



# V Hydrosystemanalyse

## Hydrologische Modellierung

- Einführung -



Dresden, 25.04.2014

Agnes Sachse<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>Helmholtz Centre for Environmental Research – UFZ, Department of Environmental Informatics, Leipzig

<sup>2</sup>TU Dresden, Applied Environmental System Analysis, Dresden

# Fahrplan

- Vorstellung: Agnes Sachse
- Organisatorisches zur Vorlesung
- Hydrologische Modellierung: Einführung

# Vorstellung der Dozenten:

A. Sachse, J. O. Delfs, T. Kalbacher, H. Shao, R. Zolfaghari, L. Bilke

## Agnes Sachse:

- geboren in Dresden
- Studium der Meteorologie, Geologie + Geographie (Leipzig)
- Promotion: hydrologische + hydrogeologische Modellierung im ariden Raum (UFZ Halle + UFZ Leipzig)
- Forschungsschwerpunkte: Hydrogeologie arider und semiarider Gebiete, Grundwassermodellierung, Bodenwasserhaushaltsmodellierung, Klimamodellierung, Pflanzenwurzelforschung in der initialen Ökosystemgenese
- Kontakt: [agnes.sachse@ufz.de](mailto:agnes.sachse@ufz.de)

HELMHOLTZ  
CENTRE FOR  
ENVIRONMENTAL  
RESEARCH - UFZ

Contact | Imprint | GL

## Research for the Environment

Home Research Divisions Press Events Jobs/Education Service About us Contact

» Divisions » Water and Soil Sciences » Catchment Hydrology » Staff » Agnes Sachse


### Dipl.- Geogr. Agnes C. F. Sachse, geb. Gräbe

**Kontakt/Adresse**

Agnes Sachse  
Doktorandin

Department Umweltinformatik  
Helmholtz-Zentrum  
für Umweltforschung - UFZ  
Permoser Str. 15  
04318, Leipzig Germany

Tel: 0341 235 1022  
Fax: 0341 235 1939  
✉ [agnes.sachse@ufz.de](mailto:agnes.sachse@ufz.de)



**Lebenslauf / Akademische Ausbildung**

seit 03/2012	wiss. Mitarbeiterin im Dep. Umweltinformatik, Schwerpunkt: hydrogeologische und hydrologische Modellierung
11/2008-03/2012	Doktorandin im Department Catchment <a href="#">Hydrology</a> Thema: Characterisation and modelling of the hydrogeology of the western drainage basin of the Dead Sea, Israel, Palestine. (SUMAR-Projekt)
11/2007 - 10/2008	wissenschaftlicher Mitarbeiter an der BTU Cottbus, Lehrstuhl für Bodenschutz und Rekultivierung Thema: Zeit-räumliche Entwicklung von Wurzelwachstum, -abbau und -exsudation in der initialen Phase der Ökosystemgenese
06/2007	Diplom Geographie, Universität Leipzig (Diplomarbeit: "Kalibrierung des Bodenwasserhaushaltsmodells BOWAM auf Basis von Messwerten der Lysimeterstation Brandis und Durchführung von Prognoserechnungen") Betreuer: Prof. H. Neumeister, Universität Leipzig Dr. U. Haferkorn, Lysimeterstation Brandis
10/2003 - 06/2007	Hauptstudium der Geographie (Nebenfach: Meteorologie, Geologie), Universität Leipzig

# Organisatorisches

- Ablaufschema
- Detaillierte Planung
- WebSeite

# Organisatorisches

Vorlesung: Freitag, jeweils 13:00 – 16:20 Uhr

Lehre Sommersemester 2014

Hydroinformatik I

Hydrosystemanalyse

		April	Mai	Juni	Juli	August
			02.05.2014	06.06.2014	04.07.2014	Klausur
2. DS	09:20-10:50		Brückentag	Kolditz	Kolditz	HÜL/S186/H
3. DS	11:10-12:40			Delfs	VISLAB	HSZ/401/H
4. DS	13:00-14:30			Delfs	Bilke, Rink	HSZ/401/H
5. DS	14:50-16:20			Delfs	Fischer	HSZ/401/H
		11.04.2014	09.05.2014	13.06.2014	11.07.2014	
2. DS	09:20-10:50	Kolditz	Kolditz	Kolditz	Kolditz	HÜL/S186/H
3. DS	11:10-12:40	Kolditz	Kolditz	Kolditz	Geothermie	HSZ/401/H
4. DS	13:00-14:30	Kolditz	Sachse	Shao/ Zolfaghari	Shao	HSZ/401/H
5. DS	14:50-16:20		Sachse		Görke	HSZ/401/H
		18.04.2014	16.05.2014	20.06.2014	19.07.2014	
2. DS	09:20-10:50	Ostern	Kolditz	Kolditz	Kolditz	HÜL/S186/H
3. DS	11:10-12:40		Kolditz	Kolditz	Kolditz	HSZ/401/H
4. DS	13:00-14:30		Sachse	Kalbacher		HSZ/401/H
5. DS	14:50-16:20		Sachse	Kalbacher		HSZ/401/H
		25.04.2014	23.05.2014	27.06.2014		
2. DS	09:20-10:50	Kolditz	Kolditz	Kolditz		HÜL/S186/H
3. DS	11:10-12:40	Kolditz	Delfs	Kolditz		HSZ/401/H
4. DS	13:00-14:30	Sachse	Delfs	Kalbacher		HSZ/401/H
5. DS	14:50-16:20	Sachse	Delfs	Kalbacher		HSZ/401/H
			30.05.2014			
			Brückentag			

# Organisatorisches


Vorlesung, Freitag, jeweils 13:00 – 16:20 Uhr

Datum	Vorlesungsinhalt	Dozenten
11.04.2014	Einführung	O. Kolditz
<i>18.04.</i>	<i>Karfreitag</i>	
25.04.2014	Einführung in die Hydrologische Modellierung	A. Sachse
<i>02.05.2014</i>	<i>frei</i>	
09.05.2014	Hydrolog. Modellierung im humiden Raum	A. Sachse
16.05.2014	Hydrolog. Modellierung im ariden Raum	A. Sachse
23.05.2014	Oberflächenhydrologie	J. O. Delfs
30.05.2014	<i>Brückentag</i>	
06.06.2014	Oberflächenhydrologie	J. O. Delfs
13.06.2014	Mass transport	H. Shao / R. Zolfaghari
20.06.2014	Bodenhydrologie	T. Kalbacher
27.06.2014	Bodenhydrologie	
04.07.2014	Vislab-Exkursion (UFZ Leipzig)	
11.07.2014	Geothermie-Exkursion	H. Shao, U.-J. Görke

Fragen?

# Organisatorisches

<http://www.ufz.de/index.php?de=21384>



[Kontakt](#) | [Ausschreibungen & Vergaben](#) | [Impressum](#) | [Glossar](#) | [Sitemap](#) | [Intranet](#)







Forschen für die Umwelt

---

[Start](#)
[Forschung](#)
[Fachbereiche](#)
[Presse](#)
[Veranstaltungen](#)
[Karriere](#)
[Service](#)
[Über uns](#)
[Kontakt](#)

---

» [Fachbereiche](#) » [Umweltsystemmodellierung und Monitoring](#) » [Umwelthinformatik](#) » [Lehre - Umweltsystemanalyse](#)

---

**Start**

---

**Forschung**

---

**Fachbereiche**

Umweltsystemmodellierung und Monitoring

Hydrosystemmodellierung

Landschaftsökologie

Ökologische Systemanalyse

Umwelthinformatik

Mitarbeiter

Publikationen

Lehre - Hydroinformatik II

Projekte

Lehre - Umweltsystemanalyse

Lehre - Hydroinformatik I

Monitoring- und Erkundungstechnologien

Methodische Schwerpunkte

Wasser- und Bodenforschung

Terrestrische Ökologie

Umwelttechnologie

Ökotoxikologie

Gesundheitsforschung

Sozialwissenschaften

---

**Presse**

---

**Veranstaltungen**

---

**Karriere**

---

**Service**

---

**Über uns**

---

**Kontakt**

## TU Dresden Lehrveranstaltung "Angewandte Umweltsystemanalyse" (BWA09)

**Sommersemester 2014**

3.-4./5. DS, HSZ/401H, Horsaalzentrum, Bergstraße 66

Lehre Sommersemester 2014  
*Hydroinformatik I*  
*Hydrosystemanalyse*

		April	Mai	Juni	Juli	August
			02.05.2014 Brückentag	06.06.2014 Kolditz Delfs	04.07.2014 Kolditz VISLAB Bilke, Rink Fischer	HÜL/S186/H HSZ/401/H HSZ/401/H HSZ/401/H
2. DS	09:20-10:50					
3. DS	11:10-12:40					
4. DS	13:00-14:30					
5. DS	14:50-16:20					
		11.04.2014 Kolditz	09.05.2014 Kolditz Sachse	13.06.2014 Kolditz Shao/ Zolfaghari	11.07.2014 Kolditz Geothermie Shao Görke	HÜL/S186/H HSZ/401/H HSZ/401/H HSZ/401/H
2. DS	09:20-10:50					
3. DS	11:10-12:40					
4. DS	13:00-14:30					
5. DS	14:50-16:20					
		18.04.2014 Ostern	16.05.2014 Kolditz Sachse	20.06.2014 Kolditz Kalbacher	19.07.2014 Kolditz	HÜL/S186/H HSZ/401/H HSZ/401/H HSZ/401/H
2. DS	09:20-10:50					
3. DS	11:10-12:40					
4. DS	13:00-14:30					
5. DS	14:50-16:20					
		25.04.2014 Kolditz	23.05.2014 Kolditz Delfs	27.06.2014 Kolditz Kalbacher		HÜL/S186/H HSZ/401/H HSZ/401/H HSZ/401/H
2. DS	09:20-10:50					
3. DS	11:10-12:40					
4. DS	13:00-14:30					
5. DS	14:50-16:20					
			30.05.2014 Brückentag			

**Sommersemester 2012**

3.-5. DS, CHE/184, Chemie/Wasserwesen, Bergstraße 66

[Übersicht Lehrveranstaltungen \(25.05.2012\): \(24.5 KB\)](#)

[Skript \[V3.01\] \(18.04.2013\): \(5.3 MB\)](#)

[Vorlesung \(22.06.2012\): FEM 2D Vorlesung \(433.8 KB\)](#)

**News**

↳ [OpenGeoSys.org now live!](#)

→ [PhD Initiative: Reactive Transport Modeling and Experiments](#)  
view presentations from March 2013 workshop

---

**Veranstaltungen**

→ [EnvirVis Workshop](#)  
(@EuroVis)  
Leipzig, Germany  
17-18 June 2013

→ [SS Bench III Workshop](#)  
11-13 November 2013  
Abstract bis 30.09.2013 einreichen!

# Organisatorisches

## Vorlesungsskript



Winter 2012 - 10. April 2012

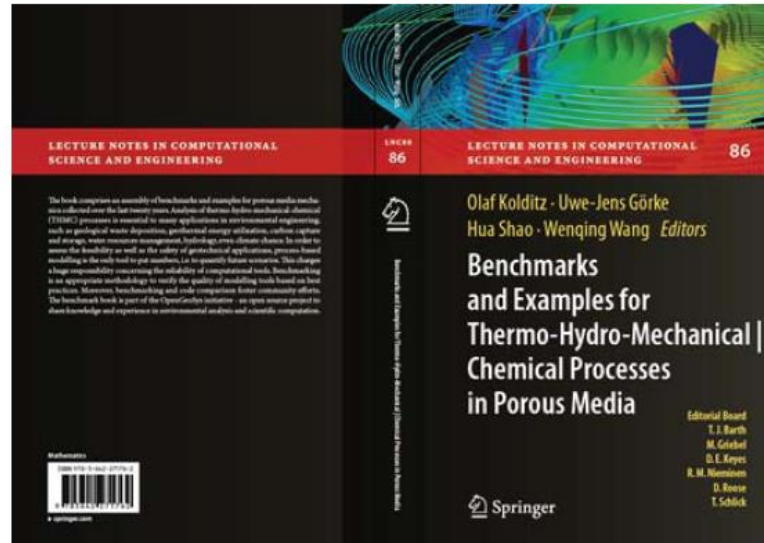
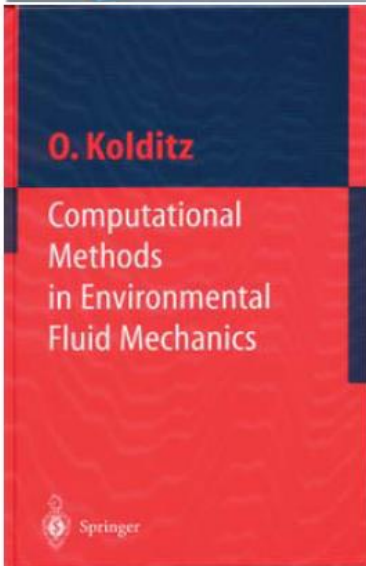
---

Umweltsystemanalyse  
"Grundlagen und Fallstudien"

---

Prof. Dr.-Ing. habil. Olaf Kolditz

TU Dresden / UFZ Leipzig  
Angewandte Umweltsystemanalyse  
Umweltinformatik  
SS 2012  
© OGS Teaching 2012





# Organisatorisches: Literatur

## diverse Lehrbücher:

- Baumgartner, A. & Liebscher, H.-J. (Hrsg.) (1996): Allgemeine Hydrologie - Quantitative Hydrologie. - In: Lehrbuch der Hydrologie Bd. 1, 2. Auflage, Gebr. Borntraeger, Berlin-Stuttgart
- Bronstert, A. (eds) (2005): Coupled models for the hydrological cycle. Springer-Verlag
- Chow, V.T. (ed.) (1964): Handbook of Applied Hydrology. - McGraw-Hill, New York u.a.
- Dyck, S. (Hrsg.) (1980): Angewandte Hydrologie. Teil 1: Berechnung und Regelung des Durchflusses der Flüsse. Teil 2: Der Wasserhaushalt der Flussgebiete. - Verlag für Bauwesen, Berlin
- Dyck, S. & Peschke, G. (1989): Grundlagen der Hydrologie. - Verlag für Bauwesen, Berlin
- Hölting, B. (1996): Hydrogeologie: Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie. - 5. Aufl., Enke, Stuttgart
- Keller, R. (Hrsg.) (1978): Hydrologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland. Atlasband (1978). Textband (1979). - Boldt, Boppard
- Kresic, N. (2007): Hydrogeology and groundwater modeling. CRC Press
- Maniak, U. (2005): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. - 5. Aufl., Springer, Berlin.
- Matthess, G. (1973): Die Beschaffenheit des Grundwassers. - In: Lehrbuch der Hydrogeologie Bd. 2, Gebr. Borntraeger, Berlin-Stuttgart
- Matthess, G. & Ubell, K. (1983): Allgemeine Hydrogeologie, Grundwasserhaushalt. - In: Lehrbuch der Hydrogeologie Bd. 1, Gebr. Borntraeger, Berlin-Stuttgart
- Scheffer, F. & Schachtschabel, P. (1998): Lehrbuch der Bodenkunde.
- Schröder, W., Euler, G., Schneider, K. & Knauf, D. (1994): Grundlagen des Wasserbaus. - 3. Aufl., Werner, Düsseldorf
- Shaw, E.M. (1994): Hydrology in Practice. - Chapman & Hall, London u.a.
- .....

# Organisatorisches

## Welche Vorlesungen wurden bereits besucht?

z.B. Prof Liedl:

- “Dynamik des unterirdischen Wassers” (Darcy-Gesetz, Permeabilitäten, Pumpversuche,...)
- “Grundwasserleiter” (Grundwasser, Einzugsgebiet, Leitfähigkeit, Karst,...)
- “Grundwasserbewirtschaftung mit Computermodellen” (konzeptionelles Modell, Neubildung, particle tracking)
- “Groundwater”
- “Geostatistik” (Korrelationsmatrix, Variogramme, Interpolationsverfahren,..)
- “Fallstudien GWB” (Wärmetransportmodellierung, Zweiporensysteme, Schadstofffahne, Visualisierung..)

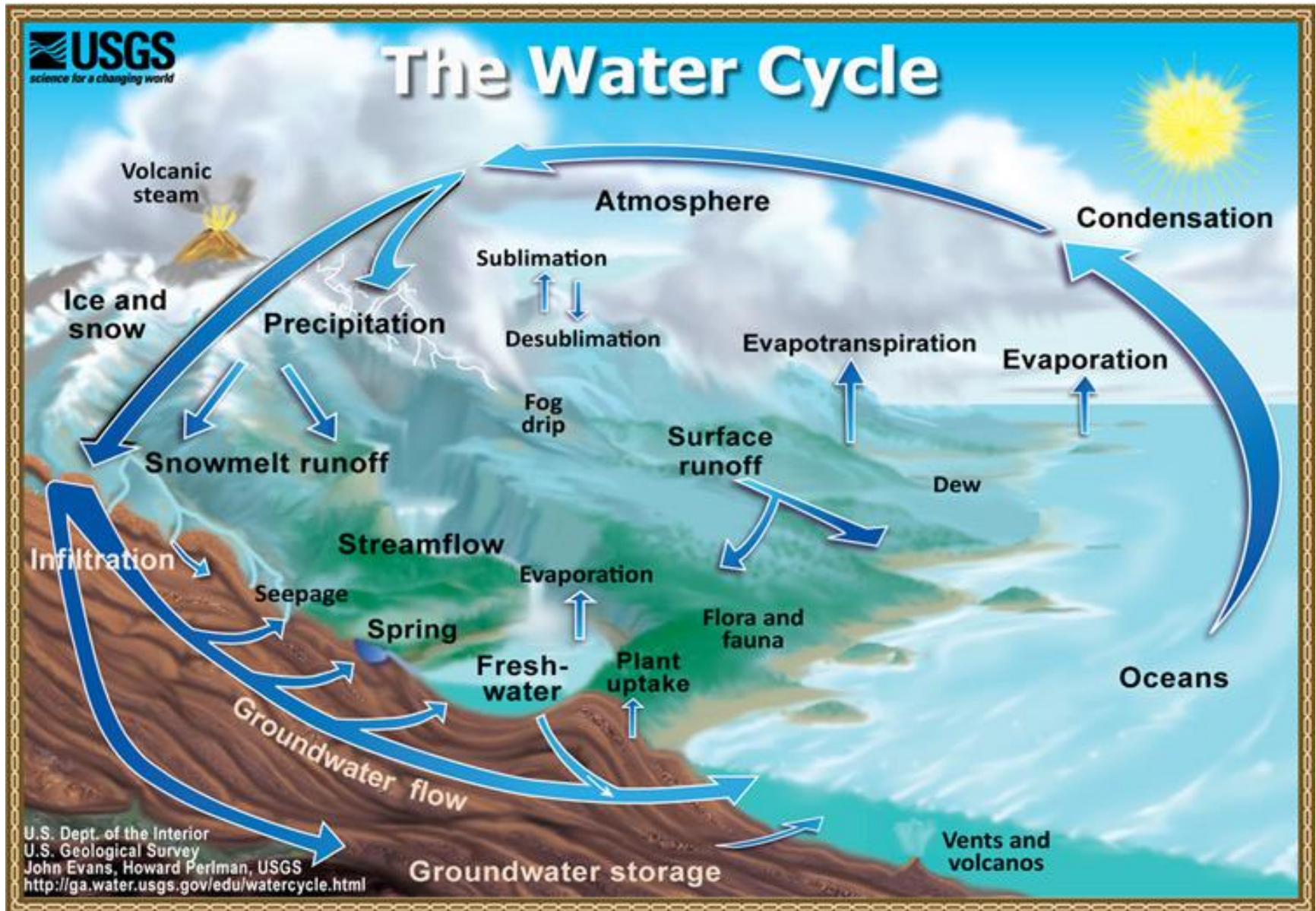
Ü Grundwasserbewirtschaftung mit Computermodellen (M. Walther)

# Vorlesung 1

- Basiswissen Hydrologie
- Grundlagen der hydrologischen Modellierung und Abflussbildung

# 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

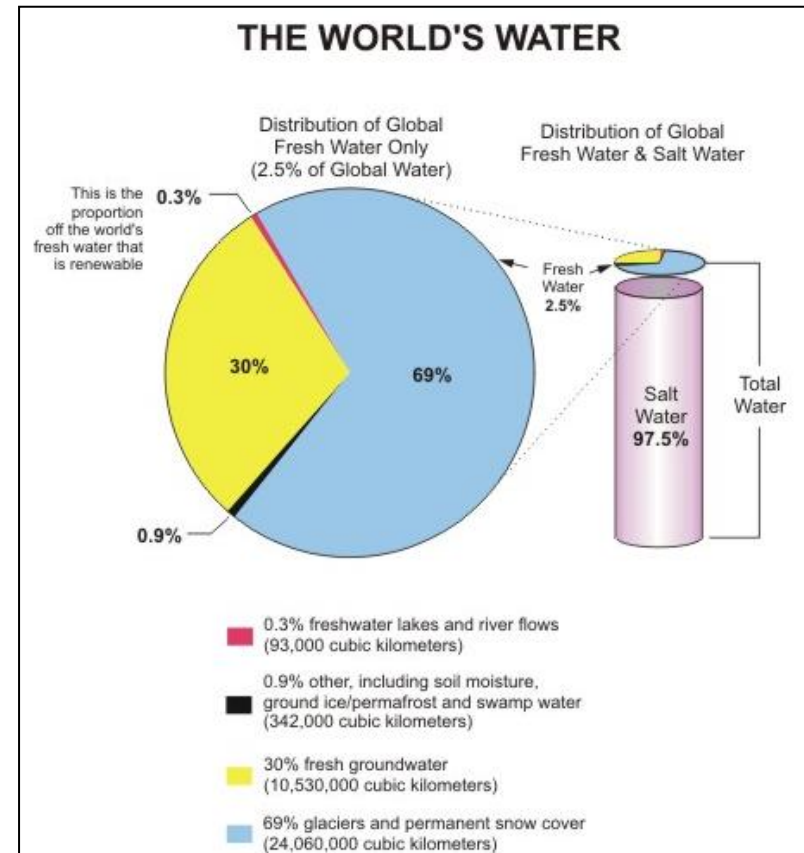
$G_{in}$ : Grundwasserzufluß

$G_{out}$ : Grundwasserabfluss

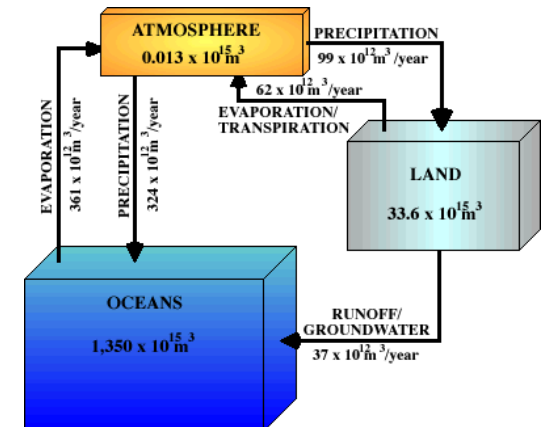
ET: Evapotranspiration

$\Delta S$ : 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):

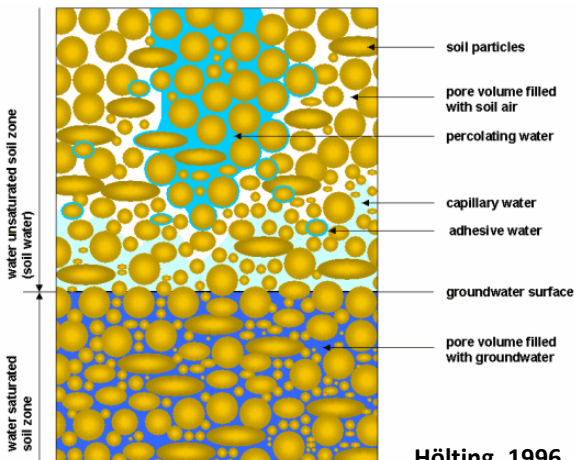
- OK: Erdoberfläche, UK: Kapillarraum
- Porenräume zwischen Bodenpartikeln bzw. Porenraum in Rissen + Spalten teils mit Wasser, teils mit Luft gefüllt
- Mächtigkeit: Meter bis mehrere hundert Meter

Gesättigte Zone

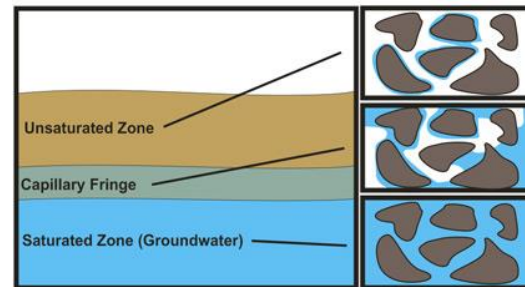
- Wasser füllt komplett Hohlräume zwischen Gesteins-und Bodenpartikel



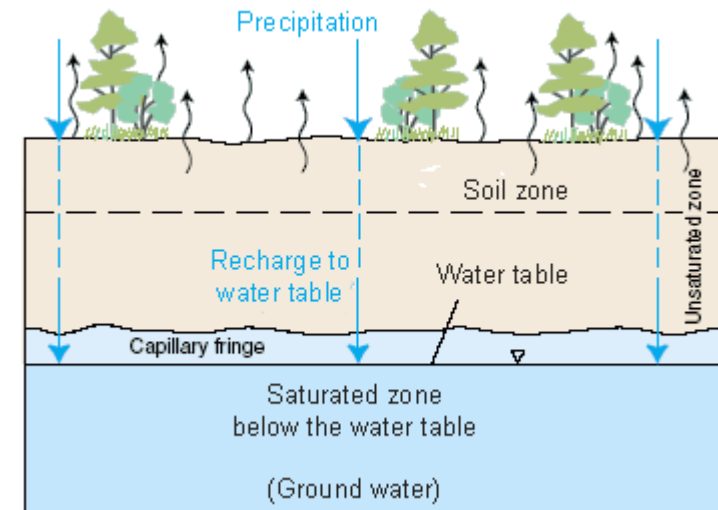
Source: dbstephens.com



Hörling, 1996



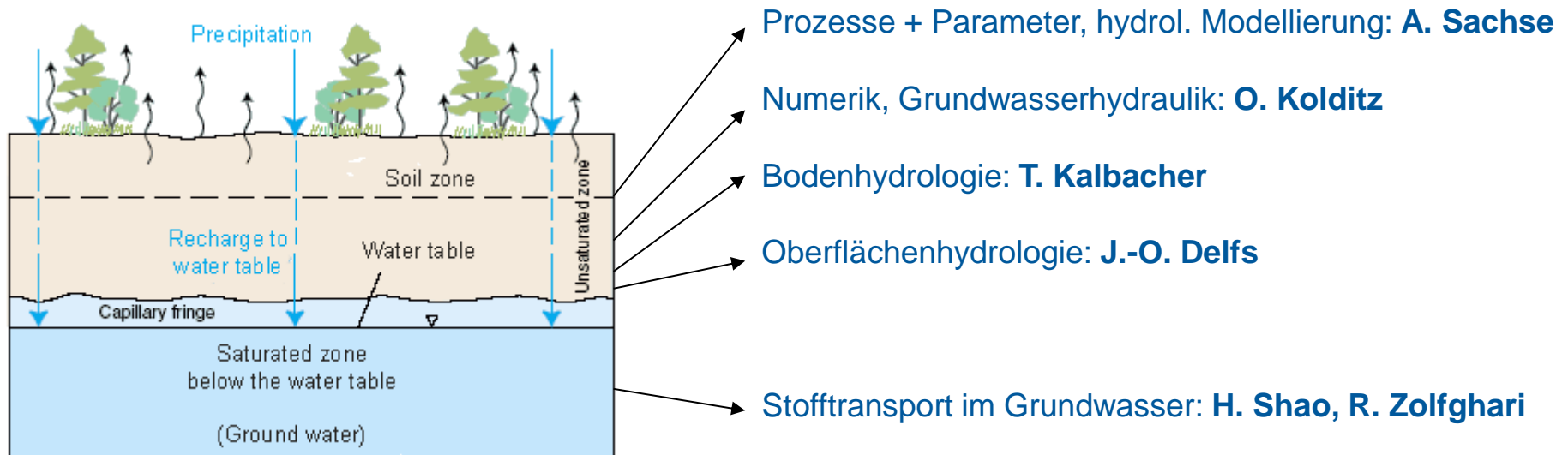
Adini, 2009



Source: USGS

# Hydrologie und Hydrogeologie

- Prozessverständnis -



Source: USGS



# Hydrological response analysis

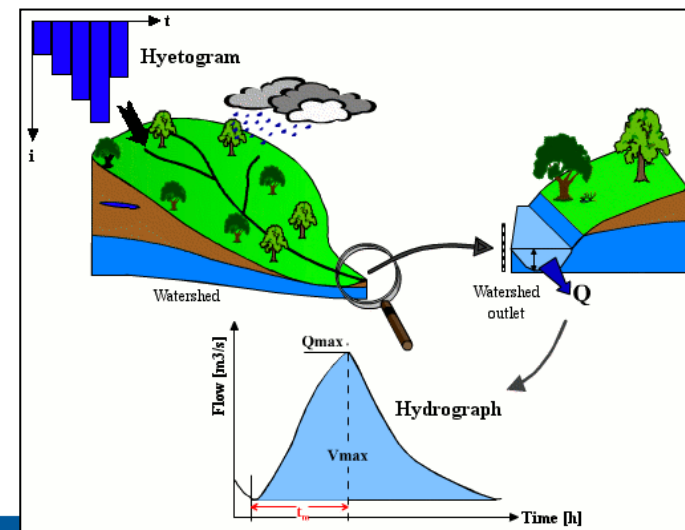
Niederschlag beeinflusst Einzugsgebiet → was ist die hydrologische “Antwort”?

- 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, Hangrichtung)
- physikalische Eigenschaften des UGs (Bodentyp, Vegetationsbedeckung)
- Struktur des Gewässernetzes (Dimension, hydraulische Eigenschaften)
- Bodenfeuchte

**Hydrological response of a catchment (Musy, 2001)**



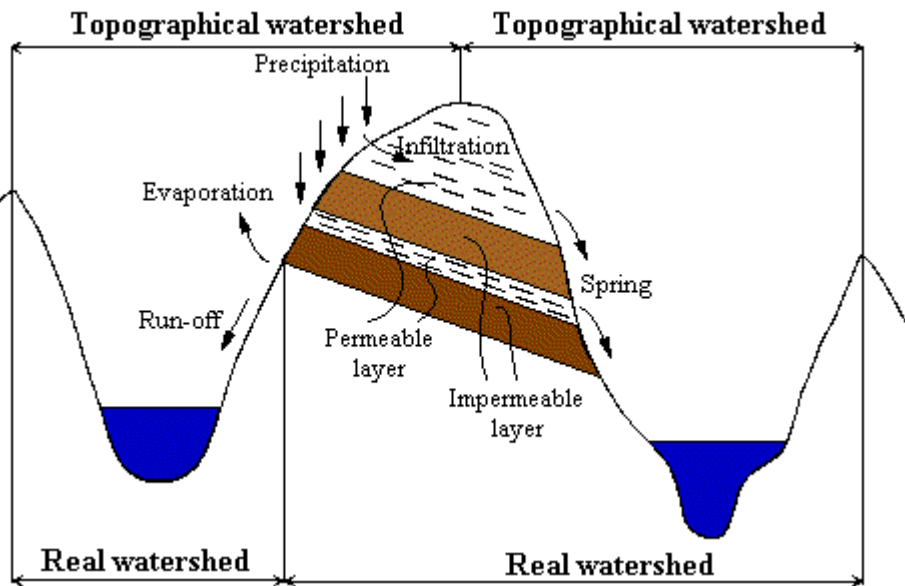
# Basiswissen der Hydrologie

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

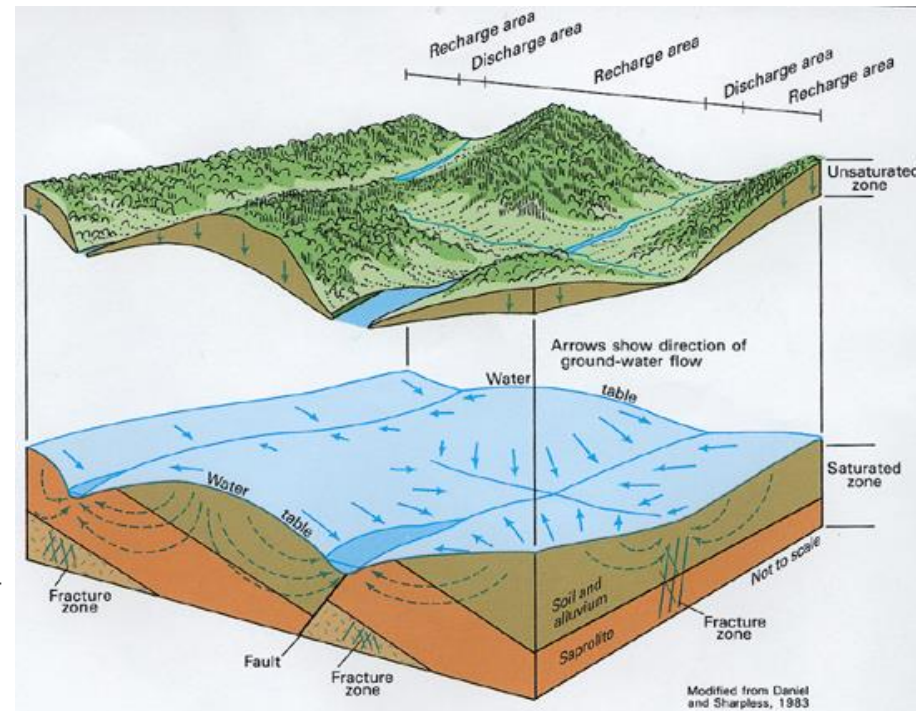
# Einzugsgebiets-Charakteristik I

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

→ Tool für Abgrenzung Einzugsgebiet: ArcGIS



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



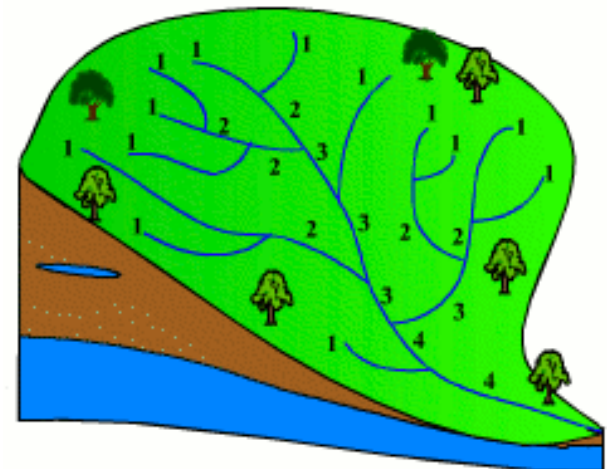
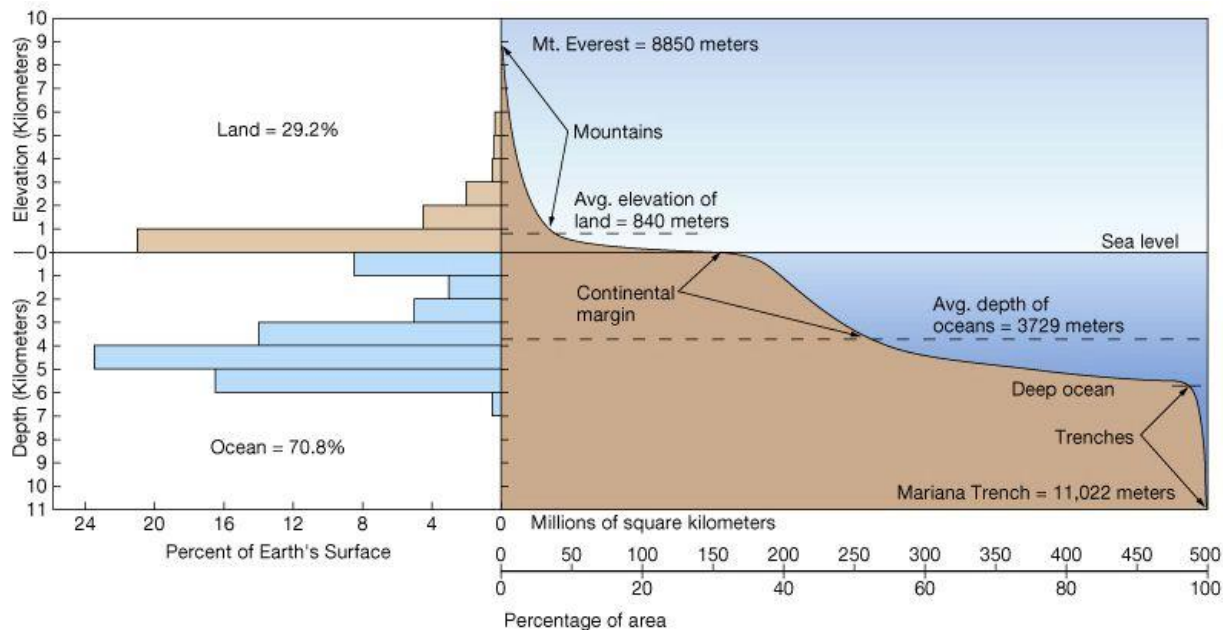
**Figure 92.** Ground water percolates downward through the unsaturated zone (shown lifted up) to the water table, then moves laterally to discharge points. In the bedrock, the water is channeled through fractures.

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/>

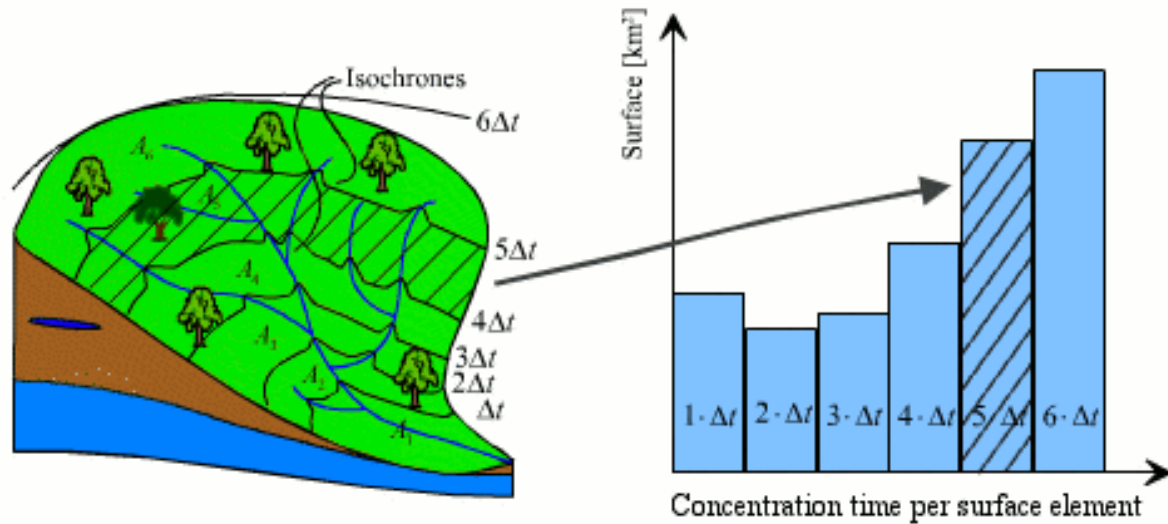
# Einzugsgebiets-Charakteristik III

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)

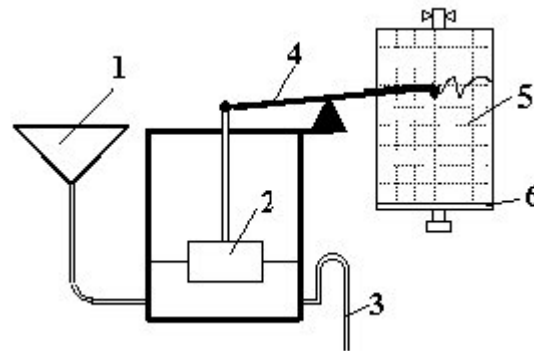
Messmethoden:

- Regenmesser
- Regenschreiber
- Niederschlagswaage
- meteorologisches Radar

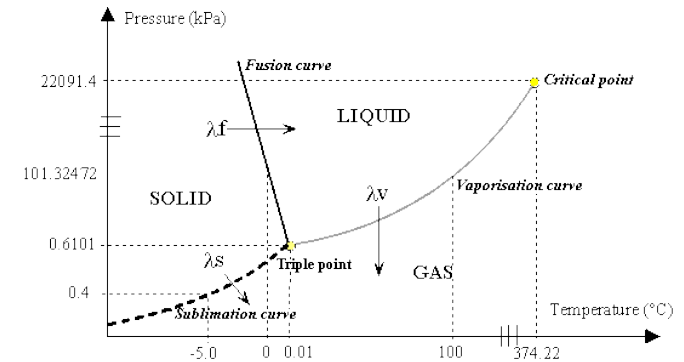
$$\frac{1 \text{ l}}{1 \text{ m}^2} = \frac{1 \text{ dm}^3}{1 \text{ m}^2} = \frac{10^{-3} \text{ m}^3}{1 \text{ m}^2} = 10^{-3} \text{ m} = 1 \text{ mm}$$



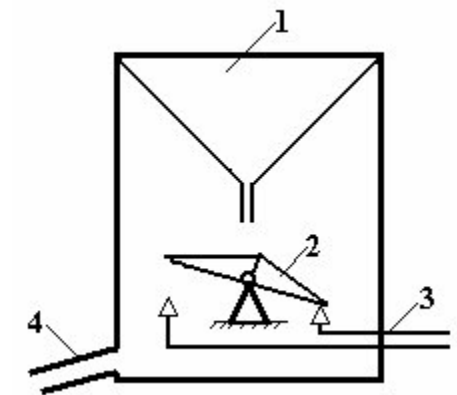
Hellmann Rain Gage (Pluviometer)



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



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

# Hydrologische Parameter

## Evaporation und Transpiration I

Evaporation:

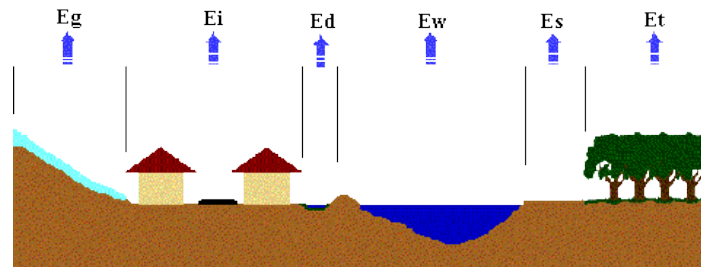
- Prozess, bei dem Wasser aus offenen Wasserflächen (Ozeane, Meere, Seen und Flüsse), von der unbedeckten Boden und von bedeckten Oberflächen (Schnee und Gletscher) in den dampfförmigen Zustand übergeht
- meteorologischen Einflussfaktoren der Verdunstung: verfügbare Wassermenge, Sonneneinstrahlung, Luftdruck 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. Evapotranspiration ist die Gesamtmenge an Wasser in Form von Dampf in Atmosphäre, Hydrosphäre, Biosphäre, Lithosphäre und Anthroposphäre



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 <sup>2</sup> ]
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 <sup>3</sup> ]
δe	humidity deficit [kPa]
cp	Specific heat capacity of air (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
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)

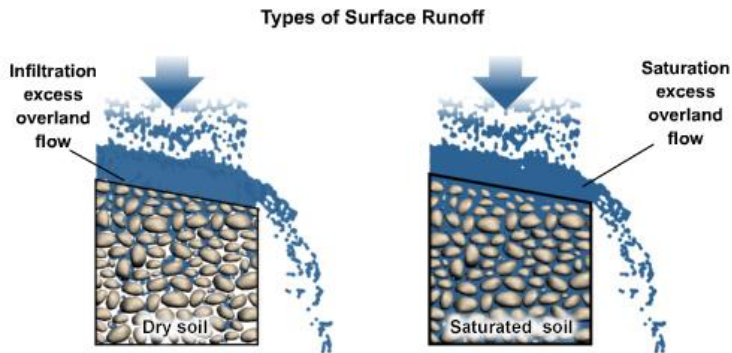
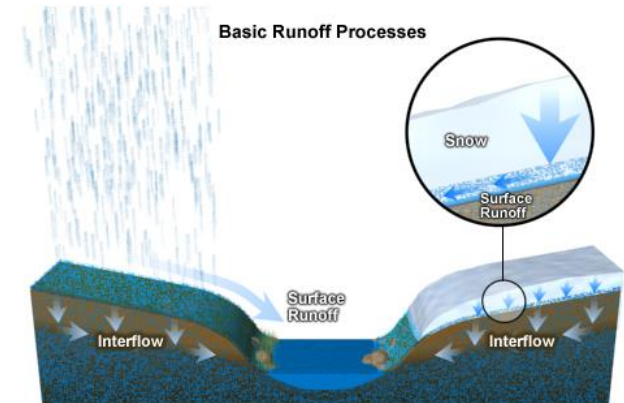


# Hydrologische Parameter

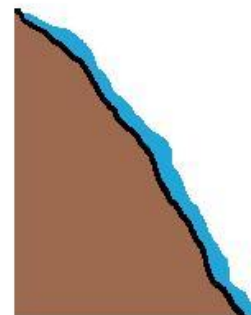
## Abfluss I

Abflusstypen:

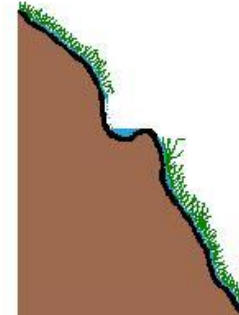
- oberirdischer Abfluss (Overland Flow)
- unterirdischer Abfluss (Lateraler Abfluss, Interflow)
- Basisabfluss (Stream Flow)



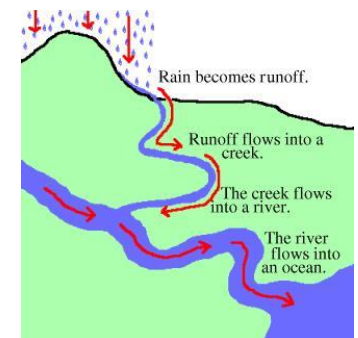
Note: Enlarged soil particles are not drawn to scale.



Bare ground has a great deal of runoff.



Vegetation and ponds reduce runoff.

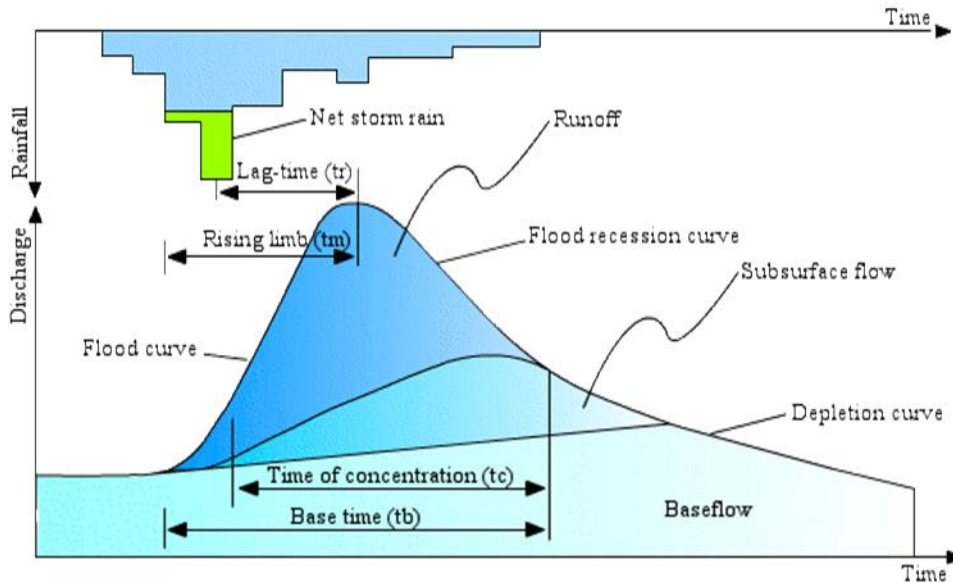


# Hydrologische Parameter

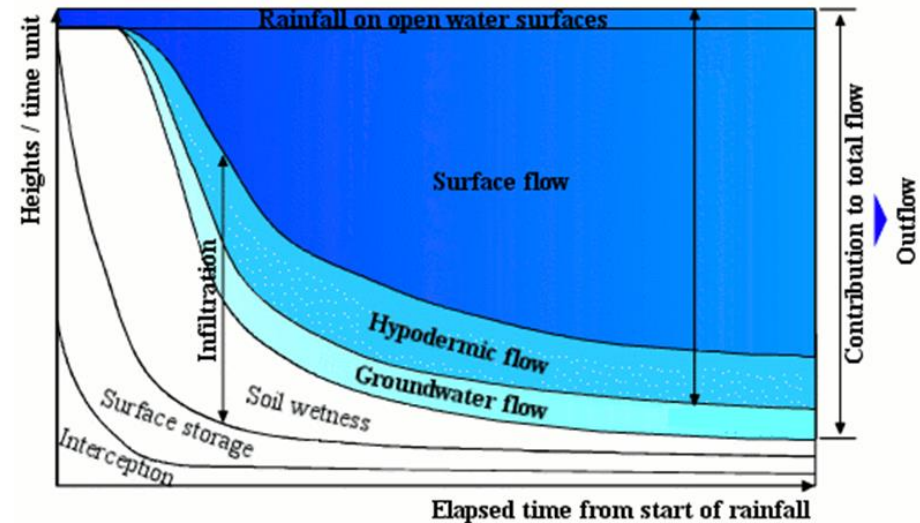
## Abfluss II

Hydrograph:

- graphische Darstellung der Strömungsrate (Entladung) gegenüber der Zeit an einer bestimmten Stelle in einem Fluss oder einem Kanal oder Leitung
- die Fließgeschwindigkeit wird typischerweise in  $\text{m}^3$  dargestellt



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



Source: water.me.vccs.edu

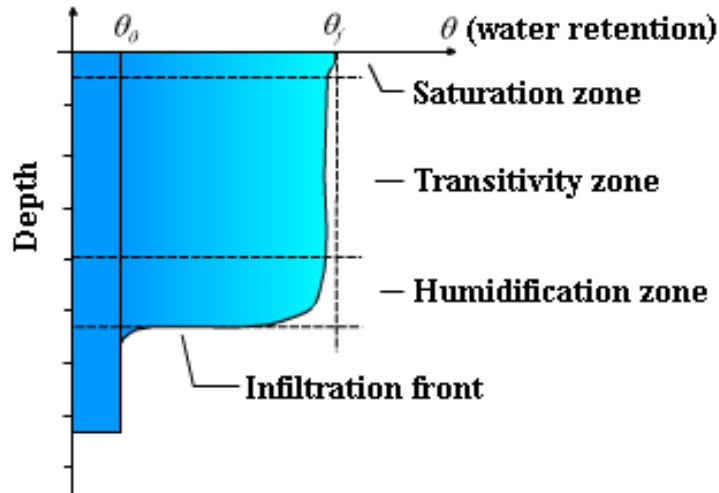
# Infiltration I

Infiltration:

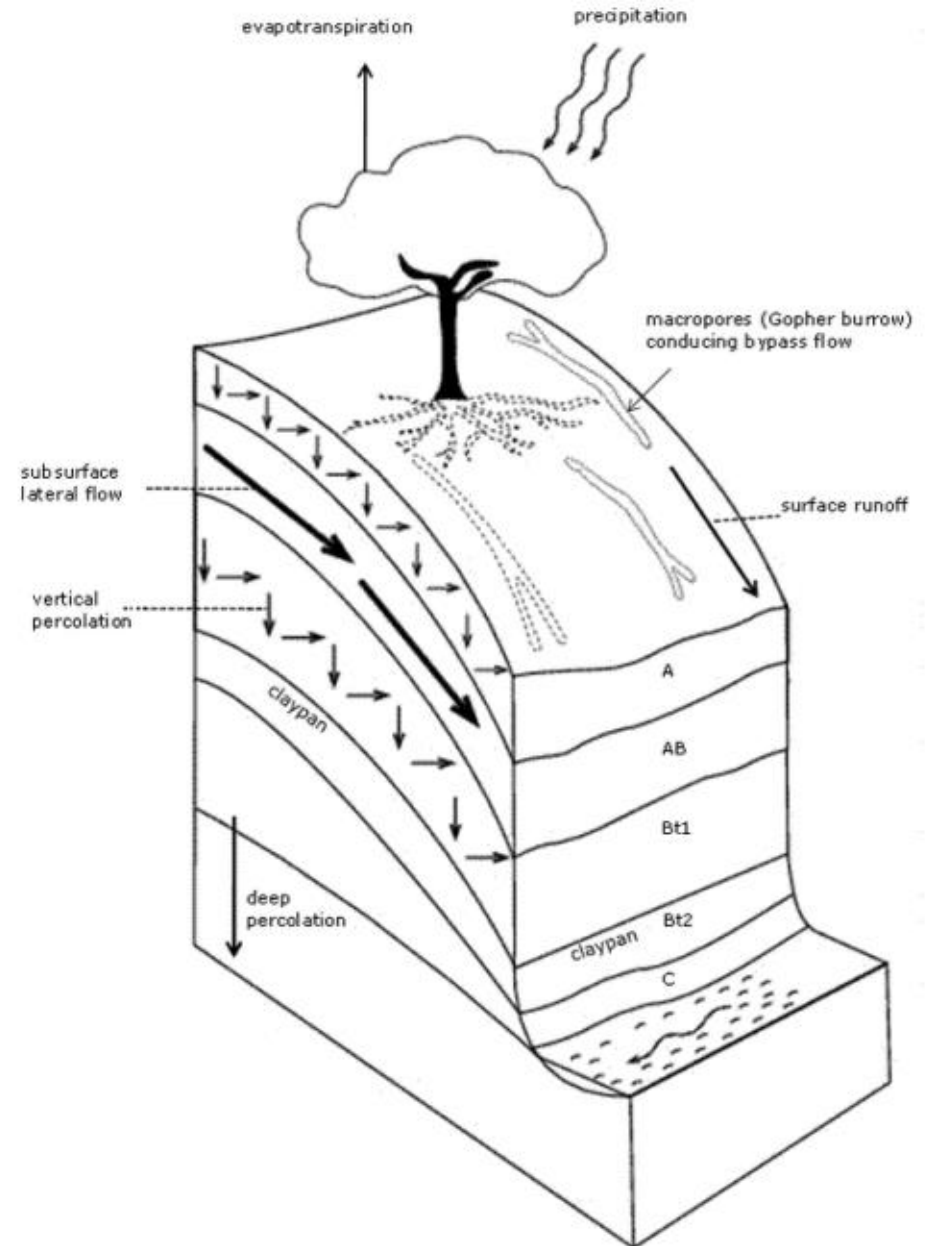
- ist der Wasserfluss durch die Bodenoberfläche in einem porösen Medium unter Schwerkraftwirkung und Druckeffekten

Perkolatıon:

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



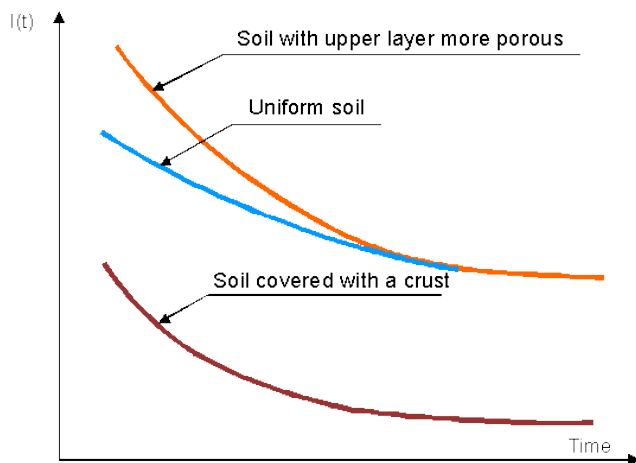
Characteristics of the hydric profile during infiltration (Musy, 2001).



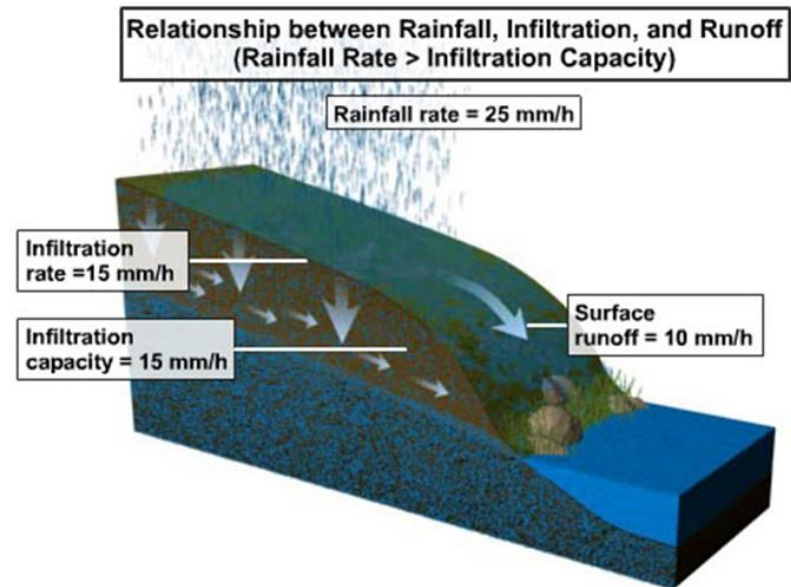
Conceptual diagram of a soil profile illustrating the multiple flow paths through which water moves through soil (Modified from O'Geen et al. 2010)

# Infiltration: kontrollierende Faktoren

- Niederschlag (Menge, Intensität, Dauer)
- Bodeneigenschaften (Bodenverdichtung durch Regentropfen + andere Effekte)
- initiale Bodenfeuchte
- Bodentyp (Textur, Struktur, hydrodynamische Eigenschaften → Einfluß von Kapillarkräften und Adsorption)
- Boden- und Landbedeckung → Vegetation hat pos. Einfluss auf Infiltration durch Verzögerung der Infiltration
- Topographie und Hangmorphologie
- Evapotranspiration



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

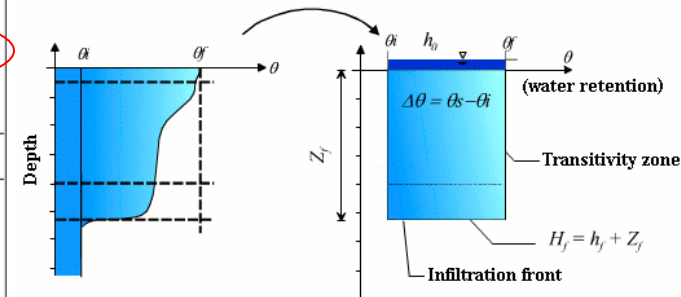


# Infiltration – Modellansätze zur Berechnung

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] $\gamma$ - constant depending on the soil type
Kostiakov	$i(t) = i_0 t^{-\alpha}$	$\alpha$ - parameter depending on soil conditions
Dvorak-Mezencev	$i(t) = i_0 + (i_1 - i_0)t^{-b}$	$i_1$ - 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 [cm s <sup>-0.5</sup> ] $A$ - gravity component depending on hydraulic conductivity at saturation [cm/s]
Dooge	$i(t) = a(F_{max} - F_t)$	$a$ - 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

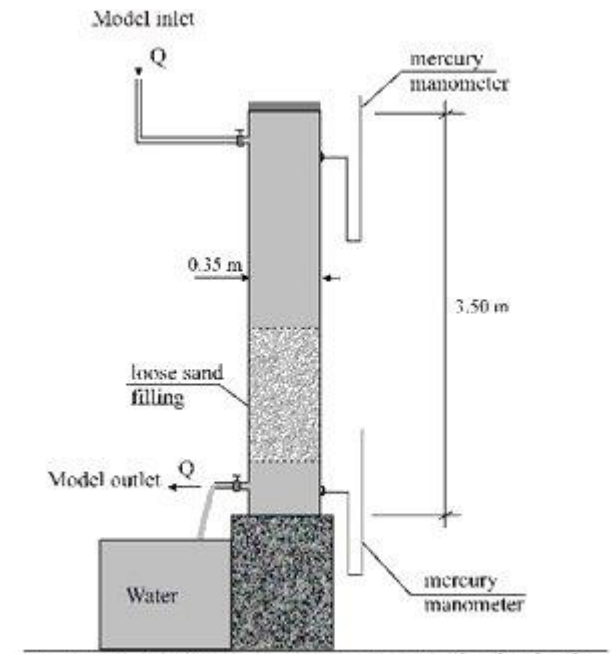


# Hydraulische Durchlässigkeit: Darcy's Experiment

Henry Darcy (1803-1858):

- französischer Wasserbauingenieur
- sein Auftrag: Mitte des 19. Jahrhunderts Wasserwerke in Dijon zu vergrößern und zu modernisieren
- verwendete Sandfilter zur Klärung des Wassers
- Darcy entwarf eine vertikale Versuchstank um den 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

→ dies führt zum Darcy-Gesetz



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 [m<sup>3</sup>/s]

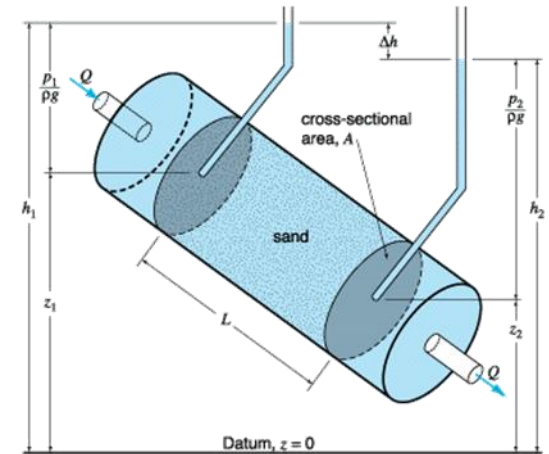
$A$  ... Querschnittsfläche [m<sup>2</sup>]

$K$  ... hydraulische Leitfähigkeit [m/s]

$\Delta h$  ... 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:

- kann auch für laminare Strömung durch ungesättigten Boden angewendet werden
- der Permeabilitätskoeffizient (Wasserdurchlässigkeit) in einem ungesättigten Boden kann im Allgemeinen nicht als konstant angenommen werden → deshalb Variable, die in Abhängigkeit vom Wassergehalt oder dem 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.

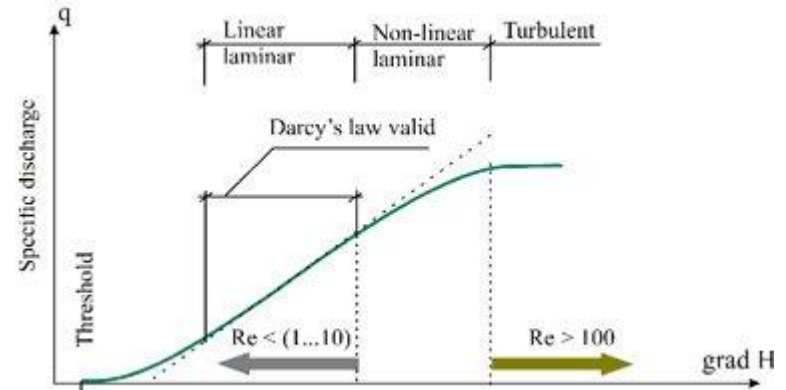
This article describes the many contributions Darcy made to hydraulics, including Darcy's Law. But what many hydrogeologists may not realise is that Darcy made other contributions to science and engineering that are possibly less familiar. He was the first to describe aquifer resistance, he furnished 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

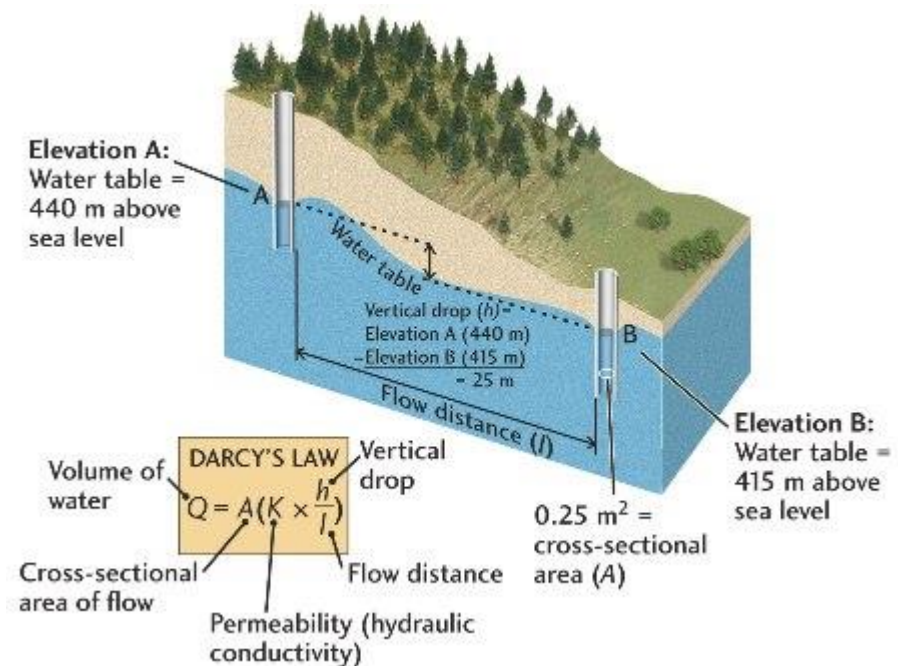
© Springer-Verlag 2008

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





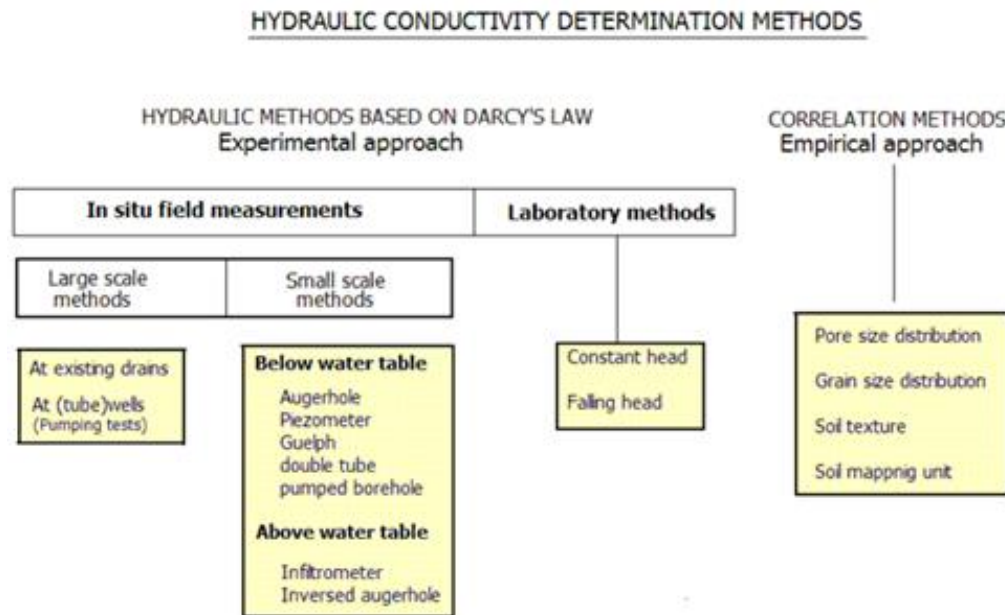
# Permeabilität – Hydraulische Leitfähigkeit

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

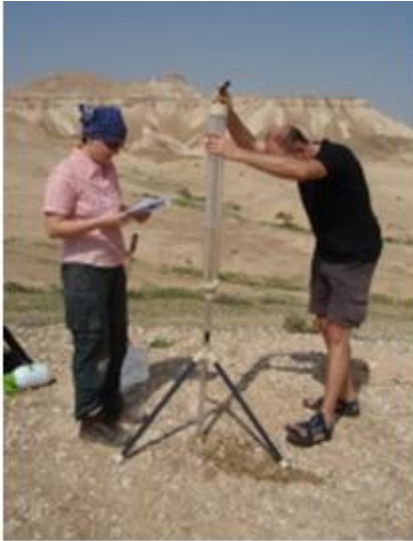
hydraulische Leitfähigkeit:

- 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

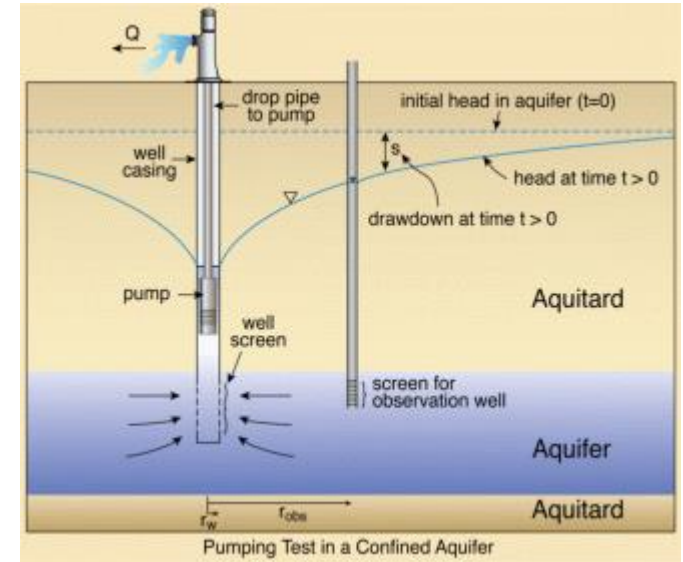


Source: en.wikipedia.org

# Permeabilität – Hydraulische Leitfähigkeit

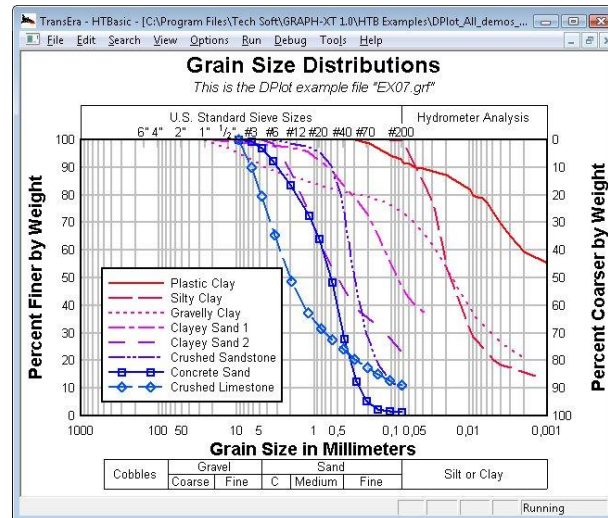


Quelle: demopark.de

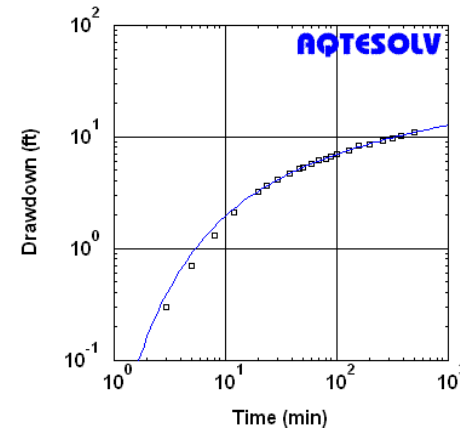


Pumping Test in a Confined Aquifer

Quelle: midwestgeo.com



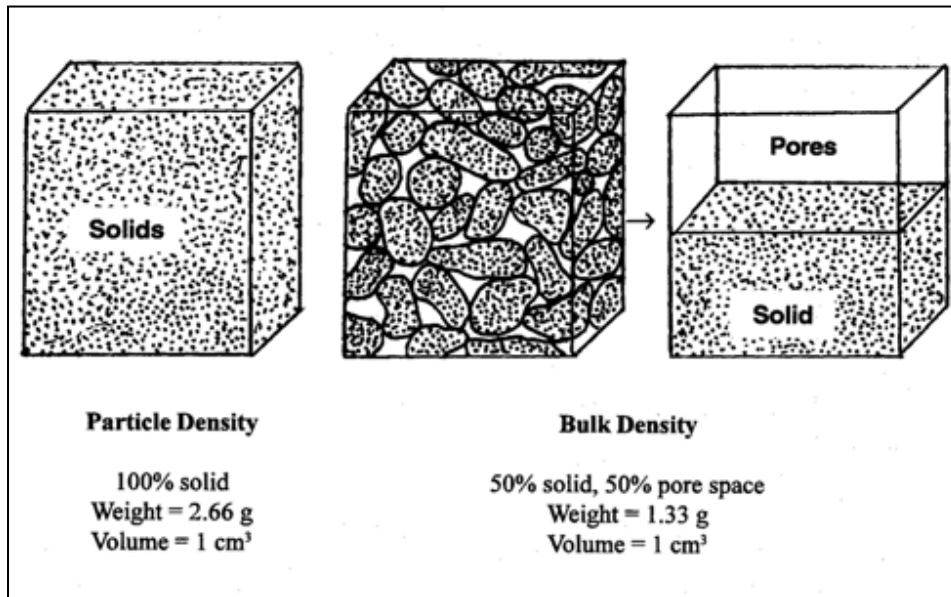
Quelle: techsoft.de



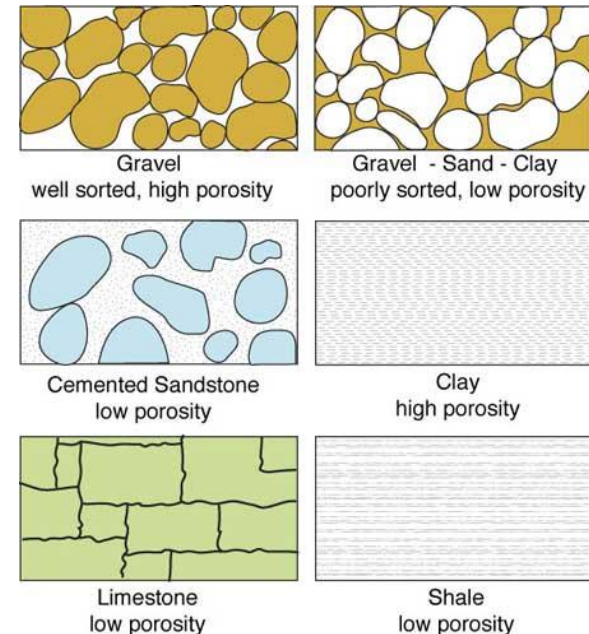
- Obs. Wells
- Well 1
- Aquifer Model
- Confined
- Solution
- Theis
- Parameters
- T = 1.01E+4 gal/day/ft
- S = 2.0E-5
- Kz/Kr = 1.
- b = 18. ft

# 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.

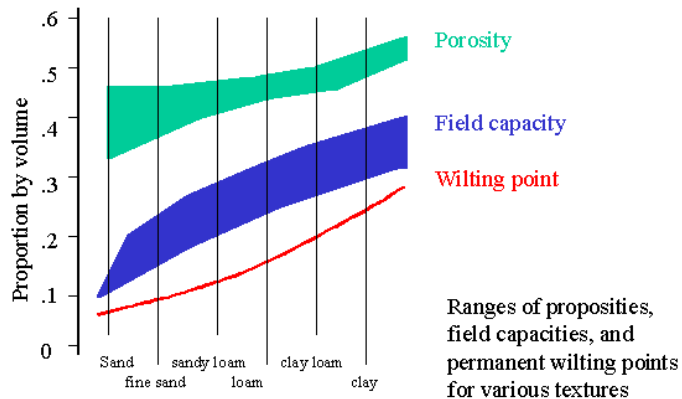


Source: passel.unl.edu



Source: Adini, 2011

# Wasser in der ungesättigten Zone – Bodenwasserspeicher II



Source: Dingman, 1994

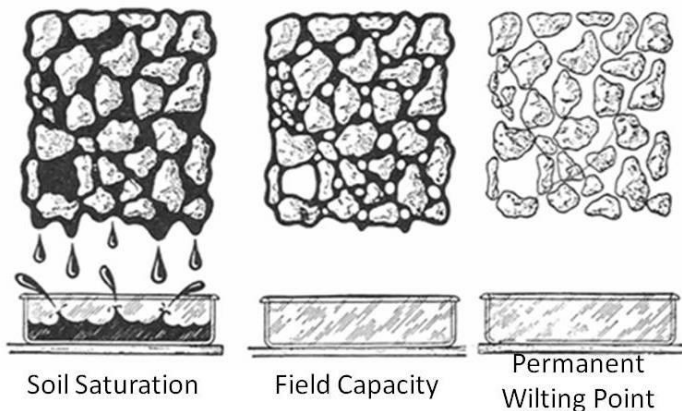


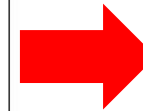
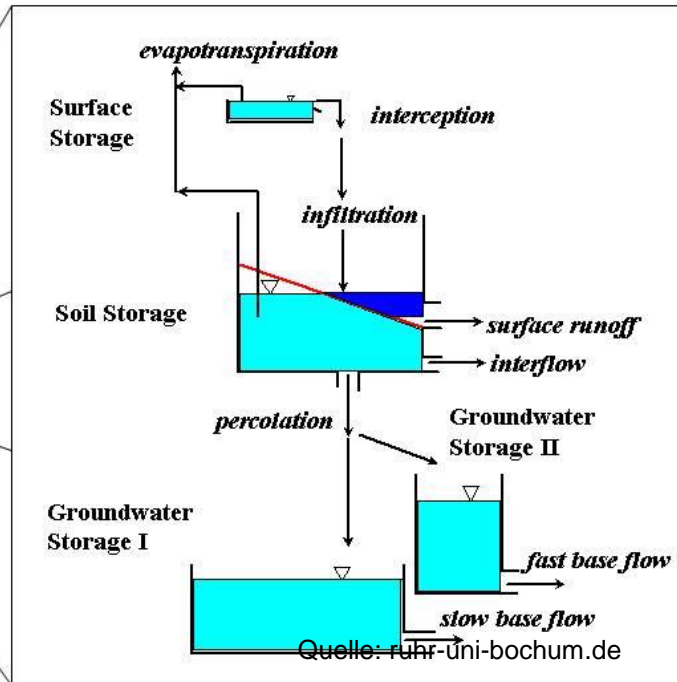
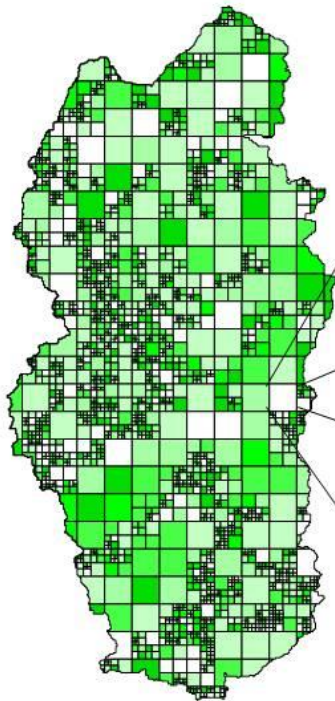
Diagram Provided by [http://www.biology.lsu.edu/webfac/dlongstreth/plphys/lecture\\_4.htm](http://www.biology.lsu.edu/webfac/dlongstreth/plphys/lecture_4.htm)

- 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?

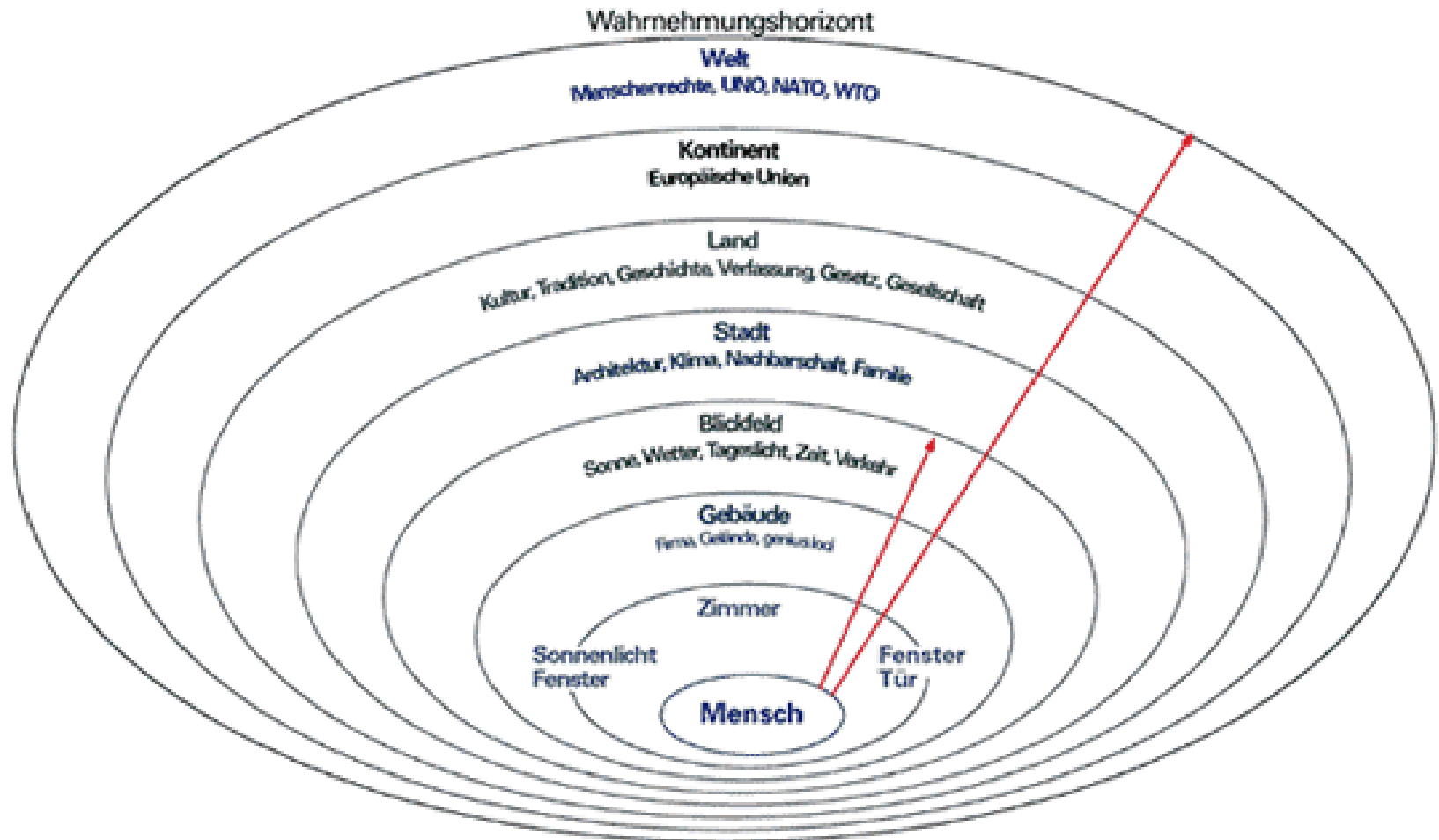
Modellprozedur → Kodierung in Programmiersprache

Modelleichung → optimale Parametrisierung

Modelltest → Überprüfung des Modells



# Wahrnehmungsmodell



**WAHRNEHMUNGSSPHÄREN**  
Beziehung zwischen  
Mensch und Umwelt

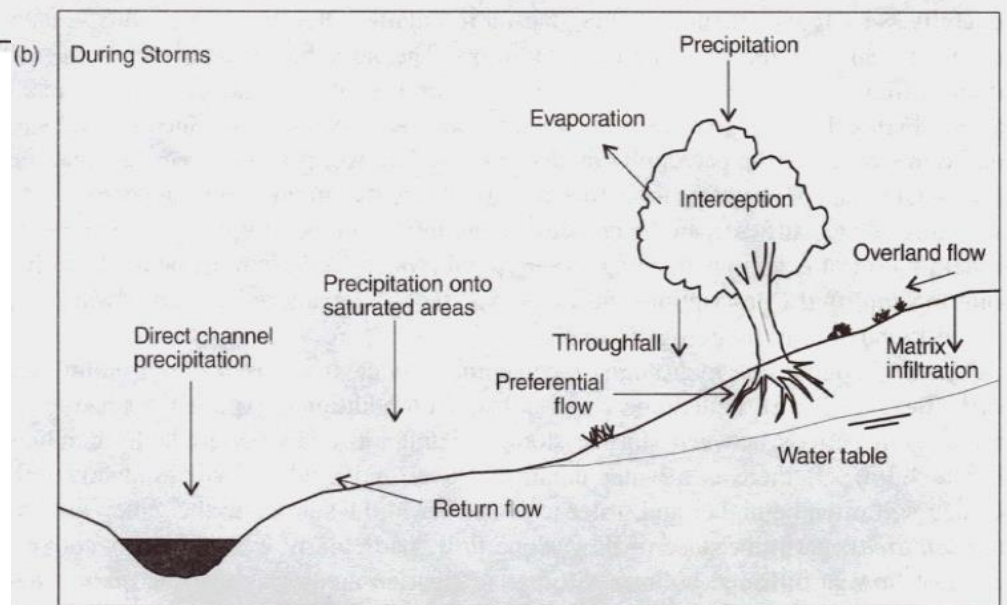
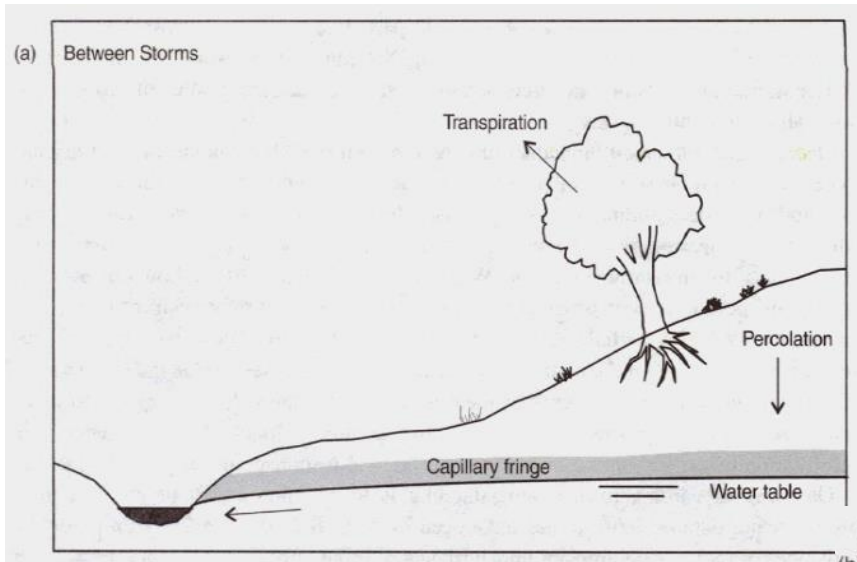
# Wahrnehmungsmodell

- 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:

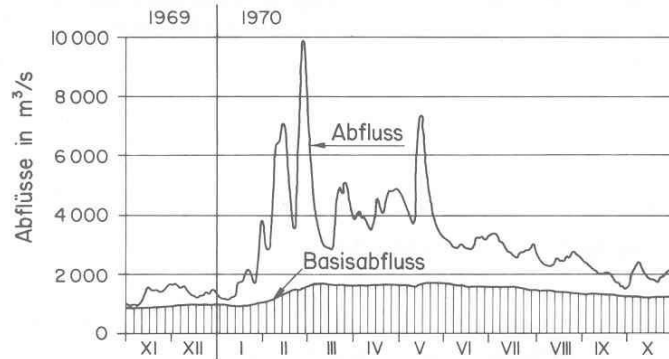
- fasst die Beobachtungen in einem Einzugsgebiet zusammen
- subjektiv, an den Beobachter gebunden

# Zeitabhängiges Wahrnehmungsmodell



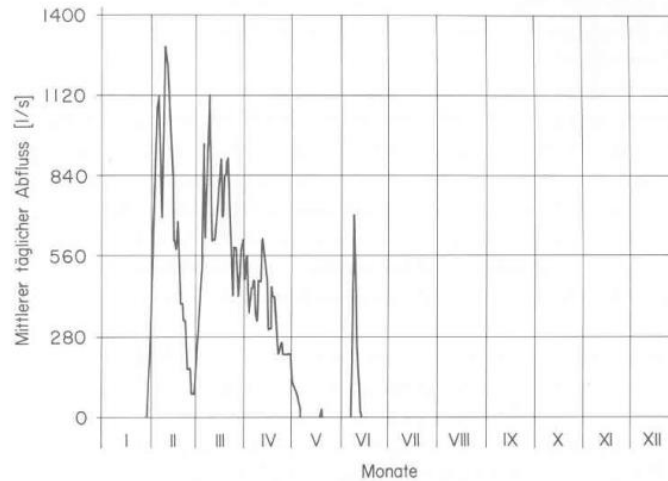
Beven, 2001

# Wahrnehmungsmodell

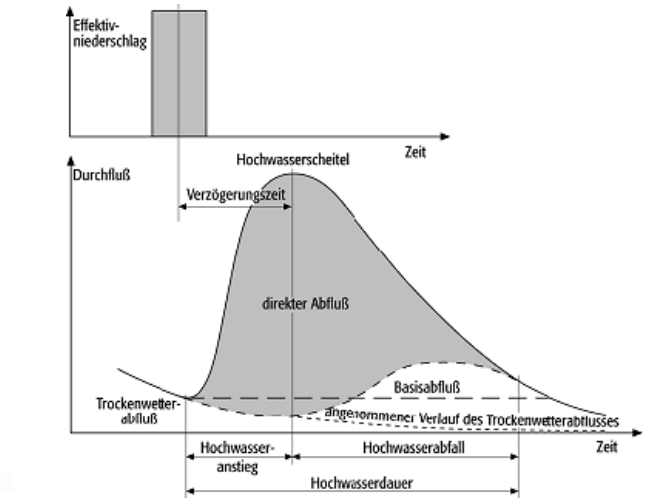


Beispiel einer Jahresganglinie eines perennierenden Flusses (Dracos, 1980, S. 109)

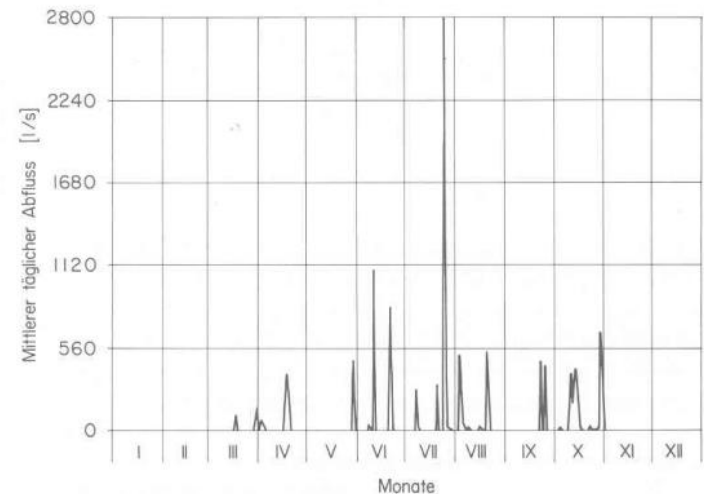
Beispiel einer Jahresganglinie eines intermittierenden Flusses (Dracos, 1980, S. 109)



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



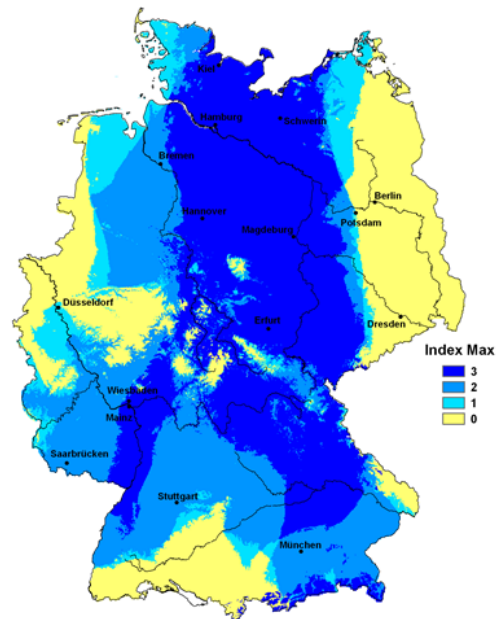
[http://www.geodsz.com/deu/d/images/1301\\_hochwasserganglinie.png](http://www.geodsz.com/deu/d/images/1301_hochwasserganglinie.png)



# Steuerfaktoren für dominierende Prozesse

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

Extremwerte der Bodenfeuchte am 26.05.2013



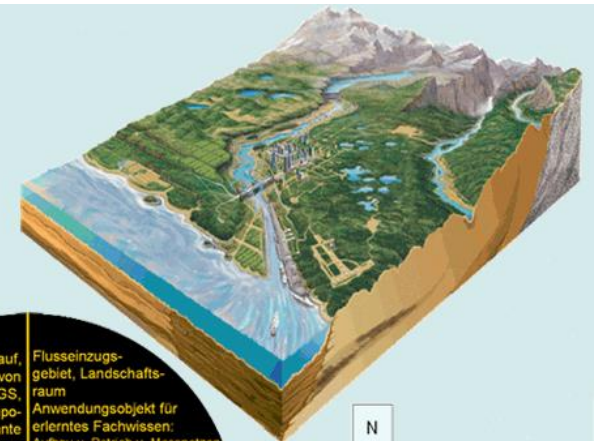
Quelle: dwd.de

0 – kein Maximum überschritten  
1 – der dritthöchste Bodenfeuchtwert wird überschritten  
2 – der zweithöchste Bodenfeuchtwert wird überschritten  
3 – der höchste Bodenfeuchtwert wird überschritten – neues absolutes Maximum

Für jeden Rasterpunkt werden für den betrachteten Tag aus dem Zeitraum 1961 bis zum letzten Jahr die drei höchsten Bodenfeuchten bestimmt. Für denselben Tag im aktuellen Jahr werden diejenigen Gebiete gekennzeichnet, in denen einer der drei Maxima überschritten wird.

# Konzeptionelles Modell

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

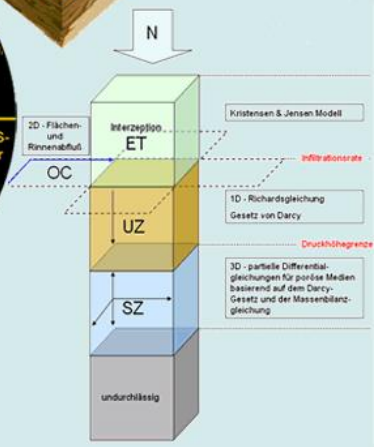
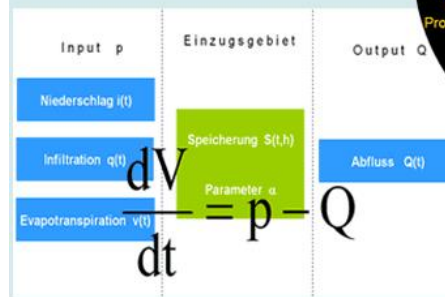


Wasserkreislauf, Illustration von J.M. Evans, USGS, Wasserhaushaltskomponenten und relevante Fließbahnen auf globalem Maßstab.

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:

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


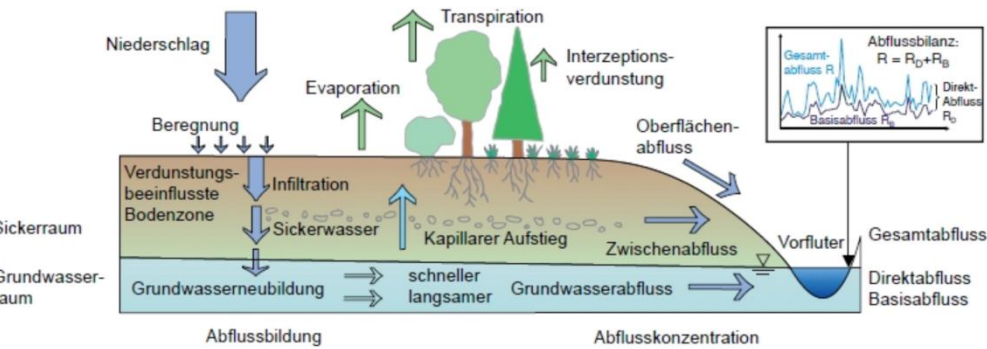


# Konzeptionelle Modelle

einfacher Ansatz: Massenbilanz

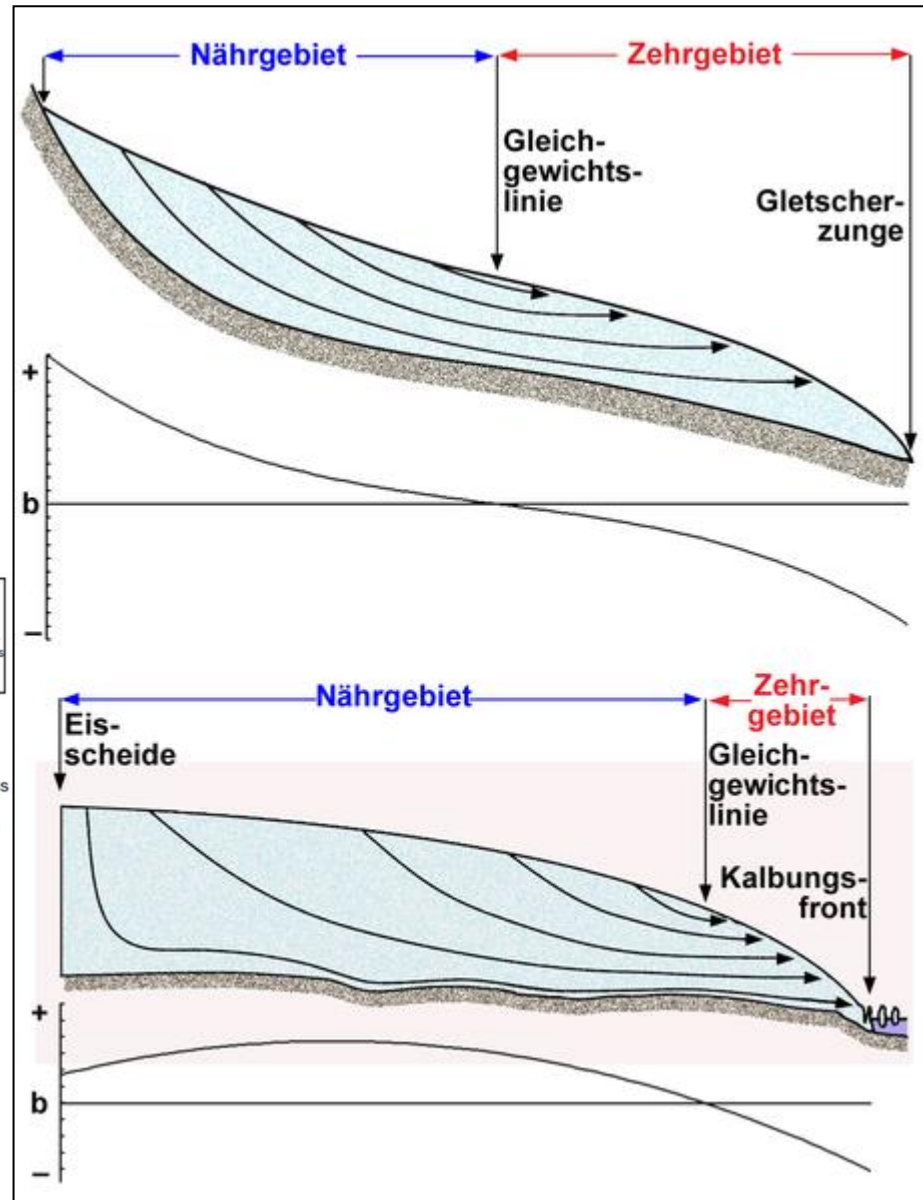
komplexer Ansatz: gekoppelte nicht-lineare Differentialgleichungssysteme

Definition der Randbedingungen und Gültigkeitsbereiche



(Quelle: www.lfu.bayern.de)

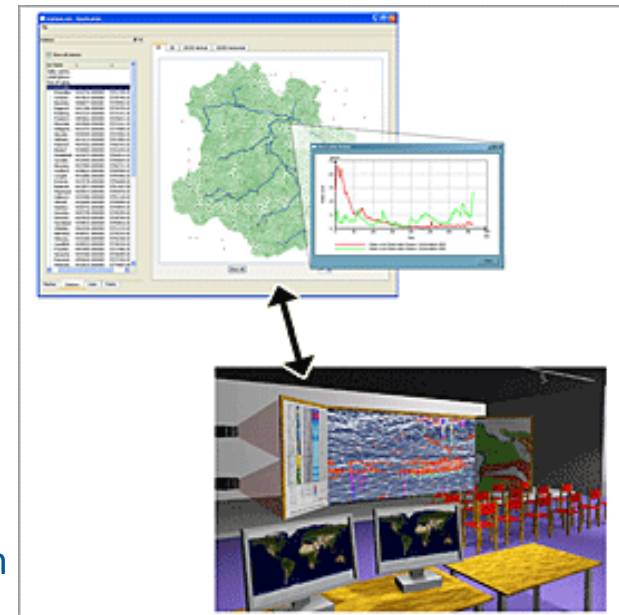
Schematischer Querschnitt und spezifische Massenbilanz (b) eines typischen Talgletschers (oben) und eines Eisschildes





# Modellprozedur

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



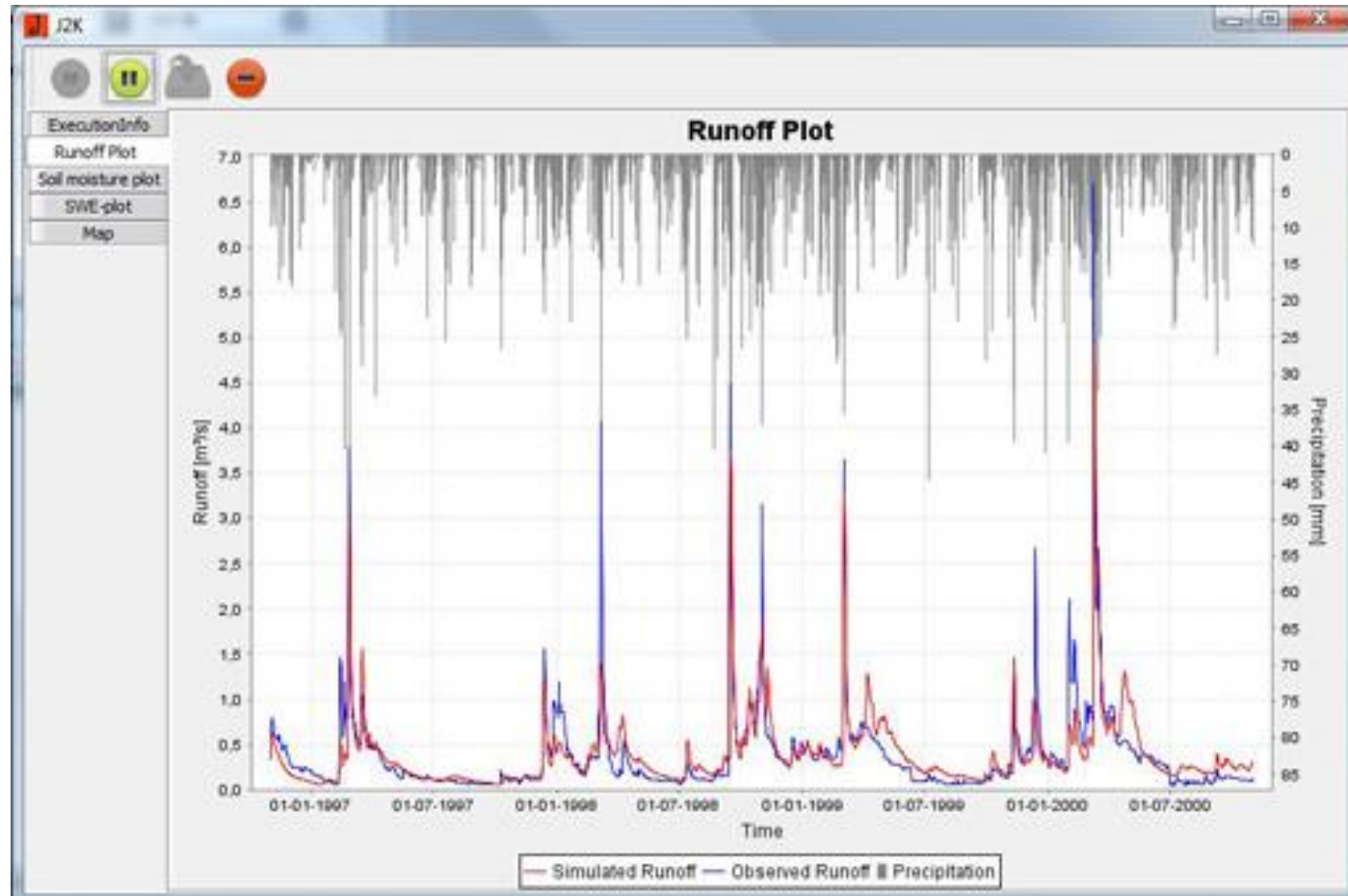
Quelle: ufz.de

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

# Modelleichung

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



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

# Modelleichung

- 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

# Modelltest

Validierung: Überprüfung des Wahrheitsgehaltes des Modells gegenüber Realität

das geeichte Modell wird ohne weitere Anpassung auf einen anderen Datensatz “blind” angewendet und die erzeugten Daten (simulierten Ergebnisse) mit den gemessenen Daten verglichen

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**

**Fragen?**

**nächste Vorlesung: 9.Mai 2014**

# 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.hydrology.uni-kiel.de/download/lehre/wise/hydrol_modelling/m192_vl1.pdf)
- [http://www.ufz.de/export/data/1/19323\\_Blockseminar\\_volk\\_2010.pdf](http://www.ufz.de/export/data/1/19323_Blockseminar_volk_2010.pdf)