

V Hydrosystemanalyse

Hydrologische Modellierung

- Einführung -



Dresden, 24.04.2015

Agnes Sachse^{1, 2}

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



Dozentin: Dipl.-Geogr. 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

The screenshot shows the UFZ website profile for Agnes Sachse. Key information includes:

- Name:** Dipl.-Geogr. Agnes C. F. Sachse, geb. Gröbe
- Kontakt/Adresse:** Department Umweltinformatik, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Postfach 50, 01418, Leipzig, Germany. Tel: 0341 230 3020, Fax: 0341 230 3026, Email: agnes.sachse@ufz.de
- Lebenslauf / Akademische Ausbildung:**
 - 01/2012 - 03/2012: Wiss. Mitarbeiterin im Bsp. Umweltinformatik, Schwerpunkt: hydrogeologische und hydrologische Modellierung
 - 03/2009 - 03/2012: Doktorandin im Department Earth and Environmental Science, Theme: Characterisation and modeling of the hydrology of the western drainage basin of the Dead Sea, Israel, Palestine (D.M.M.H.-Project)
 - 11/2007 - 03/2009: wissenschaftlicher Mitarbeiterin an der WFO Cottbus, Lehrstuhl für Bodenlehre und Bodenbewertung. Thema: Zahl + räumliche Entwicklung von Wurzelwachstum, -tätigkeit und -insulation in der initialen Phase der Ökosystemgenese
 - 09/2007: Diplom-Geographin, Universität Leipzig (Diplomarbeit: "Vermessung des Bodenwasserhaushaltsmodells (BWHM) auf Basis von Messdaten der (potenzierten) Brände und Durchführung von Regressionsanalysen")
 - 09/2006: Bachelor-Prof. in Meteorologie, Universität Leipzig (Dr. U. Hoffmann, Geometeorologie Brände)
 - 10/2002 - 09/2007: Hauptstudium der Geographie (Bachelorbereich: Meteorologie, Geologie), Universität Leipzig

Organisatorisches

Vorlesung, Freitag, jeweils 14:50 – 16:20 Uhr

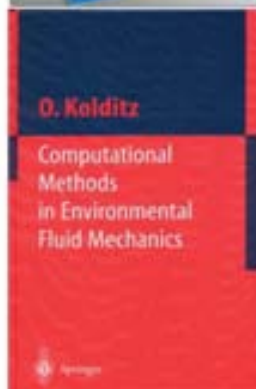
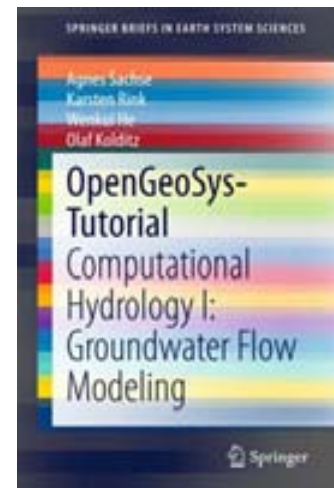
Datum	Vorlesungsinhalt	Dozent
24.04.2015	V1: Einführung	A. Sachse
<i>01.05.2015</i>	<i>Feiertag</i>	
08.05.2015 (bereits ab 13:00 Uhr)	V2, V3: Hydrolog. Modellierung im humiden / ariden Raum	A. Sachse
15.05.2015	-	
22.05.2015	V4: Einführung in Geodatenmanagement (ArcGIS), Einführung numerische Grundwasserströmungsmodellierung (OpenGeoSys, OGS Data Explorer)	A. Sachse
<i>29.05.2015</i>	<i>Pfingsten</i>	
05.06.2015	V5: OpenGeoSys-Übung: Theis Problem	A. Sachse
12.06.2015	V6, V7: OpenGeoSys-Übung: Ammer Catchment	A. Sachse

Fragen?



Organisatorisches

Vorlesungsskript



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.
- Matthes, G. (1973): Die Beschaffenheit des Grundwassers. - In: Lehrbuch der Hydrogeologie Bd. 2, Gebr. Borntraeger, Berlin-Stuttgart
- Matthes, 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.
-

Vorlesung 1

- 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)

Black-Box-Modell (Fitting-Parameter)

deterministisch

stochastisch

Gleichgewicht

Ungleichgewicht

analytisch

numerisch

Management

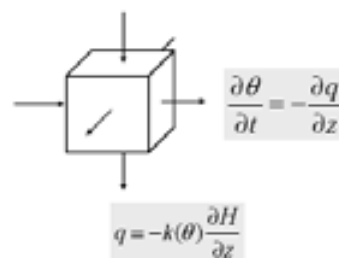
Forschung

“White-Box”-Modell

- Deterministische Modelle
- Physikalisch basierte Modelle
- Prozessorientierte Modelle

z.B. lokale Massenbilanz

Transportgleichung


$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z}$$
$$q = -k(\theta) \frac{\partial H}{\partial z}$$

Physikalisch basierte Modelle

	Lokale Bilanz	Flußdichte	Transportgleichung
Wassertransport	$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z}$	$q = -k(\theta) \frac{\partial H}{\partial z}$	$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right]$
Wärmeleitung	$\frac{\partial (c_v T)}{\partial t} = -\frac{\partial j}{\partial z}$	$j = -\lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial z}$	$\frac{\partial (c_v T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial z} \right]$
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



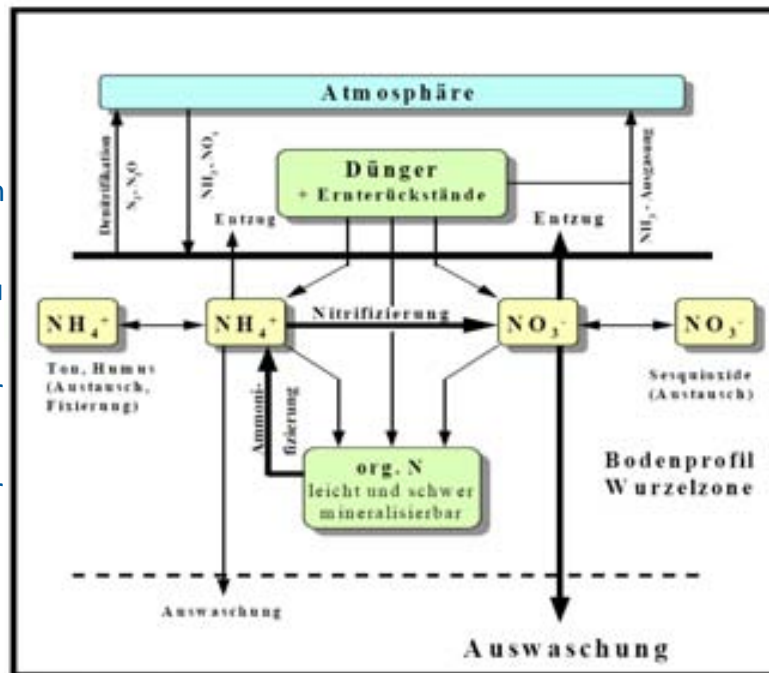
z. B. Pedotransferfunktion:

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

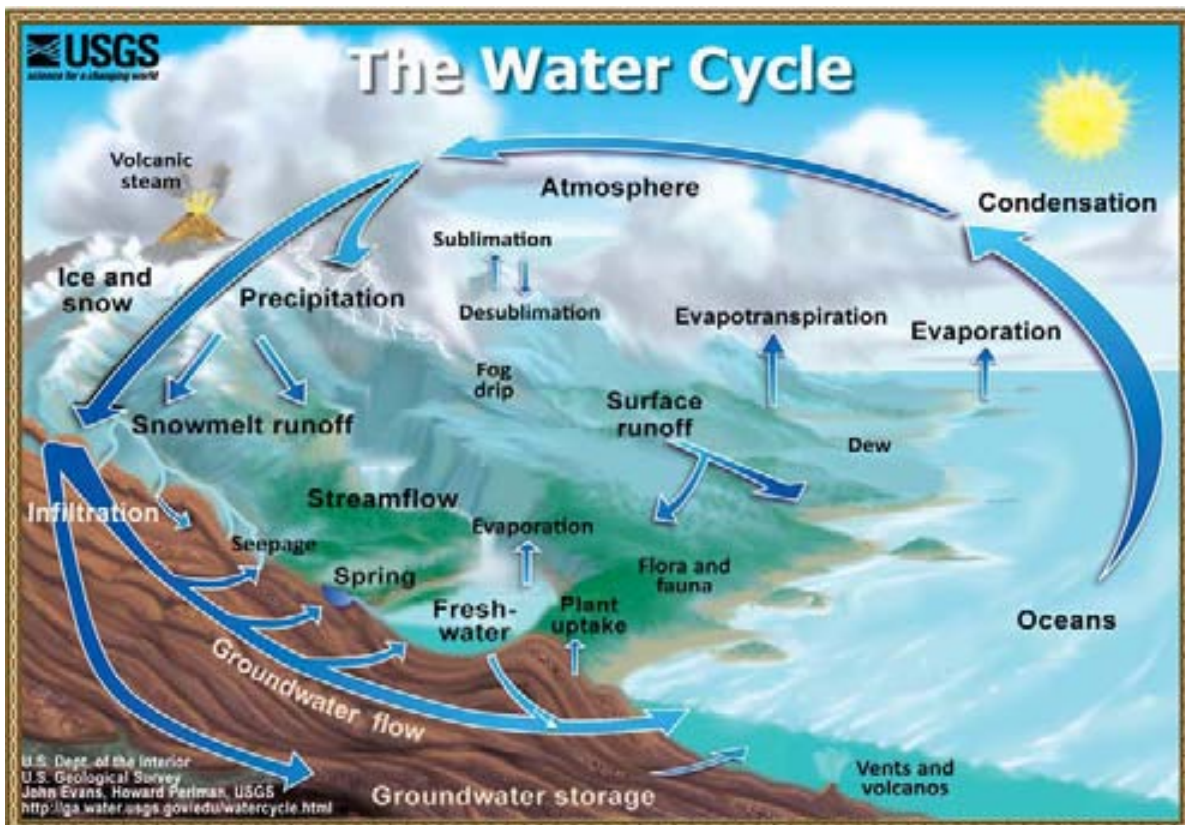
Modellerstellung

Simulationsmodell

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

Fragen?

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

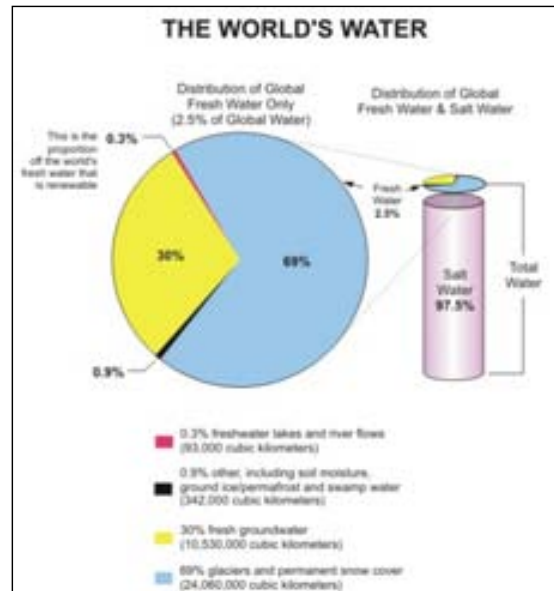
ET: Evapotranspiration

ΔS : Speicheränderung

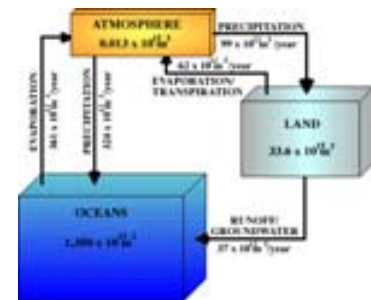
zeitliche Änderung der Komponenten:

Berücksichtigung der Bodenbedingungen,

Vegetationsbedeckung, Landnutzung



Source: desware.net



Source: ww2010.atmos.uiuc.edu

Hydrologie und Hydrogeologie

Ungesättigte Zone (vadose Zone):

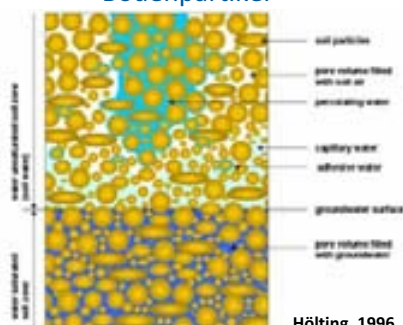
- OK: Erdoberfläche, UK: Kapillarraum
- Porenräume zwischen Bodenpartikeln bzw. Porenraum in Rissen + Spalten teils mit Wasser, teils mit Luft gefüllt
- Mächtigkeit: Meter bis mehrere hundert Meter



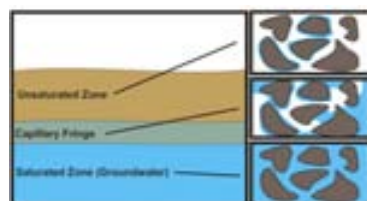
Source: dbstephens.com

Gesättigte Zone

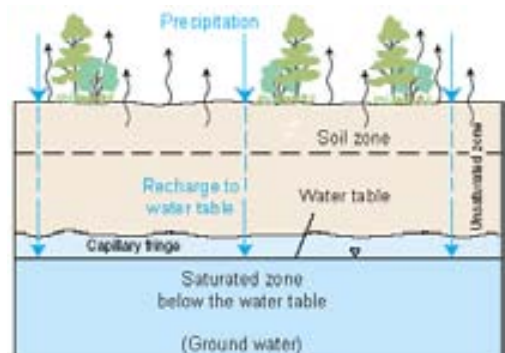
- Wasser füllt komplett Hohlräume zwischen Gesteins- und Bodenpartikel



Hörling, 1996



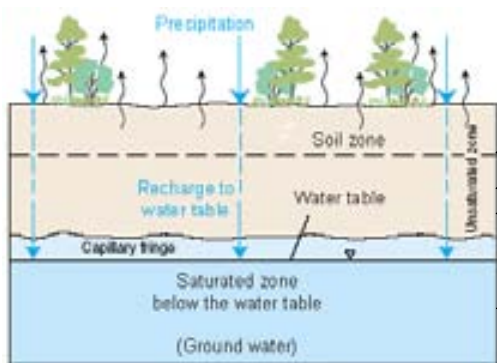
Adini, 2009



Source: USGS

Hydrologie und Hydrogeologie

- Prozessverständnis -



Source: USGS

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

Numerik, Grundwasserhydraulik: **O. Kolditz**

Bodenhydrologie: **T. Kalbacher**

Stofftransport im Grundwasser: **M. Walther**

Hydrological response analysis

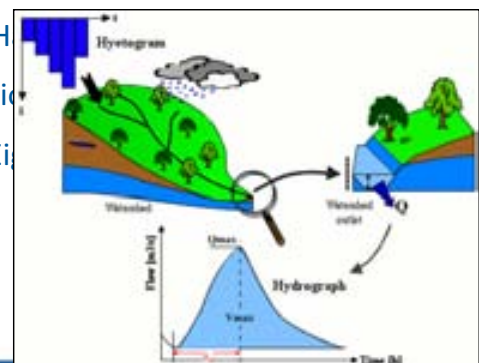
Niederschlag beeinflusst Einzugsgebiet → was ist die hydrologische "Antwort"?

- 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, H₀)
- physikalische Eigenschaften des UGs (Bodentyp, Vegetation)
- Struktur des Gewässernetzes (Dimension, hydraulische Eigenschaften)
- Bodenfeuchte

Hydrological response of a catchment (Musy, 2001)



Basiswissen der Hydrologie

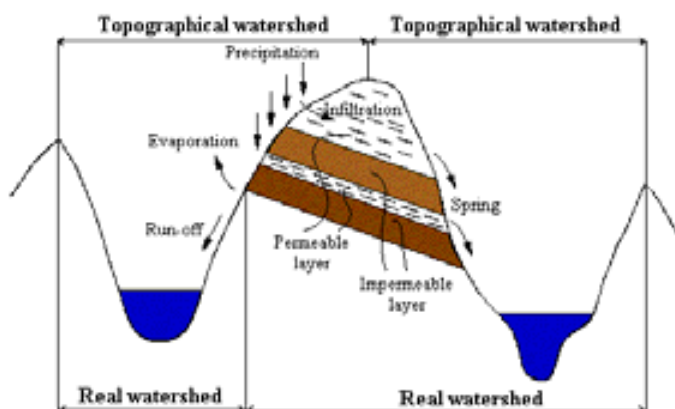
- Einzugsgebietscharakteristik
- Hydrologische Parameter (P, ET, Q,....)
- Infiltration (Darcy-Gesetz)
- Bodenwasserspeicherung

Einzugsgebiets-Charakteristik I

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

→ Tool für Abgrenzung Einzugsgebiet: ArcGIS

→ Vorlesung am 22.05.2015



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

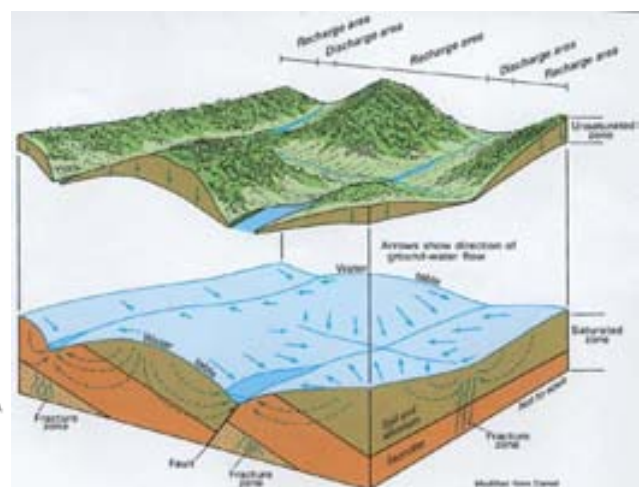


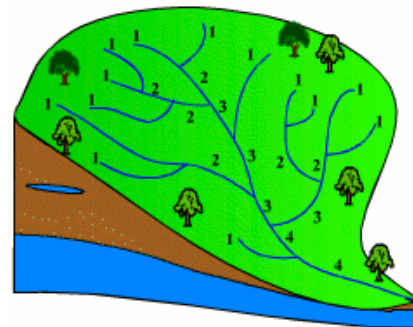
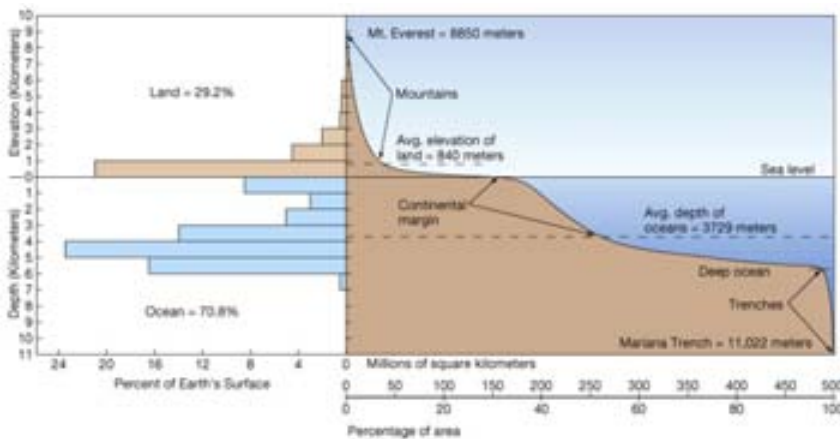
Figure 92. Ground water percolates downward through the unsaturated zone (shown filled up) to the water table, then moves laterally to discharge points. In the bedrock, the water is channeled through fractures.

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/>

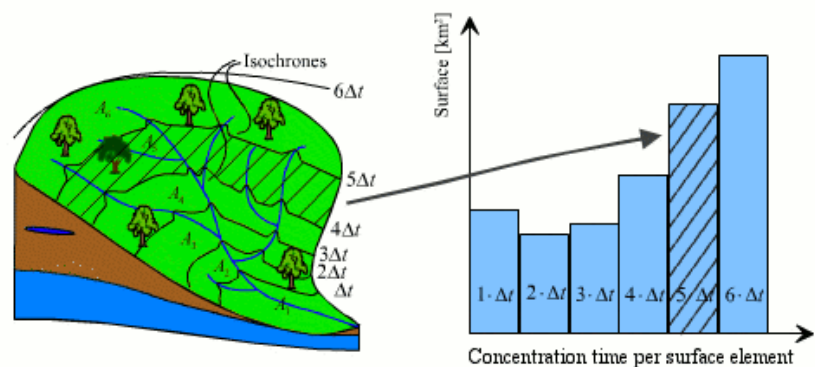
Einzugsgebiets-Charakteristik III

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)

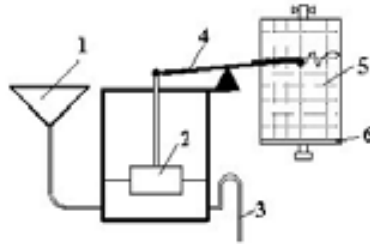
Messmethoden:

- Regenmesser
- Regenschreiber
- Niederschlagswaage
- meteorologisches Radar

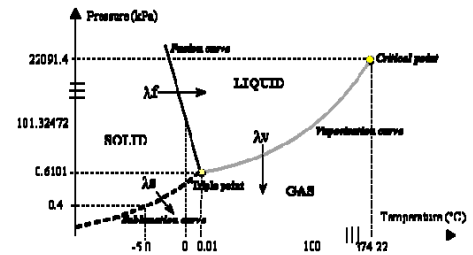
$$\frac{1 \text{ l}}{1 \text{ m}^2} = \frac{1 \text{ dm}^3}{1 \text{ m}^2} = \frac{10^{-3} \text{ m}^3}{1 \text{ m}^2} = 10^{-3} \text{ m} = 1 \text{ mm}$$



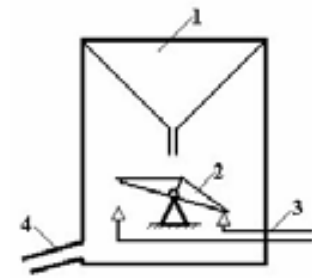
Hellmann Rain Gage (Pluviometer)



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:

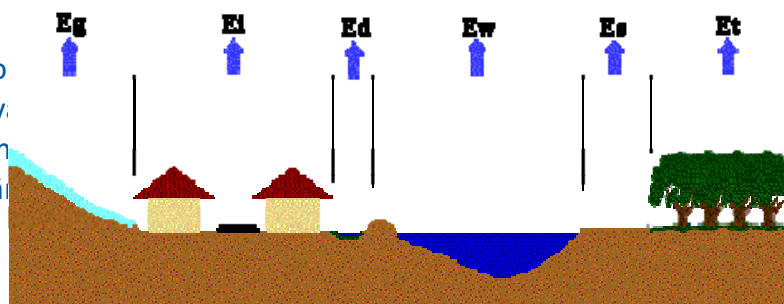
- Prozess, bei dem Wasser aus offenen Wasserflächen (Ozeane, Meere, Seen und Flüsse), von unbedecktem Boden und von bedeckten Oberflächen (Schnee und Gletscher) in dampfförmigen Zustand übergeht
- meteorologischen Einflussfaktoren der Verdunstung: verfügbare Wassermenge, Sonneneinstrahlung, Luftdruck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



Summe an Wasser in Form von Dampf in der Atmosphäre und in der Biosphäre

The components of evapotranspiration

Hydrologische Parameter

Evaporation und Transpiration II

Verdunstungsberechnung

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

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

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]
c _p	Specific heat capacity of air (J kg ⁻¹ K ⁻¹)
r _a	aerodynamic resistance [s/m]
r _s	diffusion resistance of evaporation surface [s/ m]

Penman-Monteith:

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

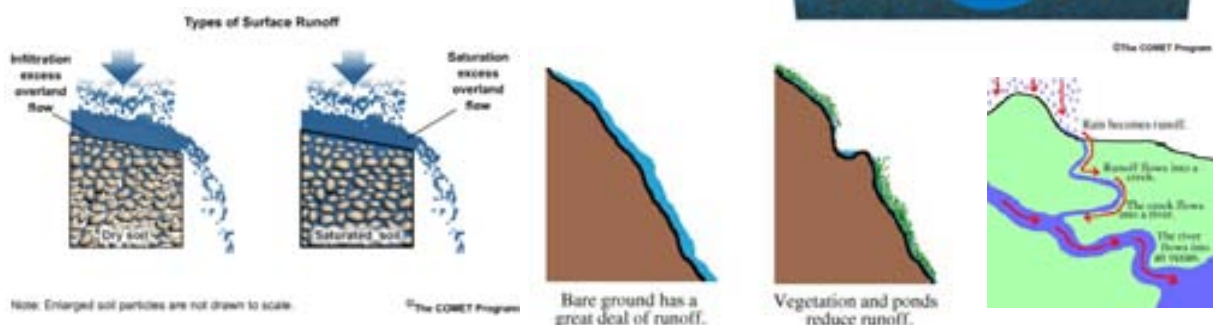
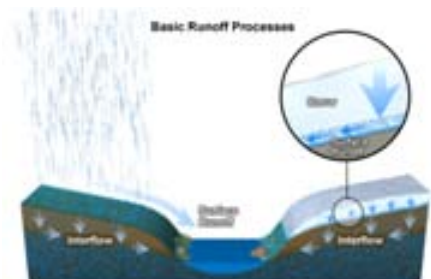
- notwendig: Tagesmitteltemperatur , Windgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit und Sonneneinstrahlung
- Monteith (1981) hat Penman Formel durch Verwendung des Effekts des Diffusionswiderstandes an der Verdampfungsoberfläche verbessert (Serban, Stanescu, Roman, 1989)

Hydrologische Parameter

Abfluss I

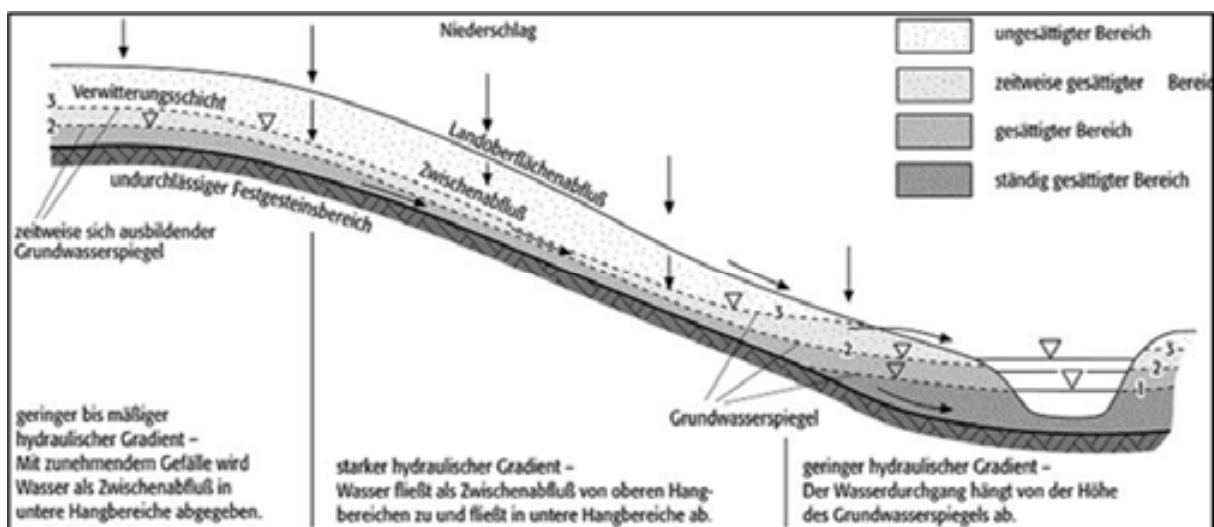
Abflusstypen:

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



Exkurs: Abflussentstehung in der Landschaft

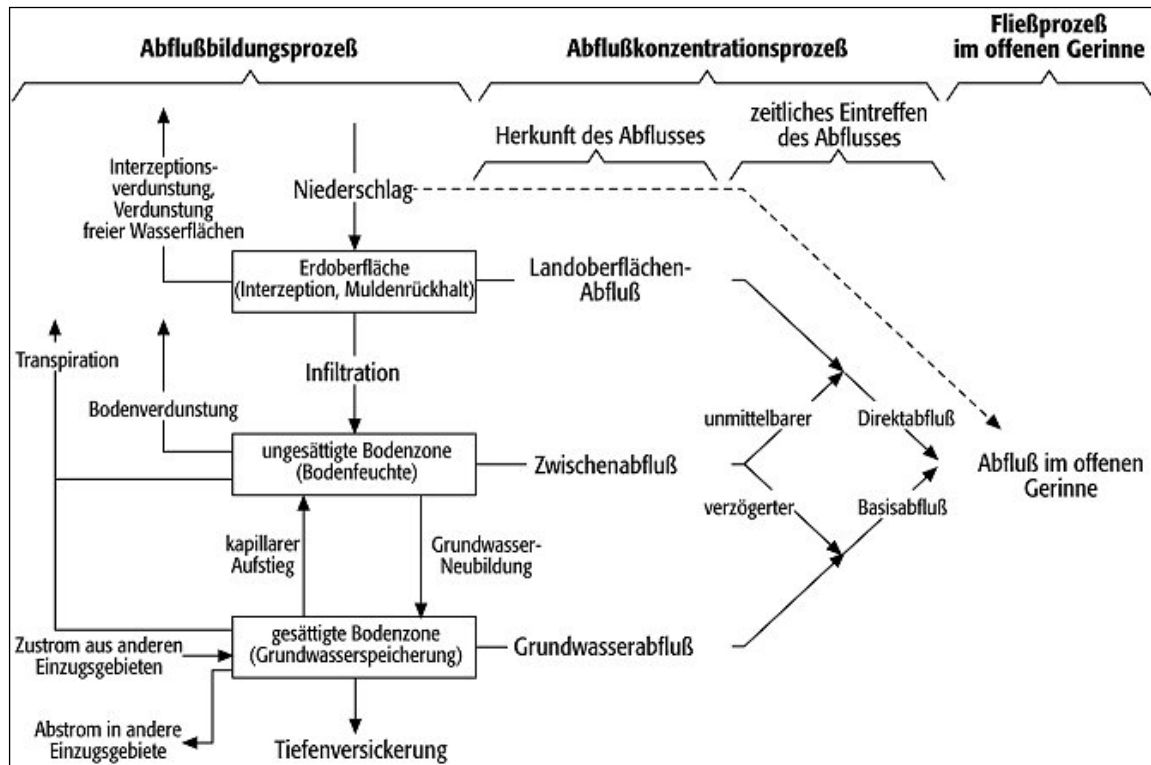
Abflussentstehung in der Landschaft



Quelle: spektrum.de

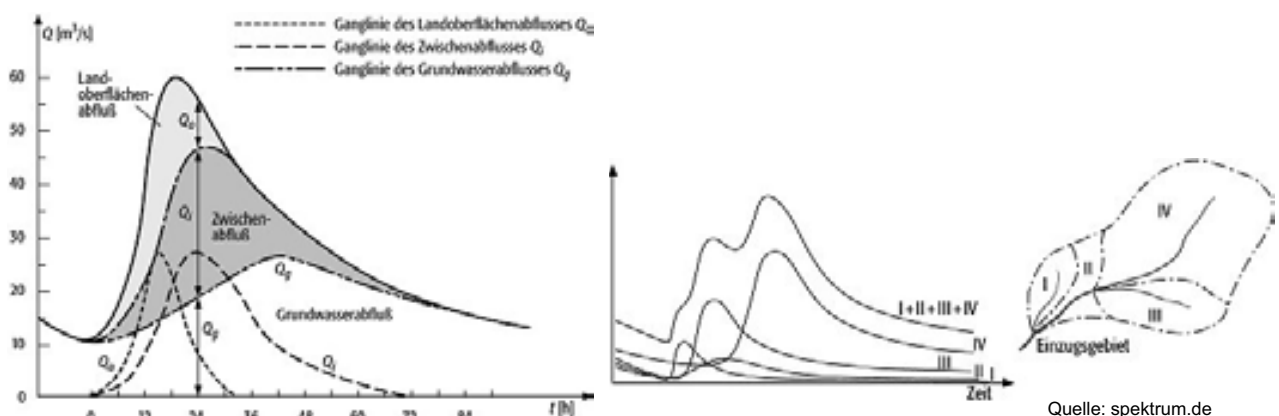
Zusammensetzung einer Abflußganglinie aus ihren Komponenten Landoberflächenabfluß, Zwischenabfluß und Grundwasserabfluß.

Abflussentstehung in der Landschaft



Quelle: spektrum.de

Abflussganglinie



Quelle: spektrum.de

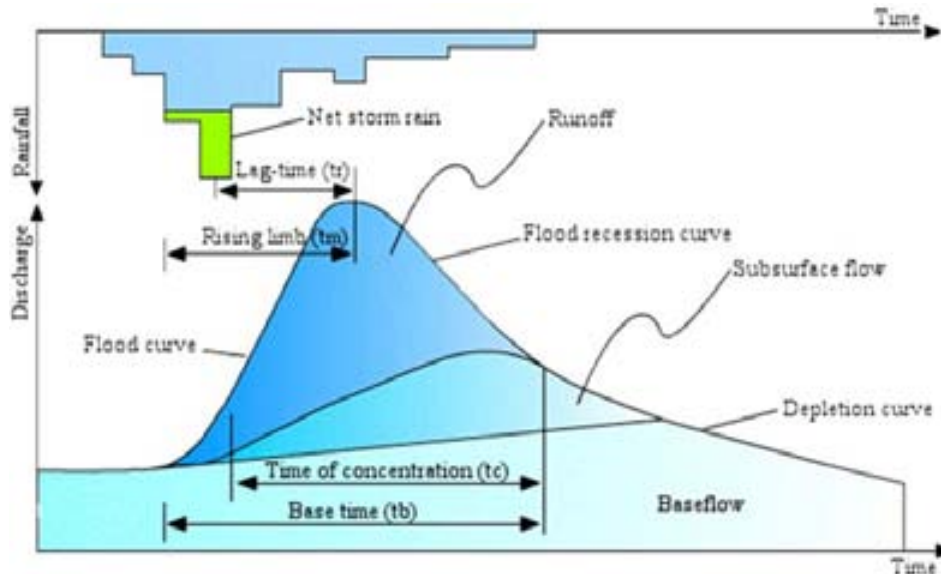
Quelle: spektrum.de

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.



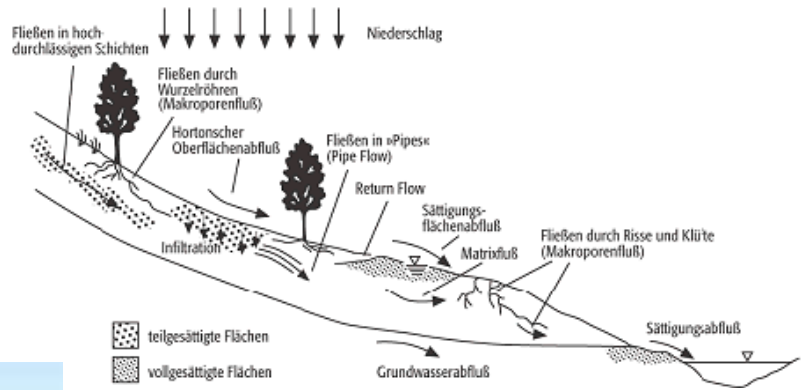
Quelle: sachsen.de

Vermindertes Infiltrationsvermögen des Bodens auf dem Vorgewende infolge einer Schadverdichtung

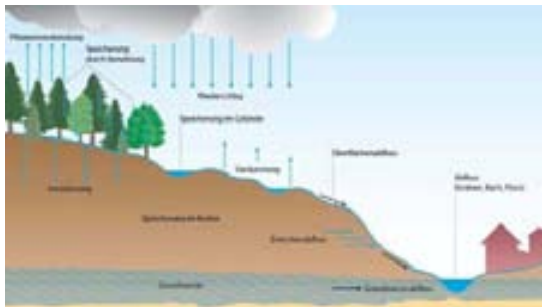
Oberflächenabfluss, oberirdischer Abfluss, (surface runoff) [m^3/s]: Teil des Abflusses, der dem Vorfluter als Reaktion auf ein auslösendes Ereignis (Niederschlag oder Schneeschmelze) über die Bodenoberfläche unmittelbar zufließt.

Zwischenabfluss

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



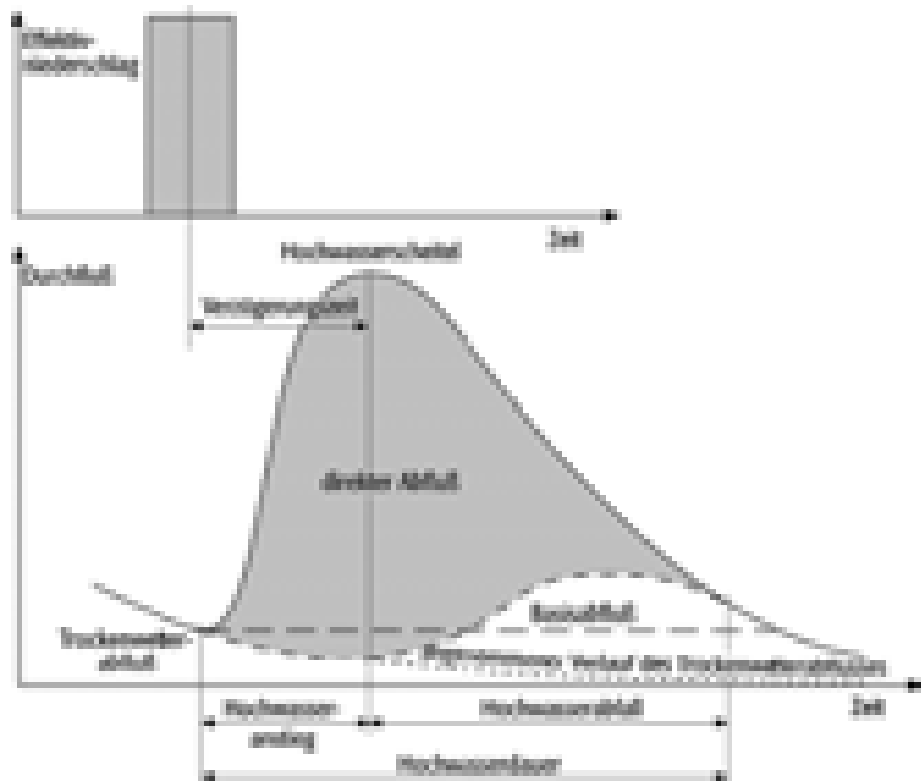
http://www.geodiz.com/deu/d/images/2603_zwischenabfluss.png



Grafik: Claus J. Lienau, München

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

Basisabfluss



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

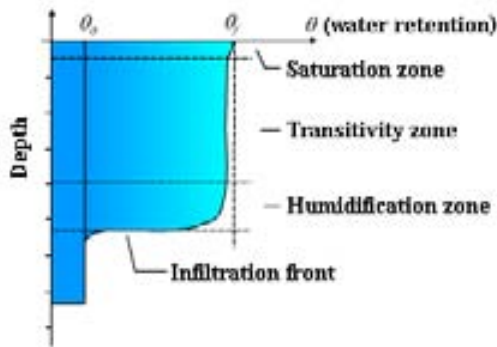
Infiltration I

Infiltration:

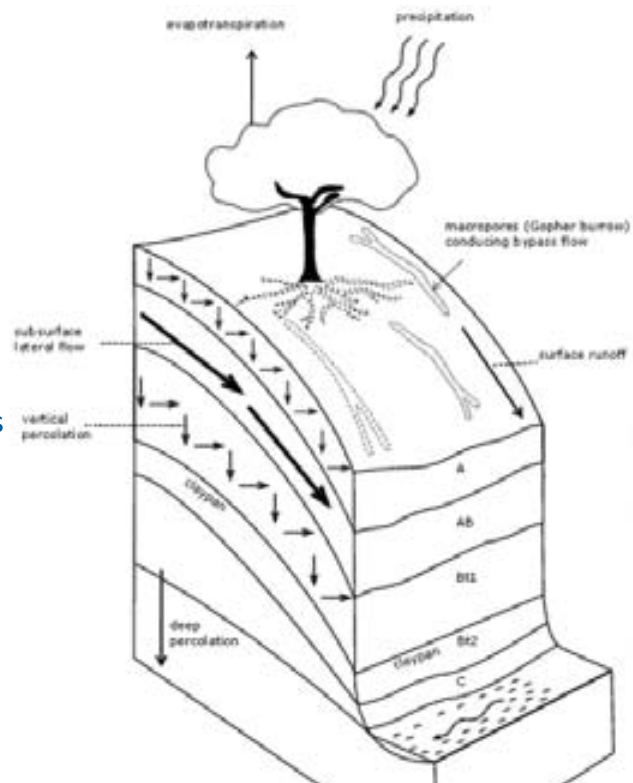
- ist der Wasserfluss durch die Bodenoberfläche in einem porösen Medium unter Schwerkraftwirkung und Druckeffekten

Perkolaton:

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



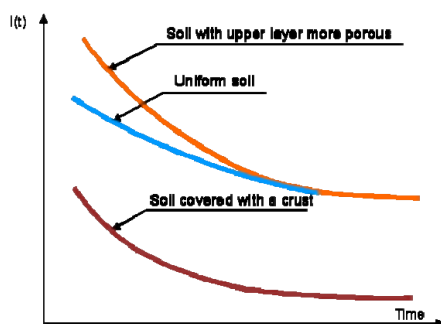
Characteristics of the hydric profile during infiltration (Musy,2001).



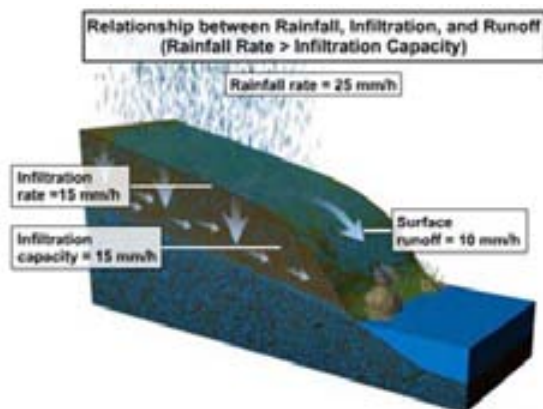
Conceptual diagram of a soil profile illustrating the multiple flow paths through which water moves through soil (Modified from O'Geen et al. 2010)

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).

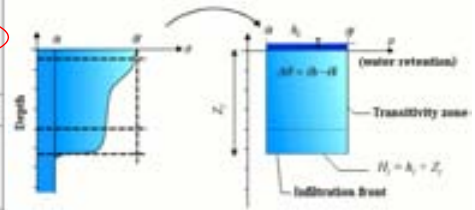


Infiltration – Modellansätze zur Berechnung

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	$i(t) = i_p + (i_0 - i_p)e^{-kt}$	$i(t)$ - infiltration capacity during time [cm/s] i_0 - initial infiltration capacity [cm/s] i_p - final infiltration capacity [cm/s] k - constant depending on the soil type
Kostiakov	$i(t) = i_0 t^{-n}$	i - parameter depending on soil conditions
Derzh-Mazencov	$i(t) = i_0 + (i_1 - i_0)e^{-kt}$	i_0 - infiltration capacity at time $t=0$ min [cm/s] t - time [s] k - constant
Holtan	$i(t) = i_p + c w \left[\frac{1}{2} (1 - e^{-2kt}) - e^{-kt} \right]$	c - factor variable from 0.25 to 0.8 w - Holtan equation flow factor k - experimental constant approximately = 1.4
Philip	$i(t) = \frac{1}{2} a t^{-1/2} + A$	a - sorptivity [cm s ^{-1/2}] A - gravity component depending on hydraulic conductivity at saturation [cm/s]
Dooge	$i(t) = a (F_{\infty} - F_t)$	a - constant F_{∞} - 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 [cm/s] h_0 - surface pressure load [mm] h_f - pressure load at the humidity front [mm] z_f - humidity front depth [mm]



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

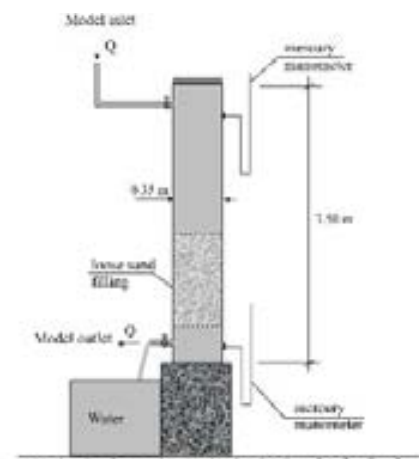
Hypothese:

- 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

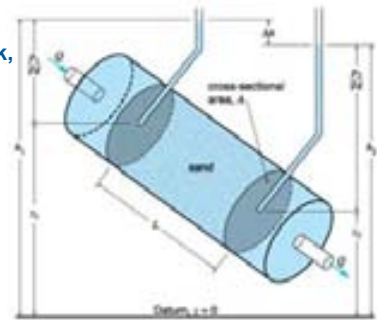
Source: echo2.epfl.ch:

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

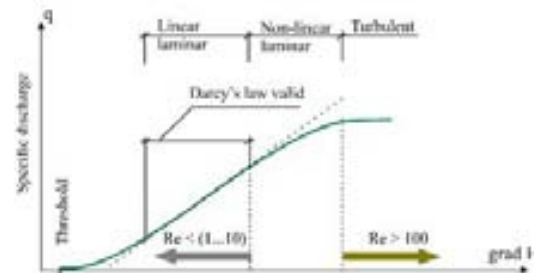
Gesättigter Boden:

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

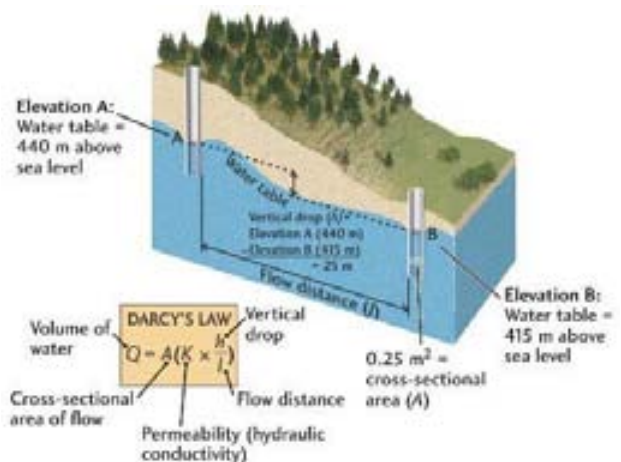
Ungesättigter Boden:

- 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 dem Matrixspannung gültig ist → **Richards Gleichung**
- die Geschwindigkeit der Wasserströmung durch einen ungesättigten Boden ist linear proportional zum hydraulischen Gradienten

Bodenwasserfluss: Darcy-Gesetz



Range of Darcy's Law depending on Reynolds number (Re)
Source: echo2.epfl.ch



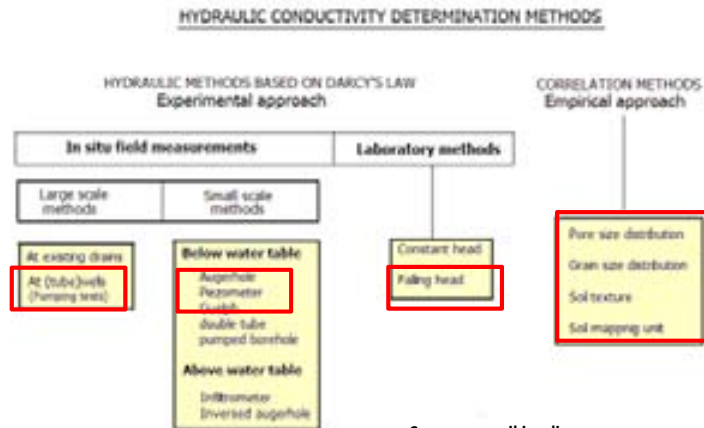
Permeabilität – Hydraulische Leitfähigkeit

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

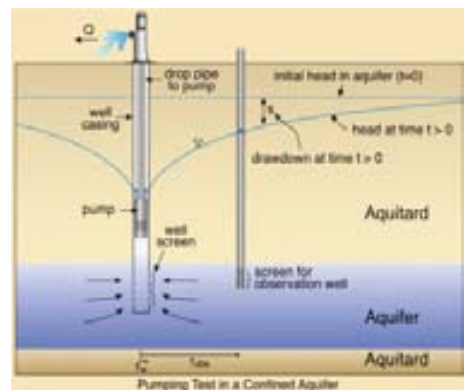


Source: en.wikipedia.org

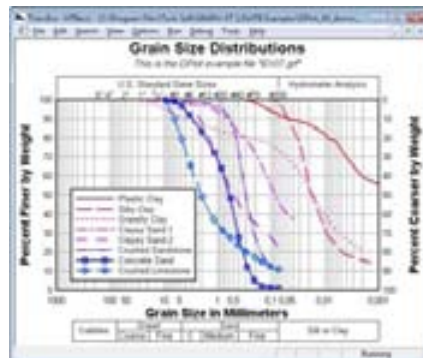
Permeabilität – Hydraulische Leitfähigkeit



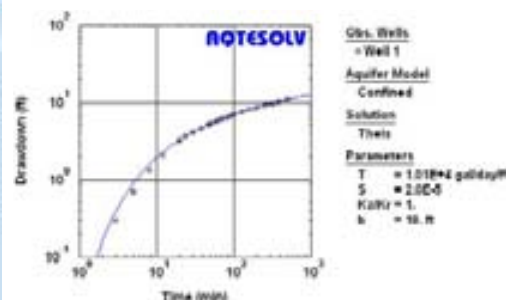
Quelle: demopark.de



Quelle: midwestgeo.com

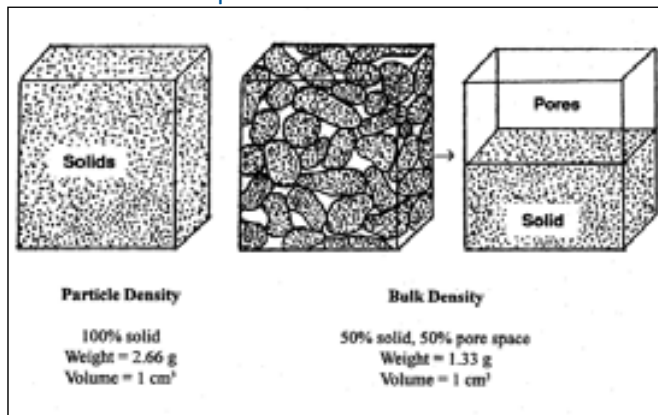


Quelle: techsoft.de

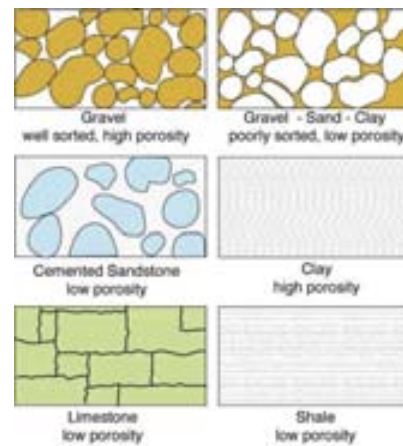


Wasser in der ungesättigten Zone – Bodenwasserspeicher I

- 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.

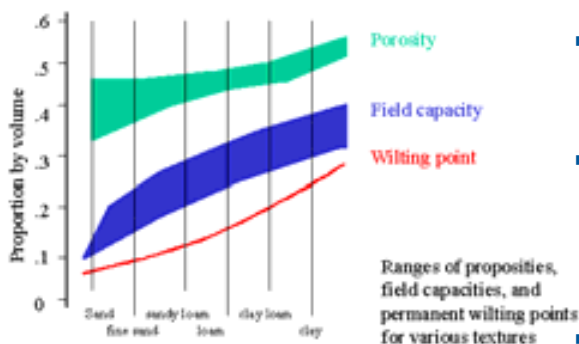


Source: passel.unl.edu



Source: Adini, 2011

Wasser in der ungesättigten Zone – Bodenwasserspeicher II



Source: Dingman, 1994

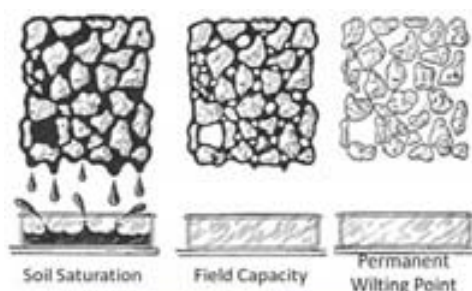
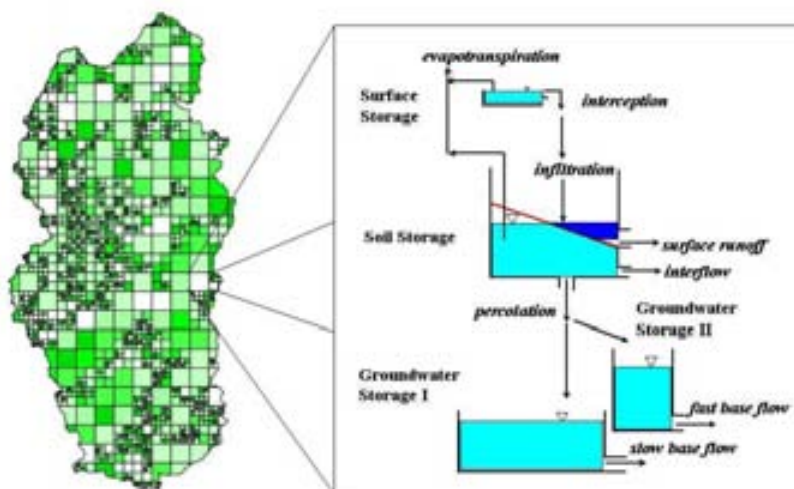


Figure 10.10 Soil Water and Soil Moisture. Adapted from Figure 10.10

- 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?

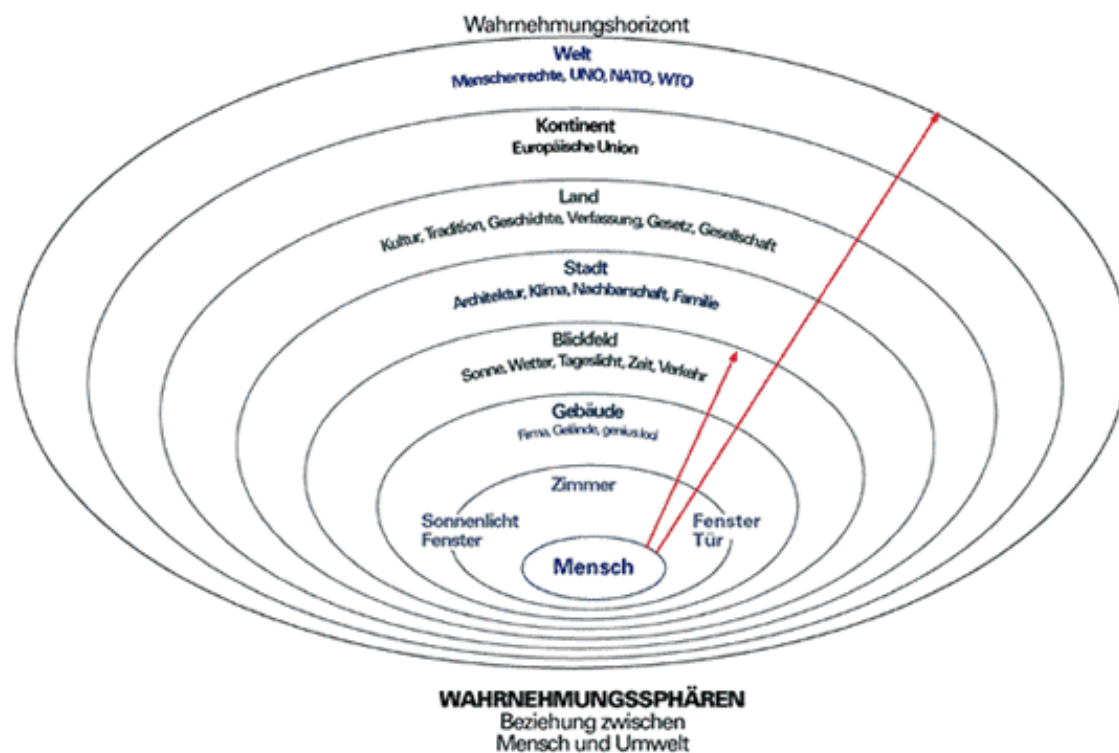
Konzeptionelles Modell → welche Gleichungen werden verwendet?

Modellprozedur → Kodierung in Programmiersprache

Modelleichung → optimale Parametrisierung

Modelltest → Überprüfung des Modells

Wahrnehmungsmodell



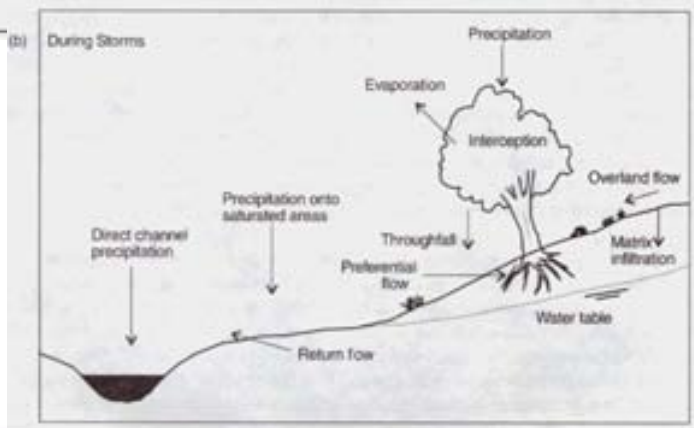
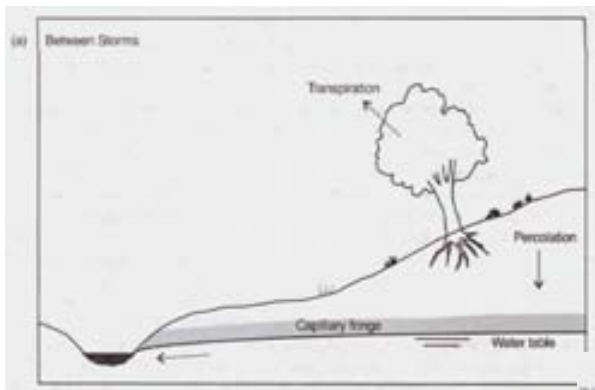
Wahrnehmungsmodell

- 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:

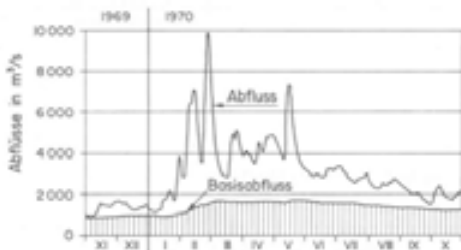
- fasst die Beobachtungen in einem Einzugsgebiet zusammen
- subjektiv, an den Beobachter gebunden

Zeitabhängiges Wahrnehmungsmodell

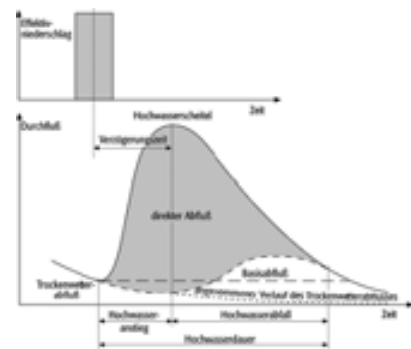


Beven, 2001

Wahrnehmungsmodell

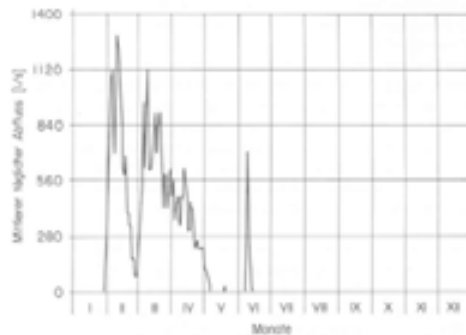


Beispiel einer Jahresganglinie eines perennierenden Flusses (Dracos, 1980, S. 109)

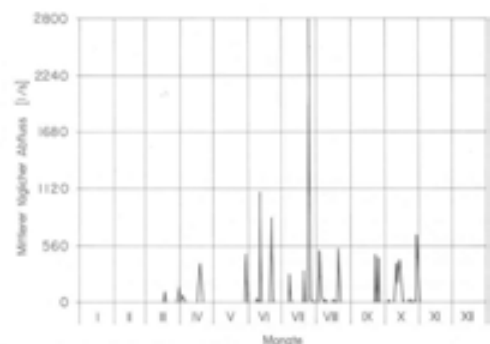


http://www.geod2.com/deu/d/images/1301_hochwasserganglinie.png

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

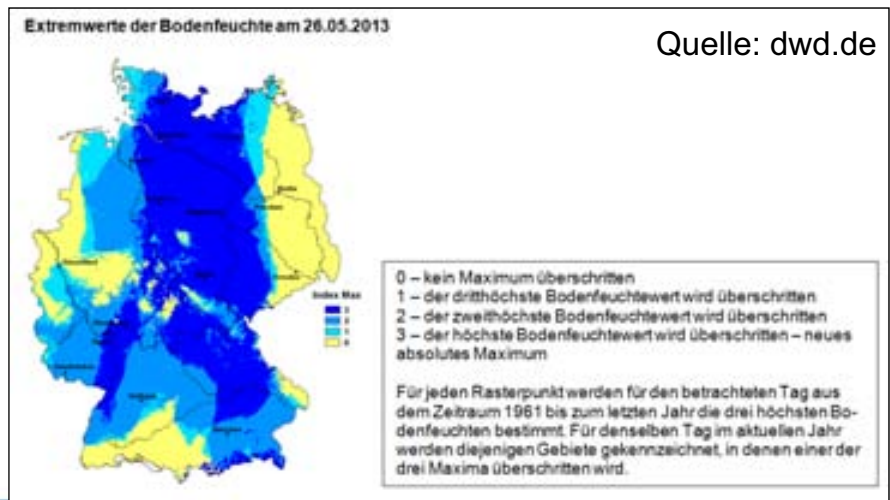


Beispiel einer Jahresganglinie eines ephemeren Flusses (Dracos, 1980, S. 108)



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

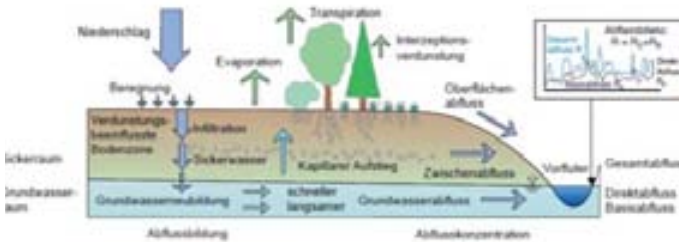


Konzeptionelle Modelle

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

de.wikipedia.org

Modellprozedur

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



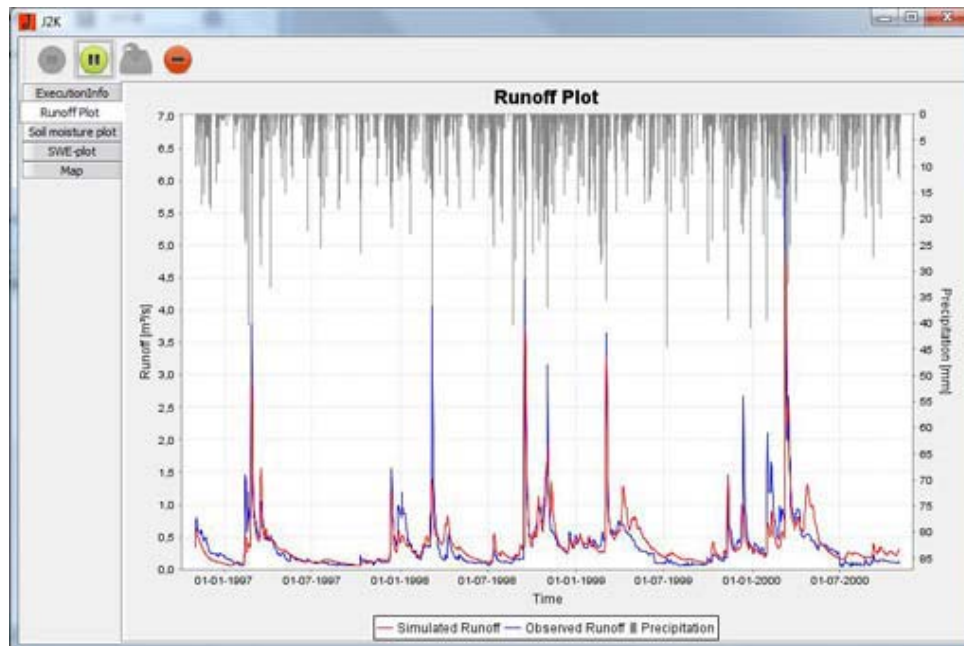
Quelle: ufz.de

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

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

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_v11.pdf
- http://www.ufz.de/export/data/1/19323_Blockseminar_volk_2010.pdf