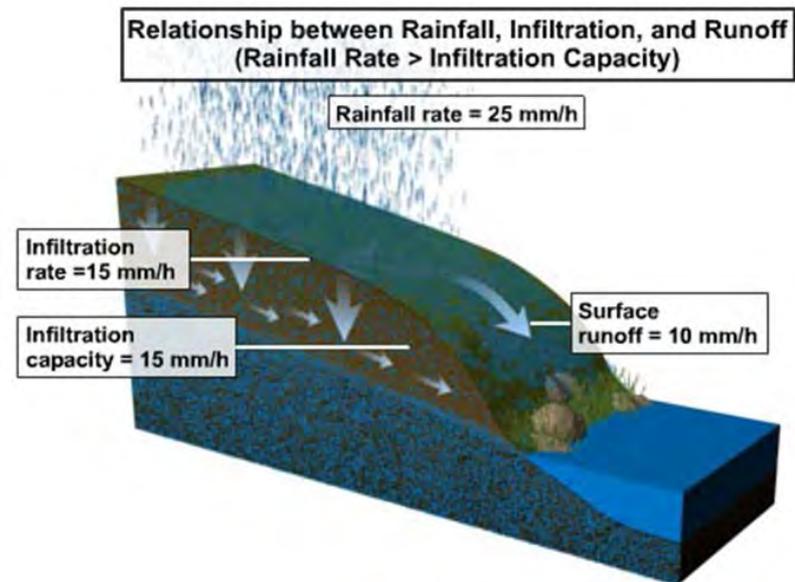
Conceptual diagram of a soil profile illustrating the multiple flow paths through which water moves through soil (Modified from O'Geen et al. 2010)

Infiltration: kontrollierende Faktoren

- Niederschlag (Menge, Intensität, Dauer)
- Bodeneigenschaften (Bodenverdichtung durch Regentropfen + andere Effekte)
- initiale Bodenfeuchte
- Bodentyp (Textur, Struktur, hydrodynamische Eigenschaften Boden- und Landbedeckung → Verzögerung der Infiltration)
- Topographie und Hangmorphologie
- Evapotranspiration



The infiltration regime depending on time for different types of soil (Musy, 2001).

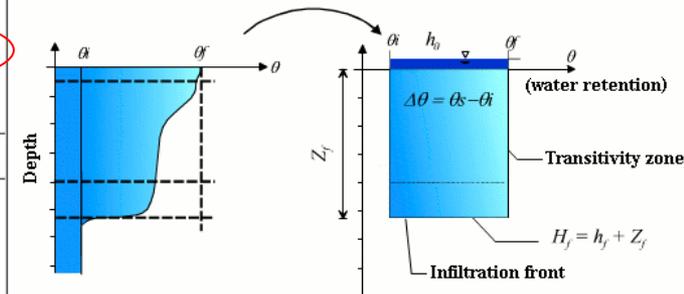


Infiltration – Modellansätze zur Berechnung

Berechnungsverfahren: Physikalisch basierte Modellansätze

- beschreiben in vereinfachter Weise die Wasserbewegung im Boden, vor allem der horizontalen Feuchte-Front, abhängig von bestimmten physikalischen Parameter

Author	Function	Legend
Horton	$i(t) = i_f + (i_0 - i_f)e^{-\gamma t}$	$i(t)$ - infiltration capacity during time [cm/s] i_0 - initial infiltration capacity [cm/s] i_f - final infiltration capacity [cm/s] γ - constant depending on the soil type
Kostiakov	$i(t) = i_0 t^{-\alpha}$	α - parameter depending on soil conditions
Dvorak-Mezenцев	$i(t) = i_0 + (i_1 - i_0)t^{-b}$	i_1 - infiltration capacity at time t=1min [cm/s] t - time [s] b - constant
Holtan	$i(t) = i_f + cw \left[(IMD) - F \right]^n$	c - factor variable from 0.25 to 0.8 w - Holtan equation flow factor n - experimental constant approximately = 1.4
Philip	$i(t) = \frac{1}{2} s t^{-0.5} + A$	s - sorptivity [cms ^{-0.5}] A - gravity component depending on hydraulic conductivity at saturation [cm/s]
Dooge	$i(t) = \alpha (F_{max} - F_t)$	α - constant F_{max} - maximal retention capacity F_t - water quantity retained on soil at time t
Green&Ampt	$i(t) = k_s \left(1 + \frac{h_0 - h_f}{z_f(t)} \right)$	k_s - hydraulic conductivity at saturation [mm/h] h_0 - surface pressure load [mm] h_f - pressure load at the humidity front [mm] z_f - humidity front depths [mm]



Schema des Infiltrationsprozess nach Green und Ampt (Musy,2001).

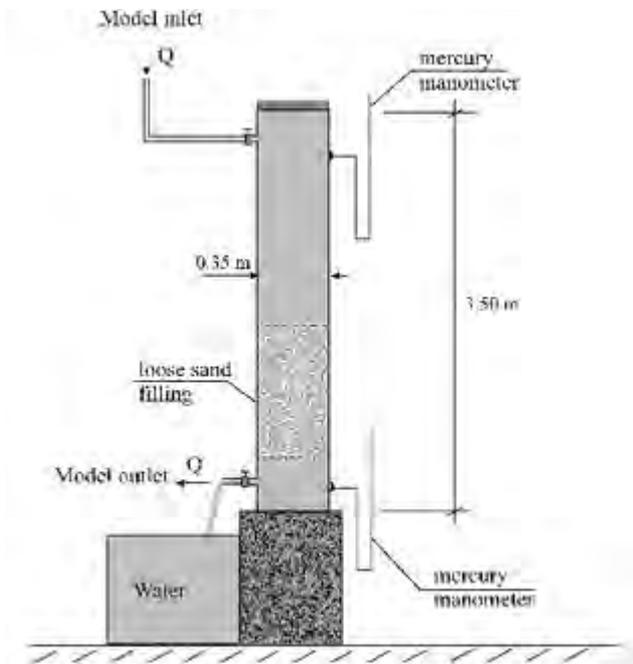
Hypothese:

- Feuchtefront ist exakt definiert;
- Übergangszone , in der in Zeit und Raum Wasserspeicherung und hydraulische Leitfähigkeit konstant sind;
- Saugspannung der Feuchtefront ist konstant

Hydraulische Durchlässigkeit: Darcy's Experiment

Henry Darcy (1803-1858):

- französischer Wasserbauingenieur
- Auftrag: Wasserwerke in Dijon zu vergrößern und zu modernisieren
- verwendete Sandfilter zur Klärung des Wassers
- entwarf vertikalen Versuchstank um Wasserfluss zu untersuchen
- Behälter von 3,50 m Höhe (kreisförmigen Querschnitt) ist im unteren Teil auf einer Höhe von 1 m mit porösem Material (Sand) gefüllt
- Wasserzulauf (unter Druck) in dem oberen Teil nach unten im Behälter
- nach gewisser Zeit nach Beginn des Versuchs werden alle Poren mit Wasser gefüllt und Zuflussrate gleich Ausflussrate
- Wasserdruck wird an jedem Ende durch Piezometer gemessen
- Energieverlust tritt auf, wenn Wasser durch poröses Medium strömt → Folge: Wasserdruckabfall über dem Sandfilter kann beobachtet werden



Darcy's apparatus

Source: echo2.epfl.ch:

Hydraulische Durchlässigkeit: Darcy-Gesetz

empirische ermittelte Gesetzmäßigkeit der Strömungsmechanik,
spezielle Lösung der Navier-Stokes-Gleichung

wobei:

q flächenbezogene Durchflussrate (Darcy Geschw.) [m/s]

Q ... Durchflussrate [m³/s]

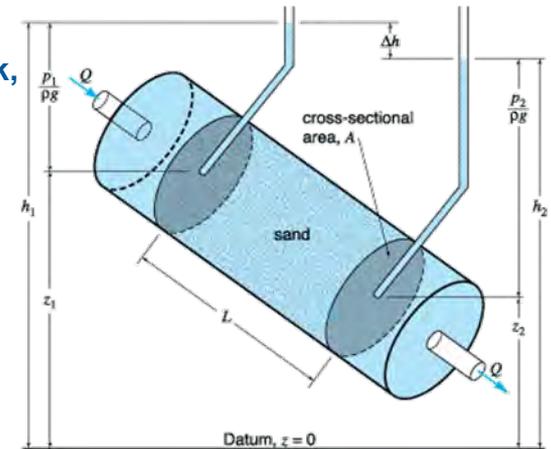
A ... Querschnittsfläche [m²]

K ... hydraulische Leitfähigkeit [m/s]

Δh ... Differenz der Standrohrspiegelhöhe [m]

L ... Länge des durchströmten Mediums [m]

$$q = \frac{Q}{A} = -K \frac{\Delta h}{L}$$



Source: hercules.gcsu.edu

Gesättigter Boden:

- Darcy-Gesetz postuliert, dass Geschwindigkeit des Wasserflusses durch Bodenzone proportional ist zum hydraulischen Gradienten

Ungesättigter Boden:

- Anwendung auch für laminare Strömung durch ungesättigten Boden
- der Permeabilitätskoeffizient (Wasserdurchlässigkeit) in einem ungesättigten Boden kann im Allgemeinen nicht als konstant angenommen werden → deshalb Variable, die in Abhängigkeit vom Wassergehalt oder der Matrixspannung gültig ist → **Richards Gleichung**
- die Geschwindigkeit der Wasserströmung durch einen ungesättigten Boden ist linear proportional zum hydraulischen Gradienten

Bodenwasserfluss: Darcy-Gesetz

Henry Darcy (1803–1858): Immortalised by his scientific legacy

Craig T. Simmons

Keywords Profiles · History of hydrogeology · Henry Darcy · Darcy's Law · France · Dijon

Introduction

Darcy's Law is the fundamental equation describing the flow of fluid through porous media including groundwater. It forms the quantitative basis of many science and engineering disciplines including hydrology, hydrogeology, soil science, civil engineering, petroleum engineering and chemical engineering. The year 2006 marked the 150th anniversary of the publication of Henry Darcy's most famous text *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon* (The Public Fountains of the City of Dijon; Darcy 1856). Buried in its depths was Note D, an appendix that contained the famous sand column experiments and the discovery of Darcy's Law—a discovery that marked the birth of quantitative hydrogeology.

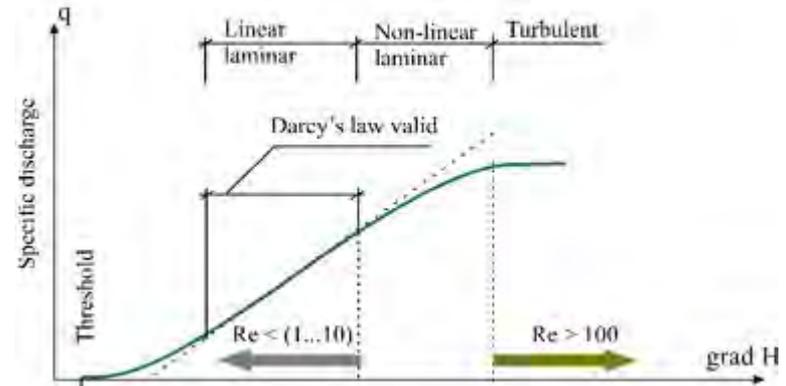
This article describes the many contributions Darcy made to hydraulics, including Darcy's Law. But what many hydrogeologists may not realise is that Darcy made other contributions to science and engineering that are possibly less familiar. He was the first to describe aquifer resistance, he furnished the very first evidence of the fluid boundary layer, he made major contributions to pipe hydraulics as evidenced by the joint naming of the commonly used Darcy-Weisbach pipe friction equation, he clearly understood the nature of laminar/turbulent flow regimes and recognised the similarity of his law to Poiseuille flow. Many of these experimental observations were facilitated by improvements Darcy made to the Pitot tube that both yielded its modern design and allowed for more accurate measurements of the pipe fluid flow velocity distribution. Finally, not only did Darcy discover Darcy's

Law, he was the first to combine it with continuity to develop the falling head permeameter solution that is still used today. He also applied that unsteady solution to the analysis of spring discharge. Whilst Darcy is immortalised by Darcy's Law, it is clear that his scientific legacy extends beyond it.

Darcy's contributions to engineering science are described in this article. A brief historical account of Darcy's life is provided in order to place them within the necessary critical historical context and to provide some accompanying insights on Darcy's life, personality and motivations. A detailed description of Darcy's contributions to science and engineering is then presented. A number of excellent papers written recently by Brown (2002a, 2002b, 2003) form the basis for this analysis. Finally, a brief discussion of hydrogeology in the post-Darcy years shows that Darcy's Law was applied almost immediately after its discovery to the problem of radial flow to a well, first treated by Dupuit (1863). It is here that Darcy's Law was first applied to a hydrogeologic problem that resembles a modern day aquifer analysis. The use of Darcy's Law in formalising the foundations for modern day quantitative hydrogeology is also described. It is shown how these early fundamental contributions followed as either a direct consequence of Darcy's Law or the immediate application of it.

Darcy's life: a brief historical perspective

Henry Philibert Gaspard Darcy was born on 10 June 1803 in Dijon, France, and died in Paris on 3 January 1858. He spent most of his life stationed in his native town of Dijon working as an engineer. A large body of available literature provides compelling evidence in support of the claim that Darcy was a great scientist, engineer and a selfless citizen. There have been a number of historical analyses that lend insight into Darcy's work and times (e.g., de Caudenberg 1858; Marsaines 1858; his great-nephew, Paul Darcy 1957; Hubbert 1969; Freeze 1983; Freeze 1994; Philip 1995; Brown 2002a; Simmons 2003; and Bobeck 2003) and some recent reviews/commentaries of Bobeck's recently released complete English translation of *Les Fontaines* (Bobeck 2004) by Simmons (2004) and Sharp and Simmons (2004). Copies of Darcy's original 1856 monograph are very rare, and few scientists have ever seen it but the new translation fills that void. Bobeck (2006) describes insights gained into the personality of Henry Darcy from the English translation (Bobeck 2004). Numerous examples clearly illustrate "Darcy's intellectual curiosity, his compassion for the poor, his fairness and



Range of Darcy's Law depending on Reynolds number (Re)

Source: echo2.epfl.ch

Received: 26 November 2007 / Accepted: 7 April 2008
Published online: 17 July 2008

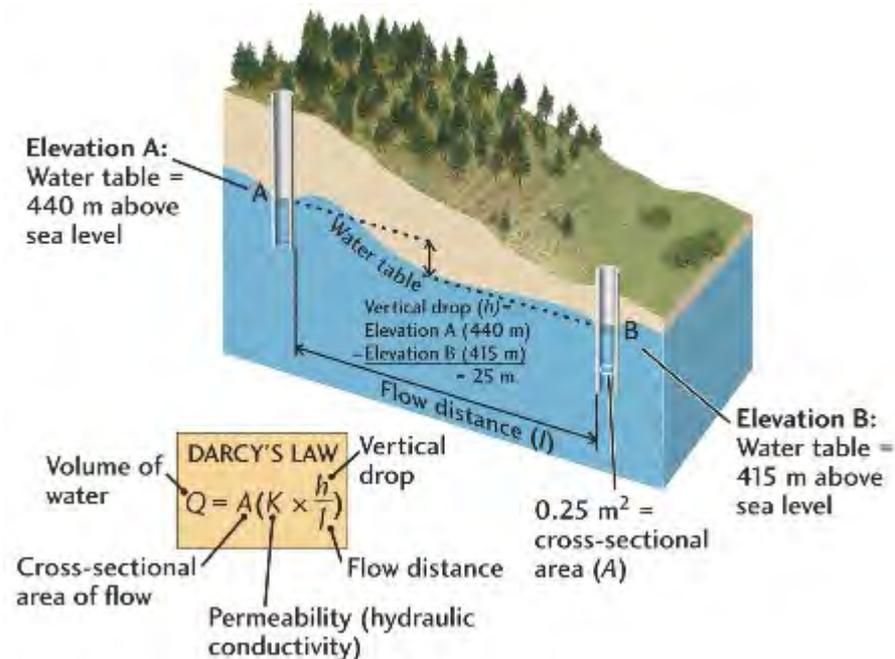
© Springer-Verlag 2008

Some material was originally published in *Aquifer Systems Management: Darcy's Legacy in a World of Impending Water Shortage*, edited by Laurence Chery and Ghislain de Marsily. ISBN:9780415443555. Published by: Taylor & Francis, The Netherlands, 2007. Reprinted with permission from the publisher.

C. T. Simmons (✉)
Flinders University,
GPO Box 2100, Adelaide, SA 5001, Australia
e-mail: craig.simmons@flinders.edu.au

Hydrogeology Journal (2008) 16: 1023–1038

DOI 10.1007/s10040-008-0304-3



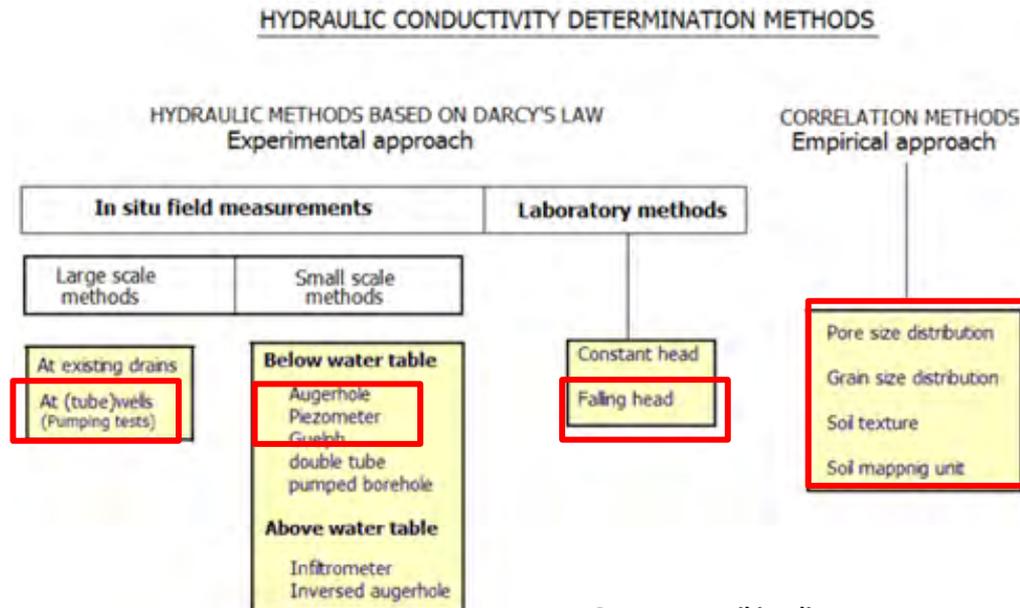
Permeabilität – Hydraulische Leitfähigkeit

Permeabilität:

- die Fähigkeit eines Mediums (Boden, Gestein), Wasser oder Gas durchzuleiten
- hohe Permeabilitäten ermöglichen Flüssigkeiten und Gasen sich schnell durch Böden, Gesteine zu bewegen
- hängt nur Materialeigenschaften des porösen Mediums ab

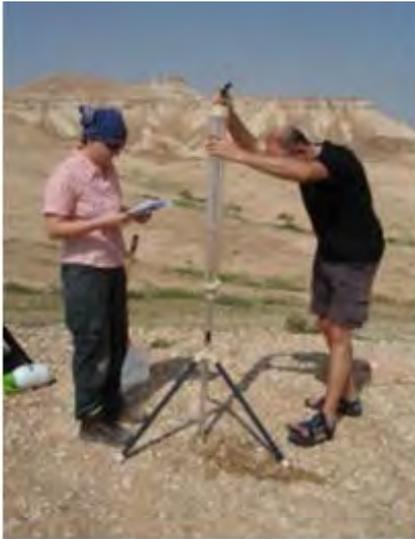
hydraulische Leitfähigkeit:

- der Permeabilitätskoeffizient (oder hydraulische Leitfähigkeit) quantifiziert auch die Durchlässigkeit von Boden-oder Gestein
- abhängig auch von Dichte und Viskosität der Flüssigkeit, die durch das Medium fließt

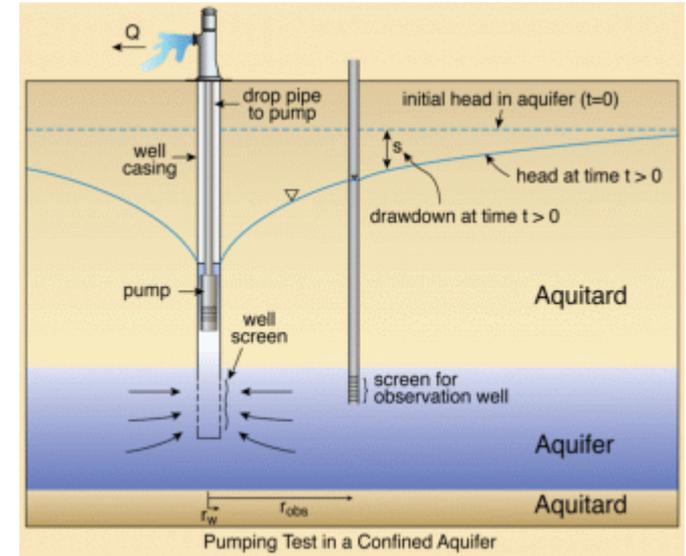


Source: en.wikipedia.org

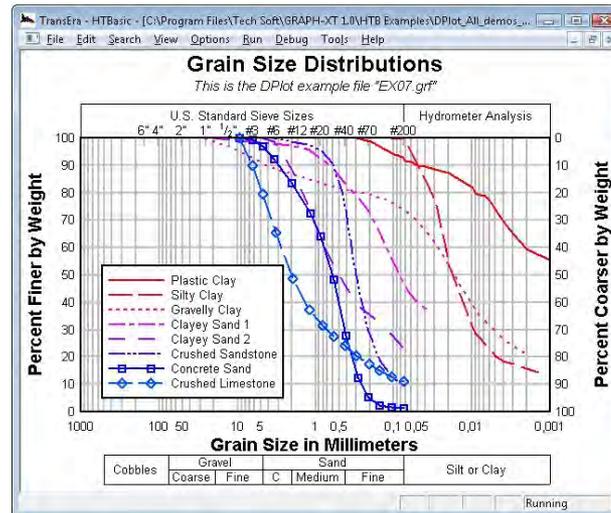
Permeabilität – Hydraulische Leitfähigkeit



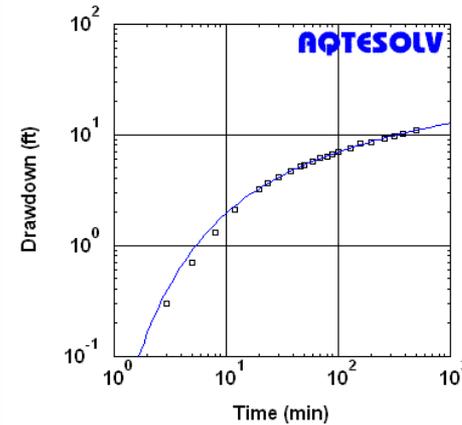
Quelle: demopark.de



Quelle: midwestgeo.com



Quelle: techsoft.de

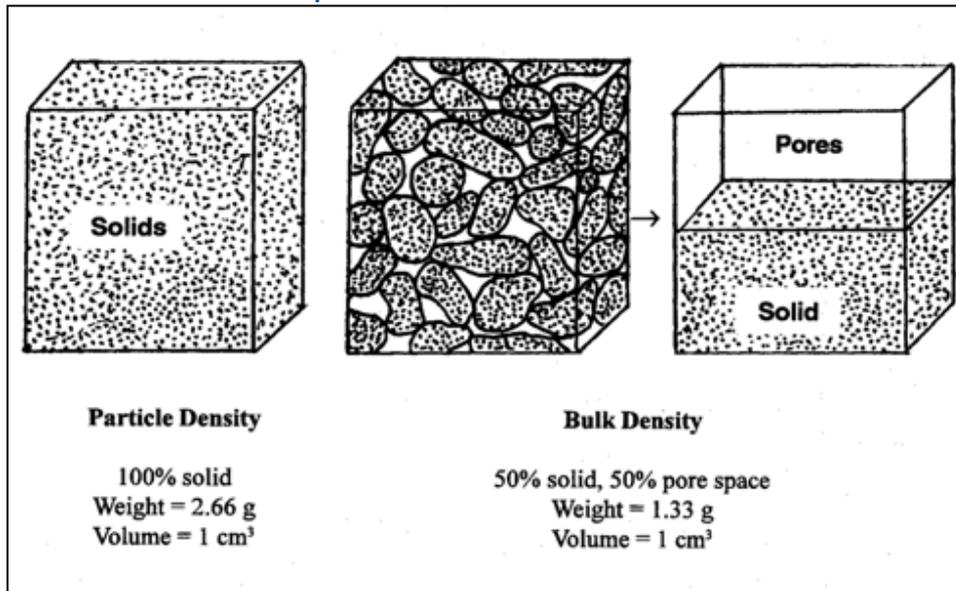


- Obs. Wells
- Well 1
- Aquifer Model
- Confined
- Solution
- Theis
- Parameters
- T = 1.01E+4 gal/day/ft
- S = 2.0E-5
- Kz/Kr = 1.
- b = 18. ft

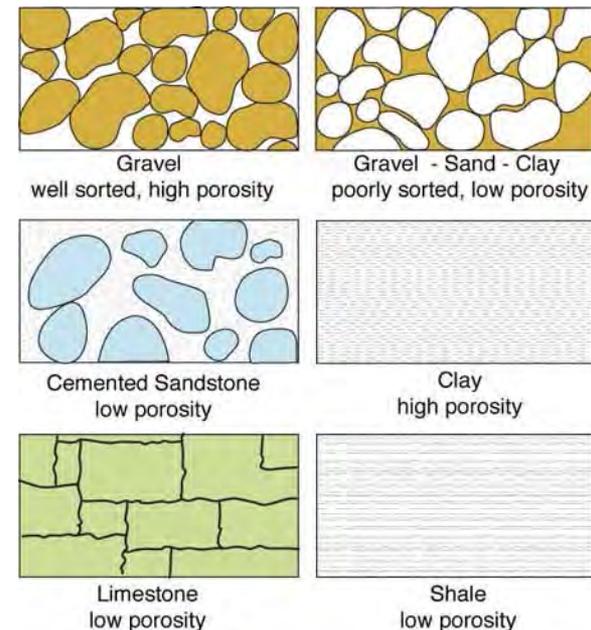


Wasser in der ungesättigten Zone – Bodenwasserspeicher I

- Böden: Mix aus Feststoffen, Luft und Wasser
- Materialeigenschaften: Partikeldichte, Bodendichte und Porosität
 - Partikeldichte: durchschnittliche Dichte der Mineralkörner des Bodens
 - Bodendichte: typische Werte: 1000-2000
 - Porosität: Anteil des Porenraums in einem Bodenvolumen: Porosität beträgt typischerweise etwa 0,5. In vielen Böden nimmt die Porosität mit der Tiefe aufgrund der Kompaktion ab.

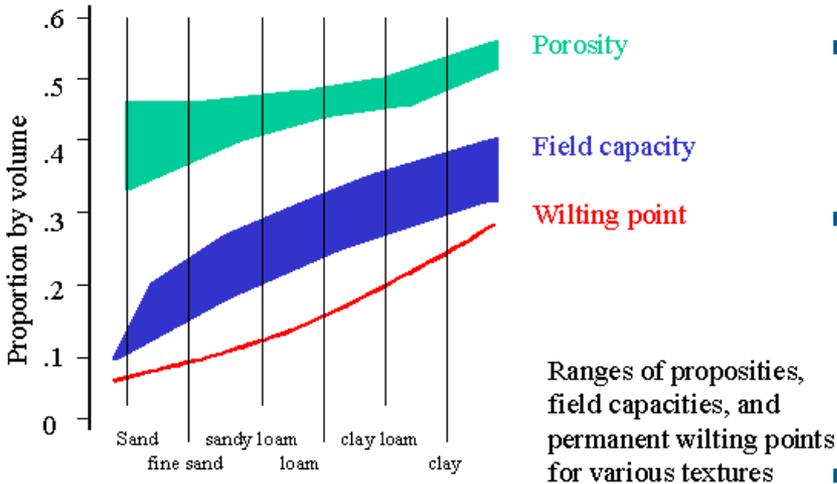


Source: passel.unl.edu

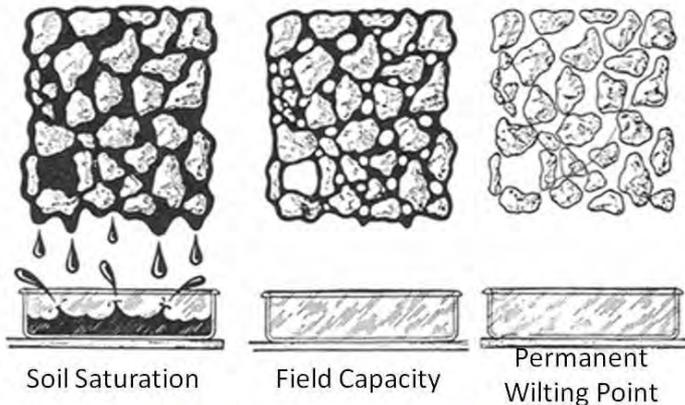


Source: Adini, 2011

Wasser in der ungesättigten Zone – Bodenwasserspeicher II



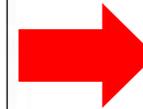
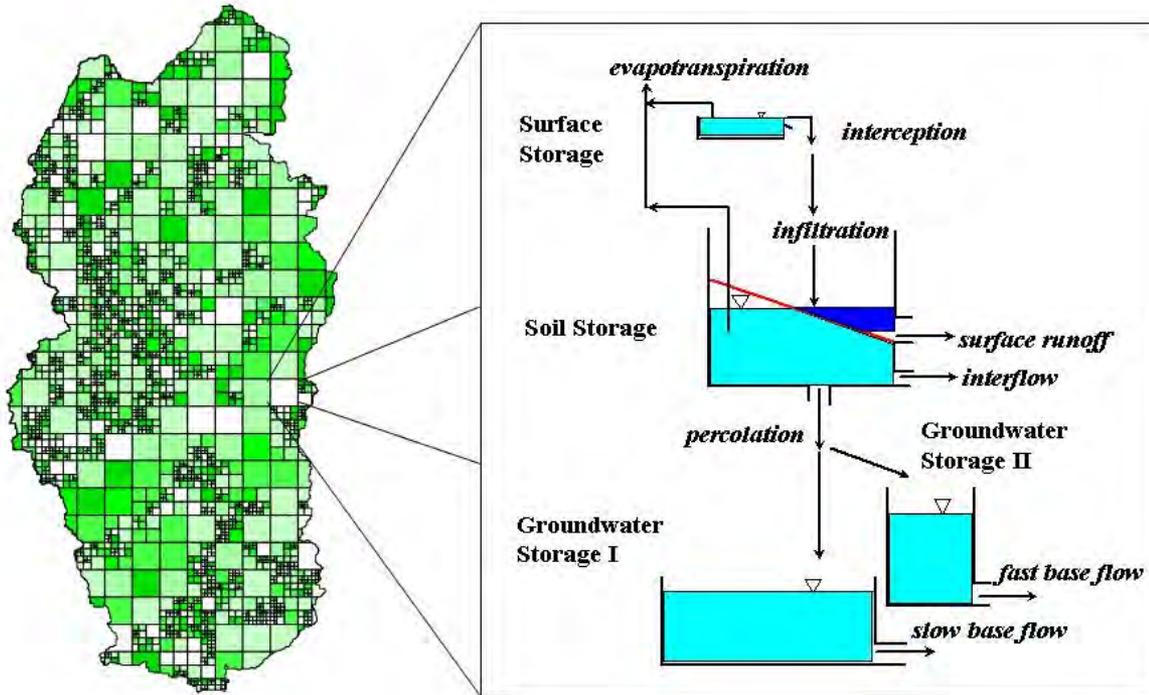
Source: Dingman, 1994



- Feldkapazität und Welkepunkt variieren je nach Bodentyp
- feinkörniger Boden (z.B. Ton) besitzt hohe Porosität (viele kleine Poren) → führt zu hoher Feldkapazität + hohem Welkepunkt
- grobkörniger Boden (Sand): große Poren, niedriger Porosität, geringe Feldkapazität, niedrige Welkepunkt
- schluffige Böden: mittlere Werte von Welkepunkt und Feldkapazitäten

Grundlagen der hydrologischen Modellierung

Grundlagen der hydrologischen Modellierung



Warum überhaupt Modellierung?

Flächenverteilte hydrologische Modellierung

Warum hydrologische Modellierung?

- fundamentale Probleme hydrologischer Systeme: ober- und unterirdische Prozesse ohne direkte Beobachtung / Messung
 - Muster der Wasserbewegung in Boden + Gestein ist komplex + stark nicht-linear
 - Vielzahl an Steuerfaktoren
 - geringe Kenntnis über zeitliche + räumliche Variabilität
 - Skalenproblem: Überlagerung von Prozessen in Raum + Zeit, Messtechnik nur für best. Skalen geeignet → lückenhafte Datenbasis
- deshalb Modelle verwenden, weil:
- Methode um Messergebnisse zu extrapolieren, da Messungen nur begrenzt möglich
 - Formalisierung des Wissens über hydrologische Systeme
 - Entscheidungsunterstützung

Modellbildung

Wahrnehmungsmodell → welche Prozesse sind beteiligt?

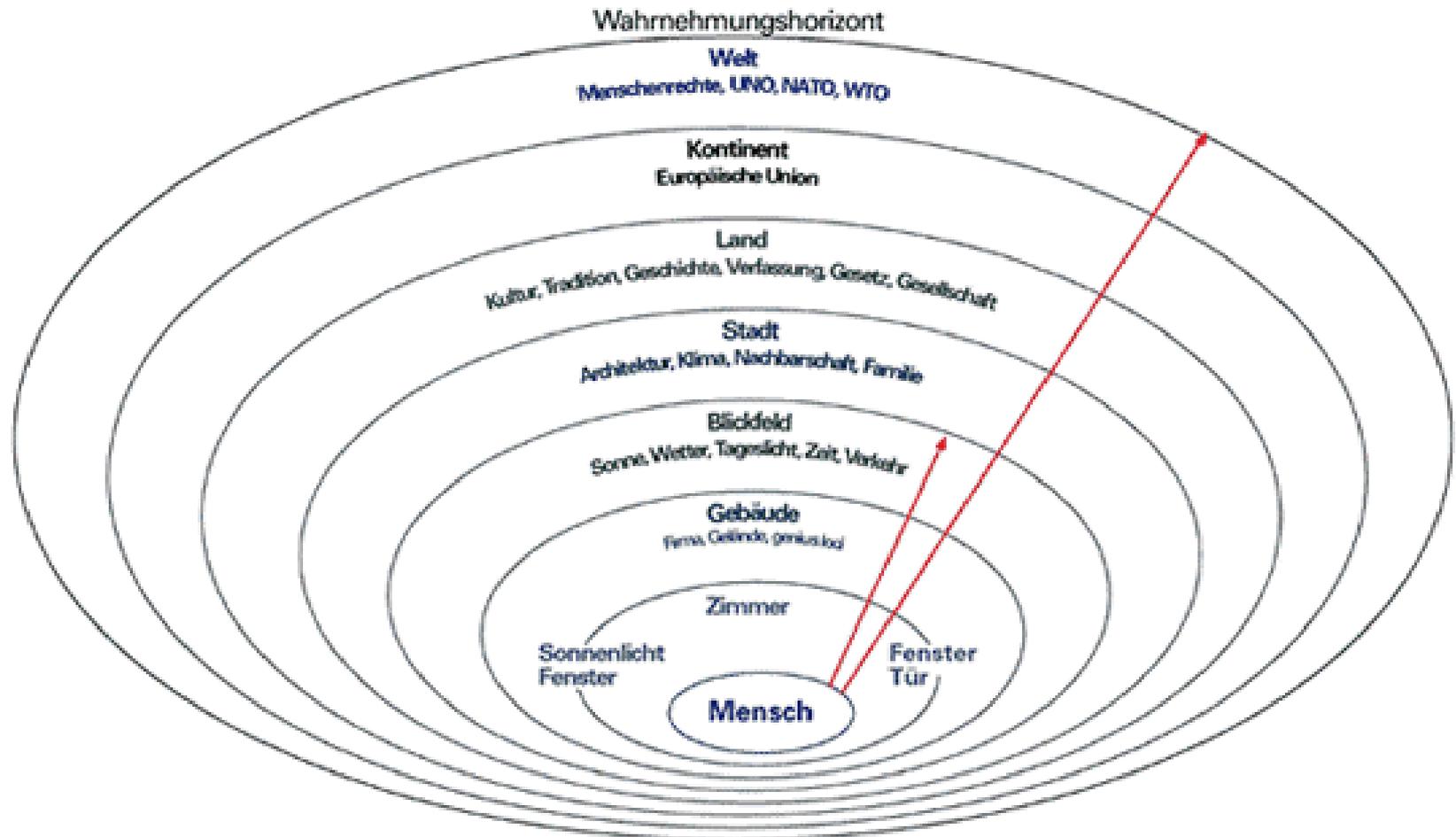
Konzeptionelles Modell → welche Gleichungen werden verwendet?

Modellprozedur → Kodierung in Programmiersprache

Modelleichung → optimale Parametrisierung

Modelltest → Überprüfung des Modells

Wahrnehmungsmodell



WAHRNEHMUNGSSPHÄREN
Beziehung zwischen
Mensch und Umwelt

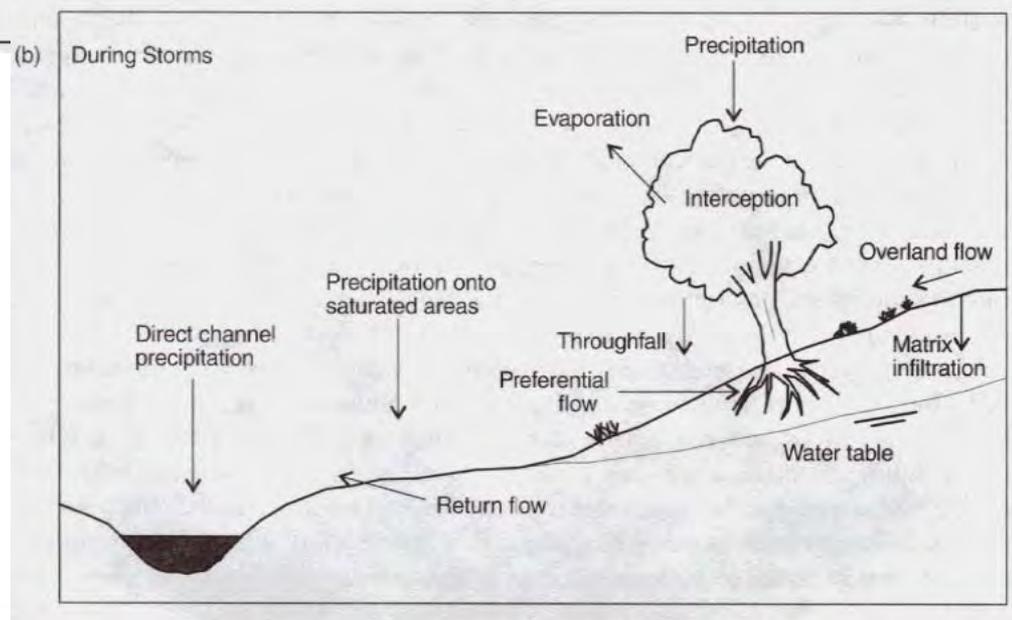
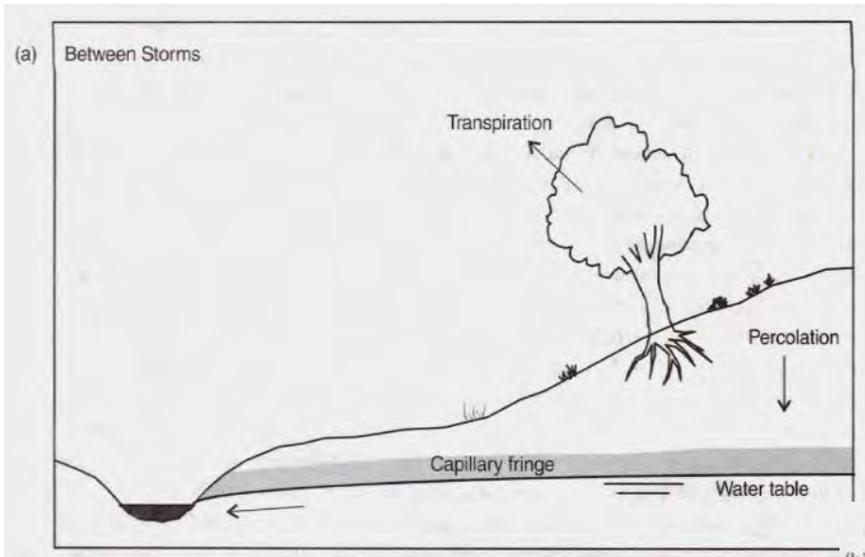
Wahrnehmungsmodell

- je nach Einzugsgebietstyp können verschiedene Prozesse das Abflussgeschehen dominieren
- begrenzte Wahrnehmbarkeit durch unterirdische Flüsse
- lokal begrenzte Messmethoden stehen großräumigen Prozessen gegenüber
- Einschränkung der Wahrnehmung durch begrenzte Messtechnik

Fazit:

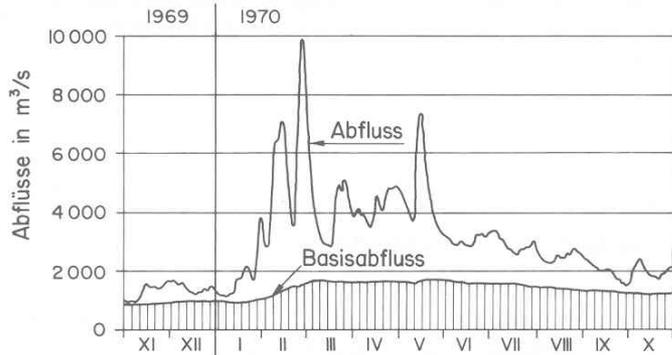
- fasst die Beobachtungen in einem Einzugsgebiet zusammen
- subjektiv, an den Beobachter gebunden

Zeitabhängiges Wahrnehmungsmodell



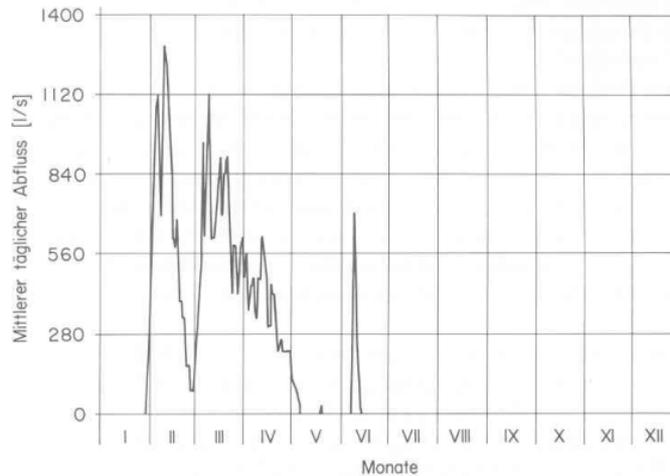
Beven, 2001

Wahrnehmungsmodell

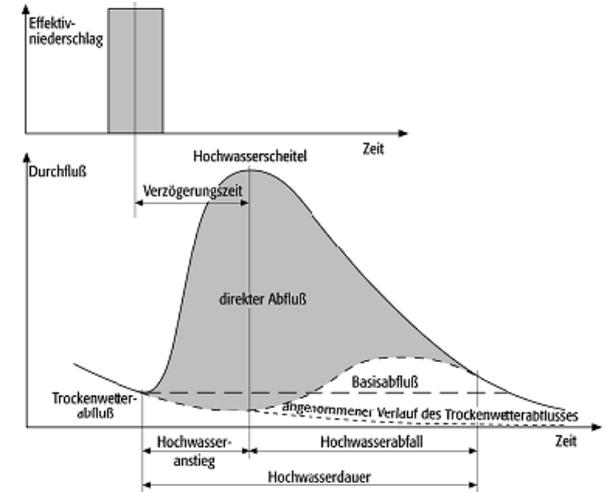
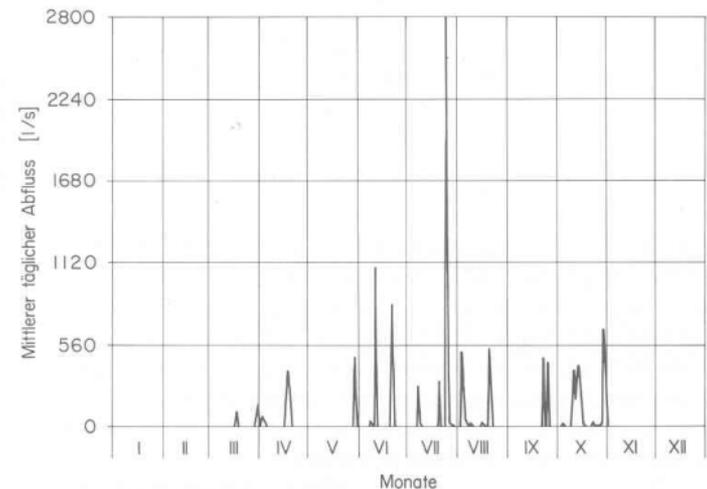


Beispiel einer Jahresganglinie eines perennierenden Flusses (Dracos, 1980, S. 109)

Beispiel einer Jahresganglinie eines intermittierenden Flusses (Dracos, 1980, S. 109)



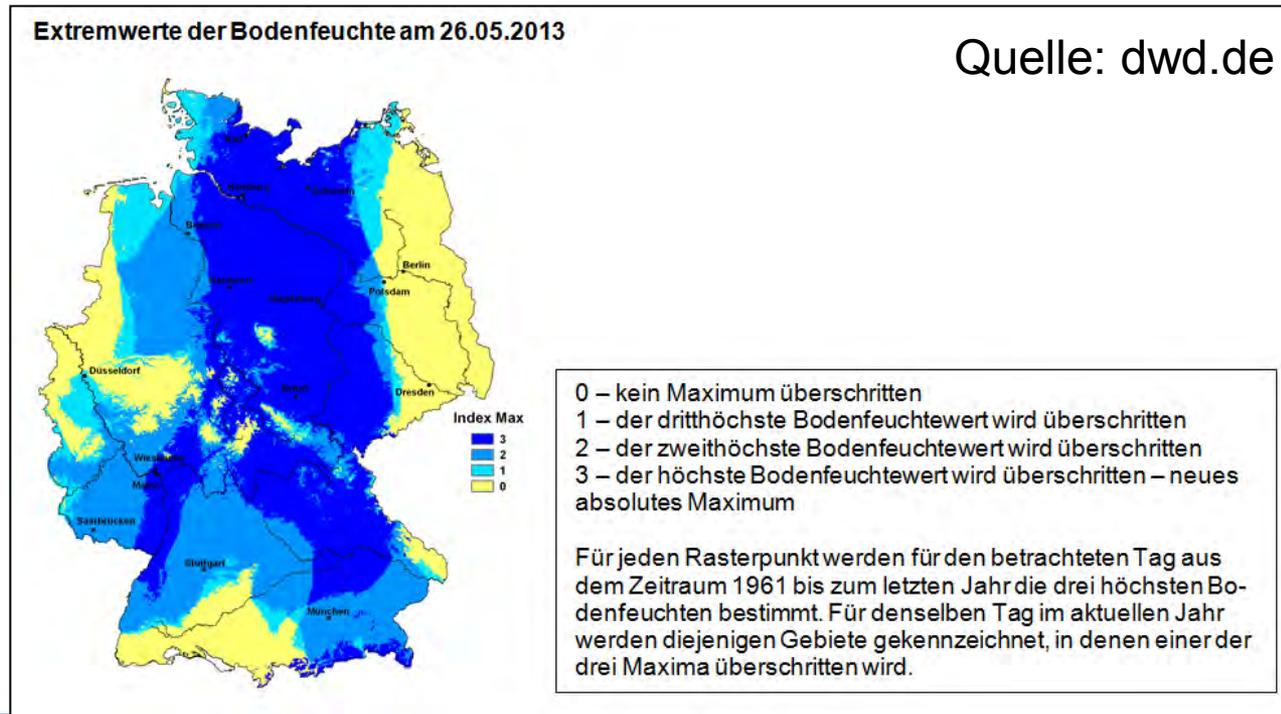
Beispiel einer Jahresganglinie eines ephemeren Flusses (Dracos, 1980, S. 108)



http://www.geodsz.com/deu/d/images/1301_hochwasserganglinie.png

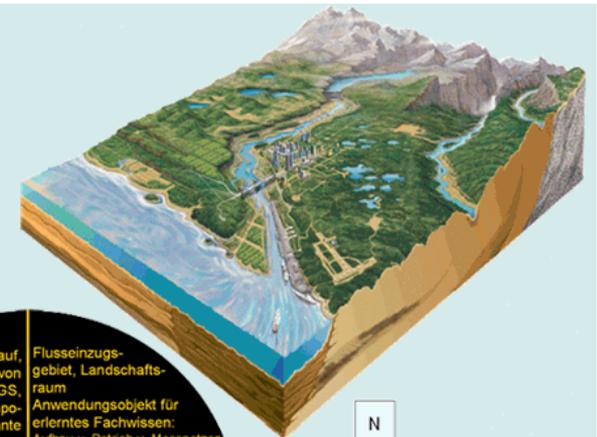
Steuerfaktoren für dominierende Prozesse

- Feuchte zu Niederschlagsbeginn
- Niederschlagshöhe, -verteilung, -intensität
- Räumliche Verteilung des Niederschlags
- Relief
- Vegetation
- Bodentyp
- Schneeschmelze



Konzeptionelles Modell

- Vereinfachung der Wahrnehmung
- Formulierung von Hypothesen und Annahmen
- Mathematische Beschreibung
- Auswahl der Gleichungen

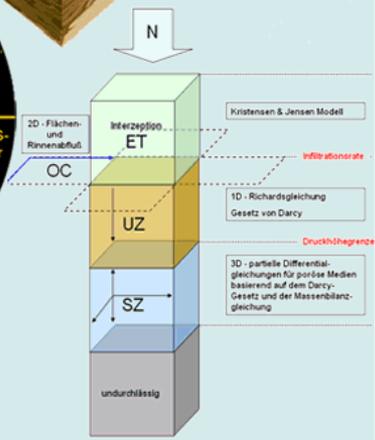
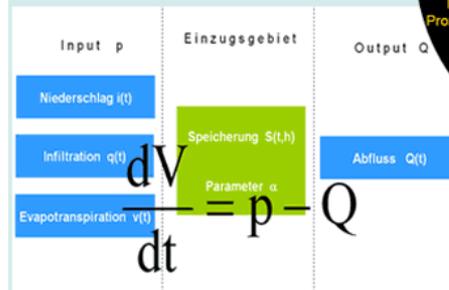


Wasserkreislauf, Illustration von J.M. Evans, USGS, Wasserhaushaltskomponenten und relevante Fließbahnen auf globalem Maßstab.

Flusseinzugsgebiet, Landschaftsraum
Anwendungsobjekt für erlerntes Fachwissen: Aufbau u. Betrieb v. Messnetzen, ArcWFD-Projekte, Bewertungen mit INFORM, Simulation von Durchflüssen,

Modellphilosophie zur Simulation von hydrologischen Prozessen, hier so genannte „Lumped Models“

... „Distributed Models“, GIS-basiertes Präprocessing zur Schaffung einer Datengrundlage, Anwendung von PDE:

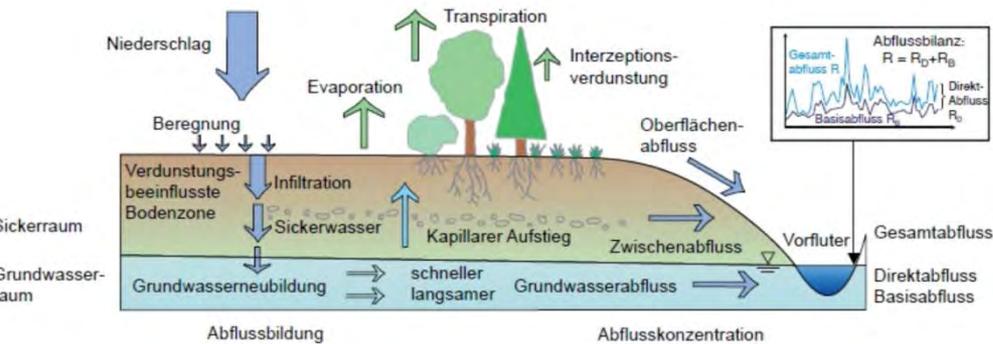
$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = p(x, t)$$


Konzeptionelle Modelle

einfacher Ansatz: Massenbilanz

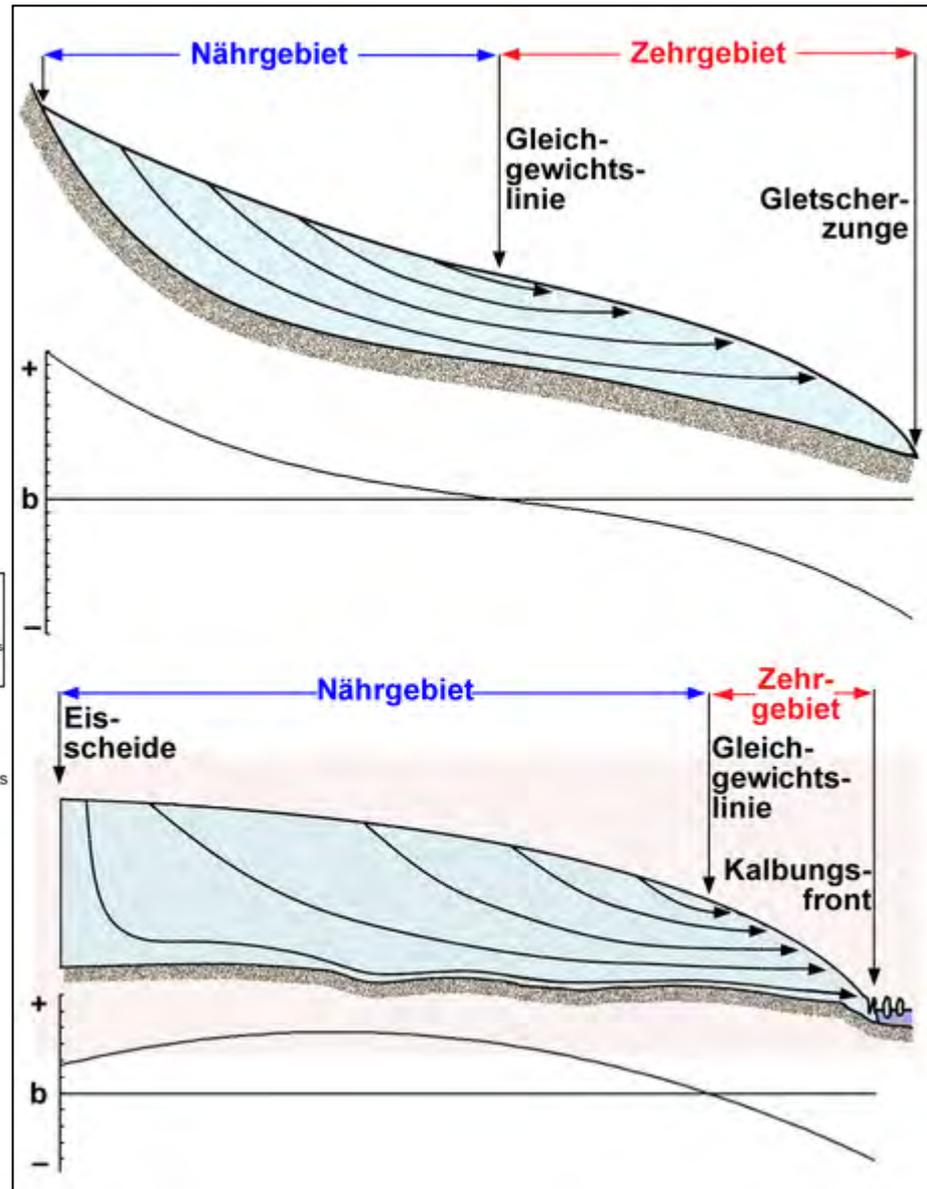
komplexer Ansatz: gekoppelte nicht-lineare Differentialgleichungssysteme

Definition der Randbedingungen und Gültigkeitsbereiche



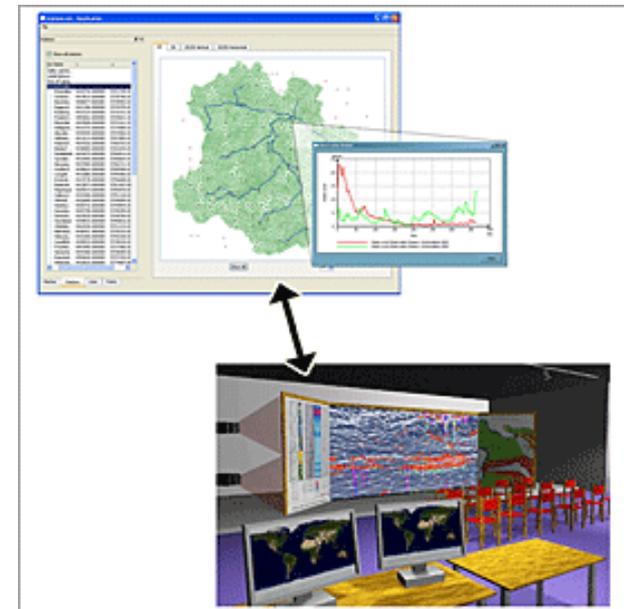
(Quelle: www.lfu.bayern.de)

Schematischer Querschnitt und spezifische Massenbilanz (b) eines typischen Talgletschers (oben) und eines Eisschildes (unten)



Modellprozedur

- Übersetzung der Gleichungen in Programmcode
- Bestimmung der mathematischen Lösungsverfahren
z.B. finite Differenzen oder finite Elemente
- Problem: numerische Stabilität, Fehler durch Näherungsverfahren



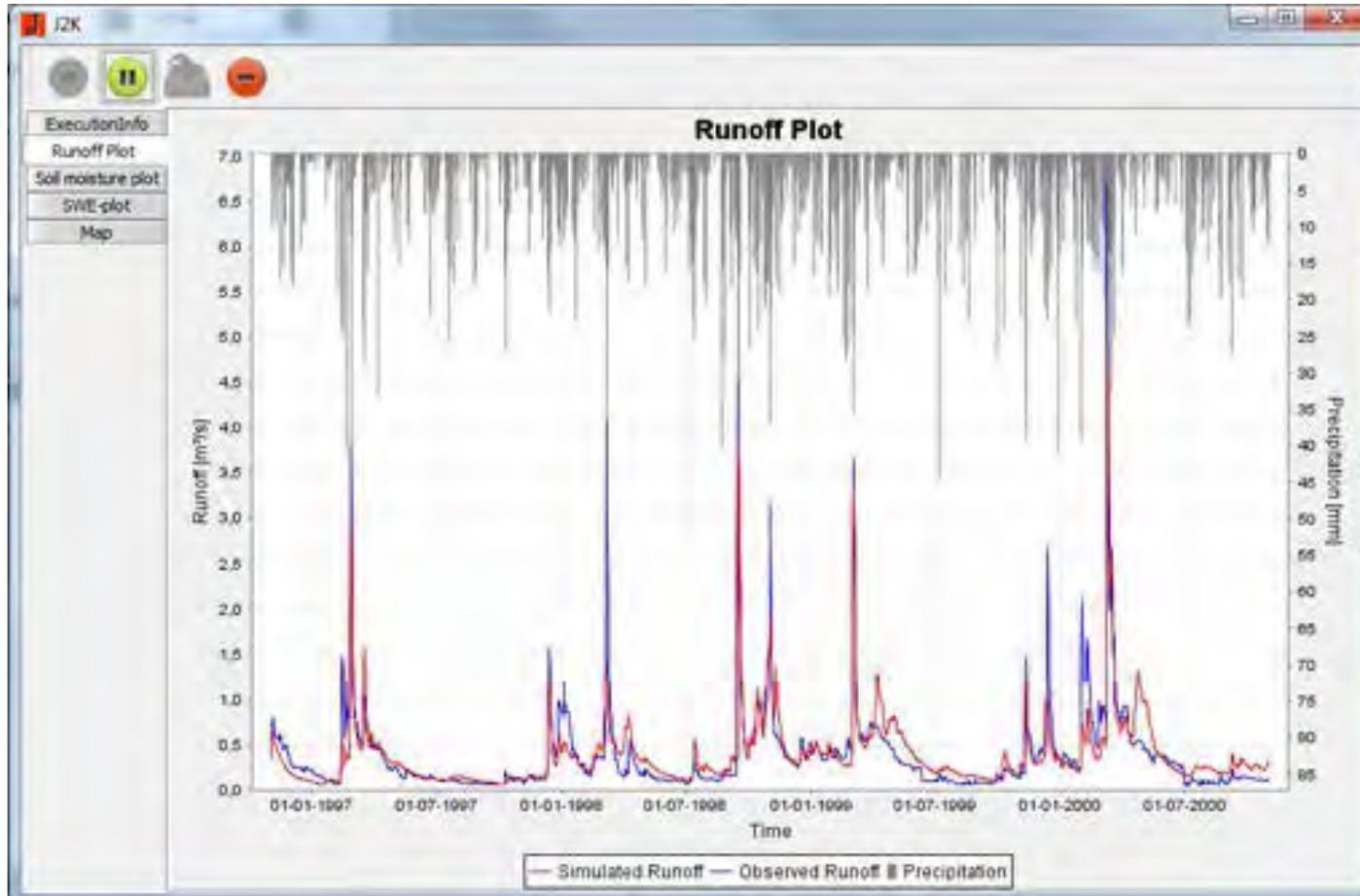
Quelle: ufz.de

wichtige Definitionen dazu:

- **Variable** = Platzhalter, ermöglicht in der Programmierung den Zugriff auf Daten; besteht aus einem Namen und einem Wert der Variablen
- **Parameter** ist der Wert, der für eine Variable gesetzt wird und charakterisiert das betrachtete Einzugsgebiet
- **Statische Variable**: bleibt konstant während Modelllauf (z.B. Geometrie des Fließgewässers, Hangneigung, Bodenart)
- **Zustandsvariable**: verändert sich während der Modellierung (z. B. Bodenwasserhaushalt)
- **Initialisierung**: Belegung der Variablen mit einem Startwert

Modellprüfung

- Suche nach der optimalen Parametrisierung
- Statistische Maße (Modellgüte)



Quelle: <http://ilms.uni-jena.de/ilmswiki/de/uploads/8/86/RunoffPlot.jpg>

Modellprüfung

- **Verifizierung:** Überprüfung des numerischen Codes durch Vergleich der Simulationen mit analytischen Lösungen oder mit anderen Modellen
- **Kalibrierung:** Justierung der Modellparameter, Bewertung der Modelleignung durch Residuenanalyse
- **Validierung:** “Beweis” der Eignung des Modells durch Aufzeigen der Übereinstimmung von Beobachtung und Simulation für eine Reihe von Fällen, an den keine Kalibrierung durchgeführt wurde

Modelleichtung

- Bestimmtheitsmaß (r^2)
- Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE): Verhältnis zwischen mittlerer quadratischer Abweichung und Standardabweichung
- Standardabweichung
- Trend / BIAS
- Volumenfehler
- Sensitivitätsanalysen / Automatische Kalibrierung

Literatur (z.B.):

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., and Veith, T. L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Trans. ASABE. 50(3), 885-900

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Fragen?

verwendete und weiterführende Literatur:

Lehrbücher:

- Baumgartner, A. & H.-J. Liebscher (1990): Lehrbuch der Hydrologie, Band 1: Allgemeine Hydrologie, Quantitative Hydrologie. Gebrüder Borntraeger Berlin Stuttgart
- Dyck, S. & G. Peschke (1995): Grundlagen der Hydrologie. Verlag für Bauwesen Berlin, 3. Auflage, 536 S.
- J. Fürst: GIS in Hydrologie und Wasserwirtschaft, 2004
- Kinzelbach, W. & R. Rausch (1995): Grundwassermodellierung - Eine Einführung mit Übungen. Gebrüder Borntraeger Berlin und Stuttgart, 283 S.
- Singh, V. P. & D. e. Frevert (2002): Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications. Colorado, USA, Water Resources Publications, LLC, 5 Sections, 950 S.
- Singh, V. P. e. (1995): Computer Models of Watershed Hydrology. Colorado, USA, Singh, V. P., Water Resources Publications, Colorado, USA, 28 Kapitel, 1150 S.

Internet

- http://www.hydrology.uni-kiel.de/download/lehre/wise/hydrol_modelling/m192_vl1.pdf
- http://www.ufz.de/export/data/1/19323_Blockseminar_volk_2010.pdf