
Hydrologie und Flussgebietsmanagement

o.Univ.Prof. DI Dr. H.P. Nachtnebel

Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiver Wasserbau

The bottom right corner of the slide features a decorative graphic of several concentric, light blue circles of varying sizes, resembling ripples on water. These circles are arranged in a pattern that suggests movement and depth, with some overlapping others. The background of the slide is a solid, vibrant blue, which makes the white text and the light blue ripples stand out clearly.

Gliederung der Vorlesung

- Statistische Grundlagen
- Extremwertstatistik
- Korrelation und Regression
- Zeitreihenanalyse und Anwendung
- Regionalisierung & räumliche Interpolation
- Bodenwasserhaushalt
- Grundwasserhaushalt
- **N-A Modelle – Einheitsganglinie**
- N-A Modelle – kombinierte Translations- und Speichermodelle
- Kontinuierliche N-A Modelle
- Retention und Flood Routing
- Hydrologische Vorhersagen
- Flussgebietsmodelle
- Stofftransport
- Sedimenttransport – Modellierung
- Flussgebietsmodelle

Inhalt und Ziel

- Verknüpfung von Niederschlag und Abfluss um Grundlagen für die Bemessung zu erarbeiten
- Von einfachen Ereignis basierten Modellen zu kontinuierlichen Modellen
- Von Input-Output Modellen zu physikalischen Modellen
- Von „lumped models“ zu verteilten Modellen
- Von konzeptiven zu physikalisch basierten Modellen

Hintergrund: N-A Modelle

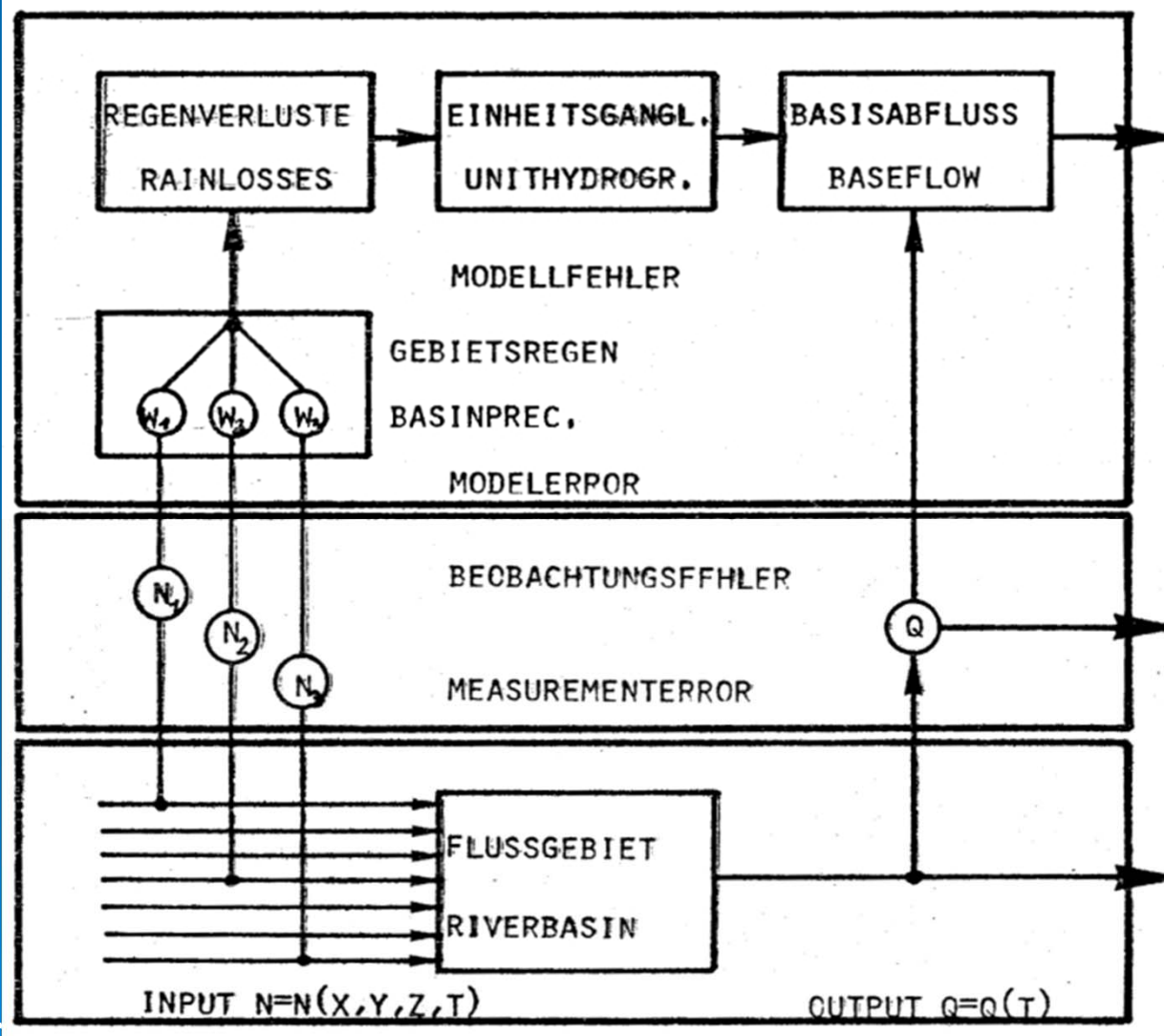
➤ Was sind N-A Modelle?

- Stellen eine Beziehung zwischen Niederschlag und Abfluss her

➤ Warum stellt man solche Modelle auf?

- Aufzeichnungen über den Niederschlag gibt es meist länger als für Abflüsse
- ➔ wenn der Zusammenhang darstellbar ist, kann man aus der längeren Niederschlagszeitreihe auf den Abfluss schließen
- Abflussberechnung möglich für Profile, an dem kein Pegel vorhanden ist und damit keine Beobachtung

Natur-Messung-Modell

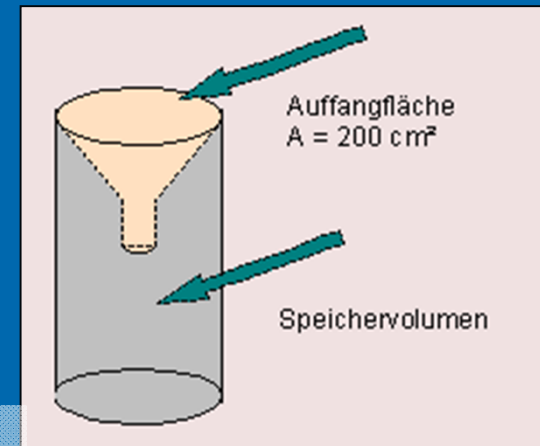


Was und wieviel beobachten wir ?

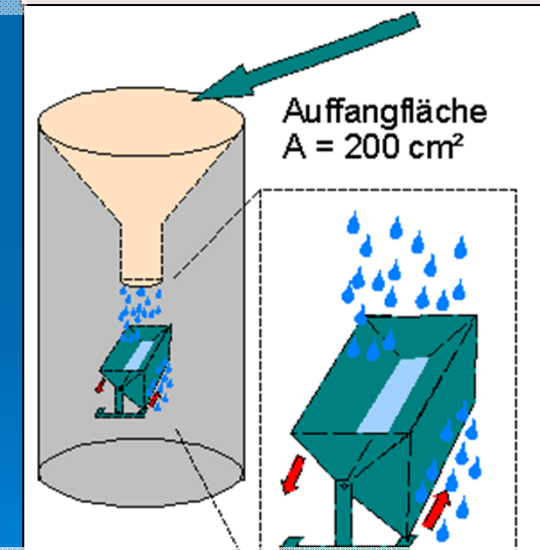
- Totalisator
- Intensitätsmesser



<http://www.meteorologyshop.eu>



<http://www.toss.de/index.php?sel=5&sub=53&art=97>



<http://www.geographie.uni-muenchen.de>

Fehler bei Niederschlagsmessung

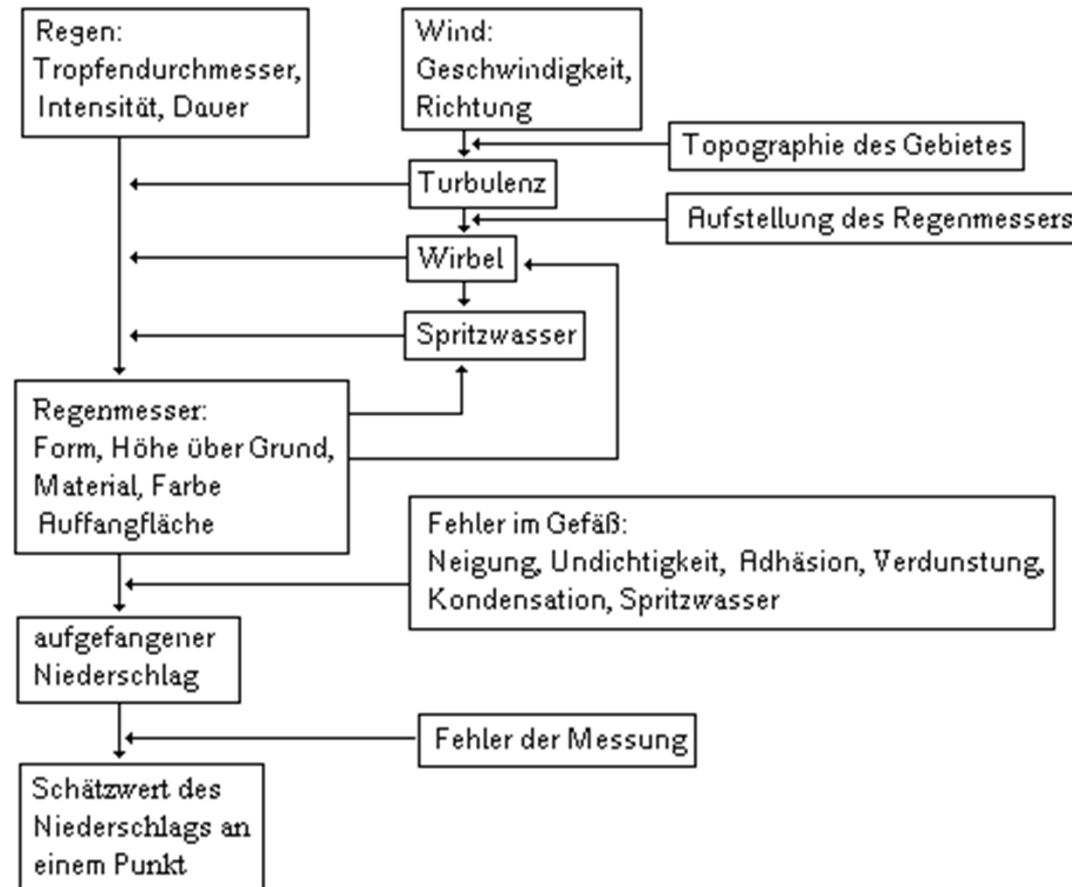


Abb. 4.3: Schematische Darstellung der Fehlerquellen bei der Erfassung des meteorologischen und hydrologischen Niederschlags (nach J.C.Rodda 1968, aus F. Wilhelm, Münchner Geogr. Abh. Bd. 15, 1975)

Einheitsganglinienverfahren (UH)

➤ Historie

- Sherman 1935
- Konzeptmodelle zur Transformation des abflusswirksamen Niederschlages in Hochwasserabflussganglinie

➤ Funktionsweise

- Berechnung von Abflüssen aus Regenereignissen
- Gebietscharakteristische Funktion

➤ Ansatz

- Analyse von Ereignissen, bei denen Niederschlag und Abfluss bekannt sind
- Wenn UH bekannt ist, kann der Abfluss für beliebige Regenereignisse ermittelt werden
- Bei uns: auch für 1 Gebiet 2 UHs: Sommer und Winter

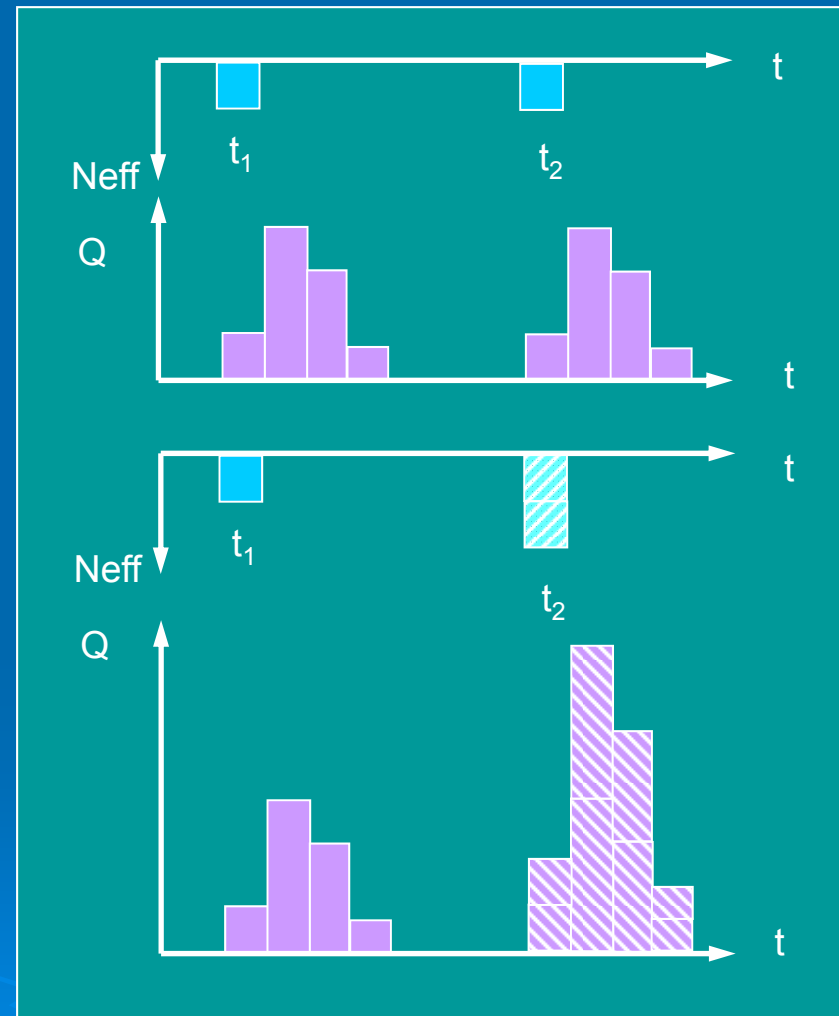
Prinzipien des UH-Verfahrens 1

➤ Zeitinvarianz

- Effektivniederschlag löst immer gleichen Abfluss aus

➤ Linearität

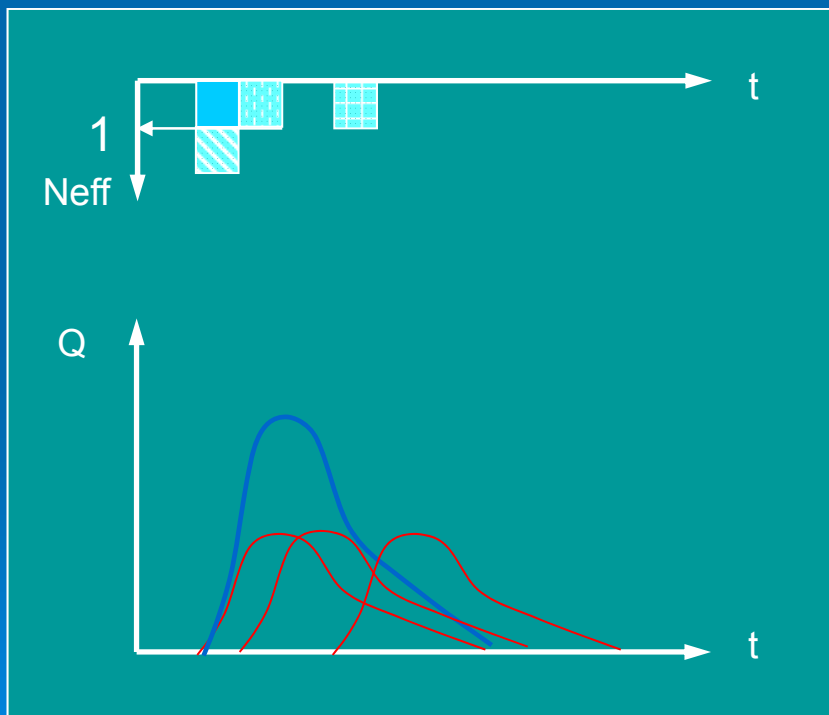
- Größerer Niederschlag – proportional größerer Abfluss



Prinzipien des UH-Verfahrens 2

➤ Superposition

- Abflussteilwellen werden zu einer Gesamtwelle überlagert



Gleichungssystem

$$Q_1 = Ne_1 \cdot x_1$$

$$Q_2 = Ne_1 \cdot x_2 + Ne_2 \cdot x_1$$

$$Q_3 = Ne_1 \cdot x_3 + Ne_2 \cdot x_2 + Ne_3 \cdot x_1$$

$$Q_i = Ne_1 \cdot x_i + Ne_2 \cdot x_{i-1} + Ne_3 \cdot x_{i-2} = \sum_{j=1}^n Ne_j \cdot x_{i+1-j}$$

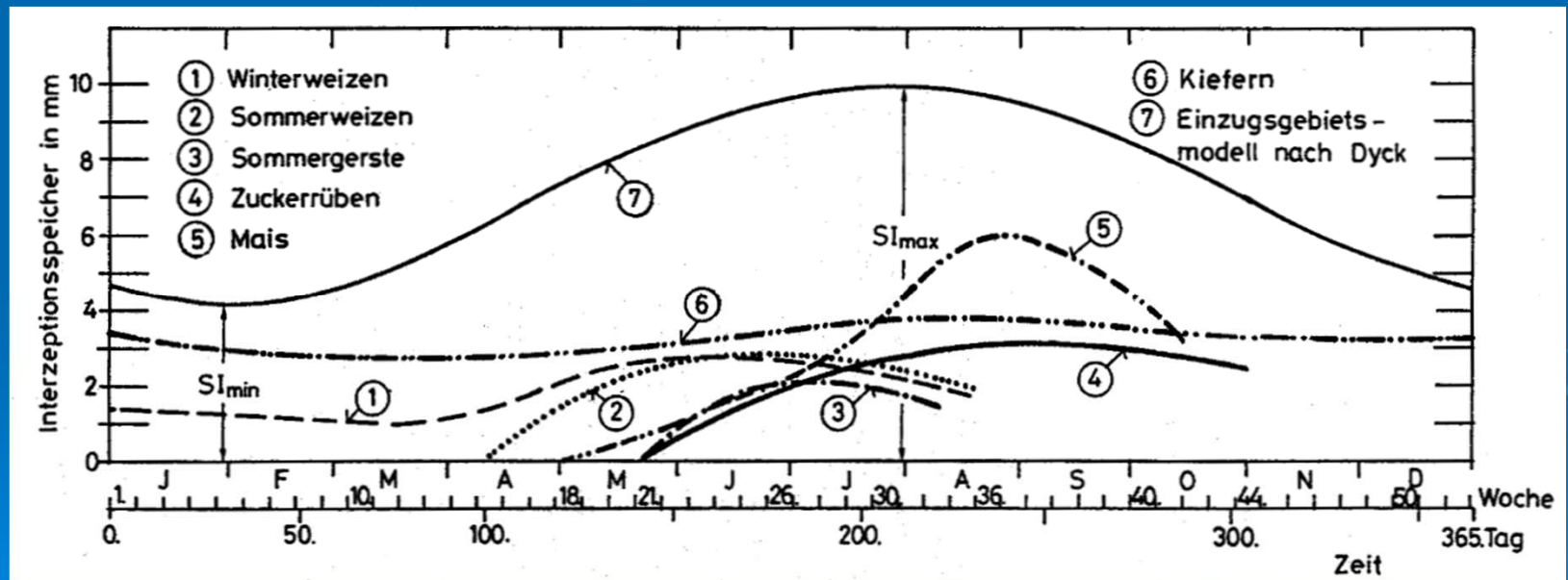
Effektivniederschlag

➤ Definition

- Niederschlag, der direkt zum Abfluss kommt, also nicht im Einzugsgebiet zurückgehalten wird oder verdunstet

➤ Verlustanteile

- Interzeption



Effektivniederschlag

➤ Definition

- Niederschlag, der direkt zum Abfluss kommt, also nicht im Einzugsgebiet zurückgehalten wird oder verdunstet

➤ Verlustanteile

- Interzeption
- Muldenrückhalt



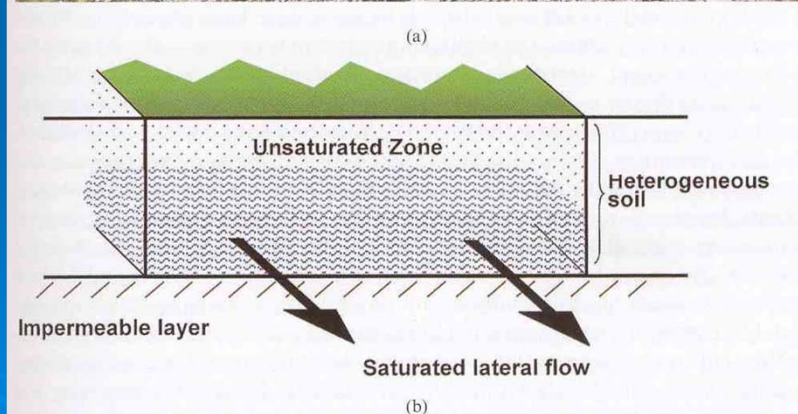
Effektivniederschlag

➤ Definition

- Niederschlag, der direkt zum A...
Einzugsgebiet zurückgehalten

➤ Verlustanteile

- Interzeption
- Muldenrückhalt
- Bodenfeuchte
- Interflow
jener Anteil des Niederschlages,
abfließt



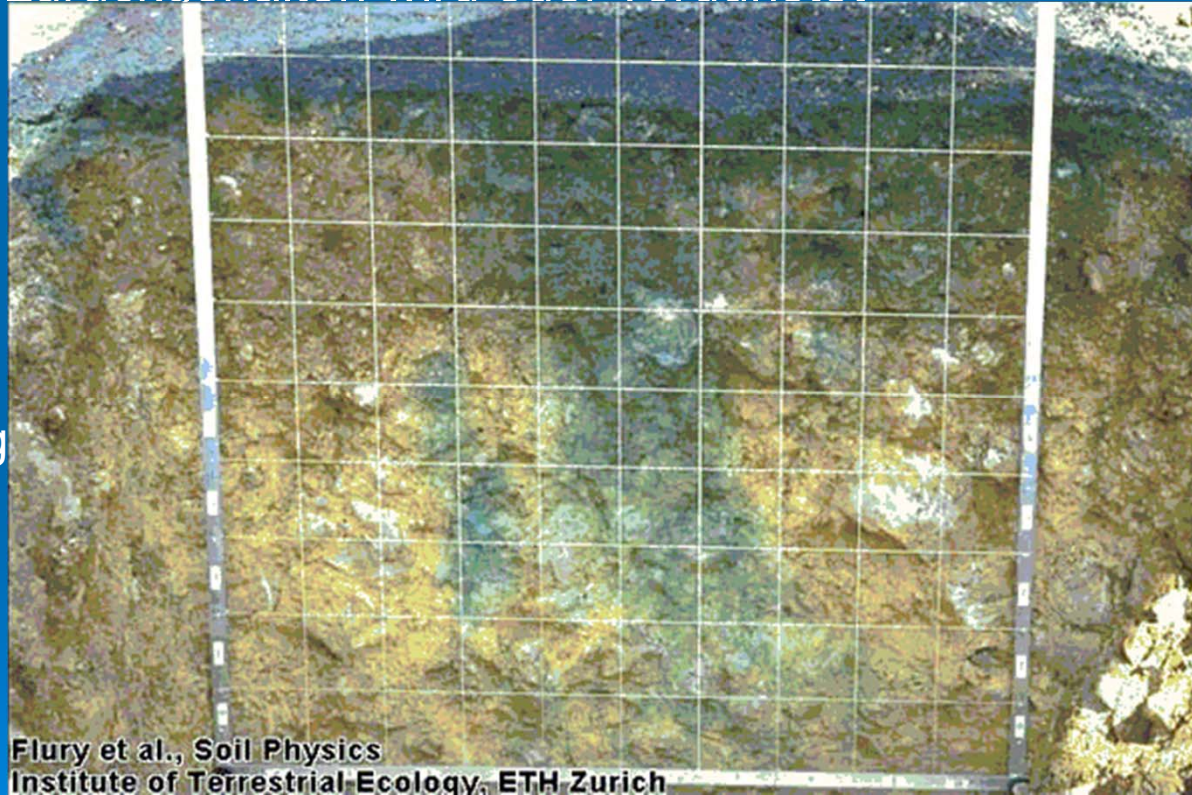
Effektivniederschlag

➤ Definition

- Niederschlag, der direkt zum Abfluss kommt, also nicht im Einzugsgebiet zurückgehalten wird oder verdunstet

➤ Verlustanteile

- Interzeption
- Muldenrückhalt
- Bodenfeuchte
- Interflow
- GW-Neubildung



Ermittlung Effektivniederschlag 1

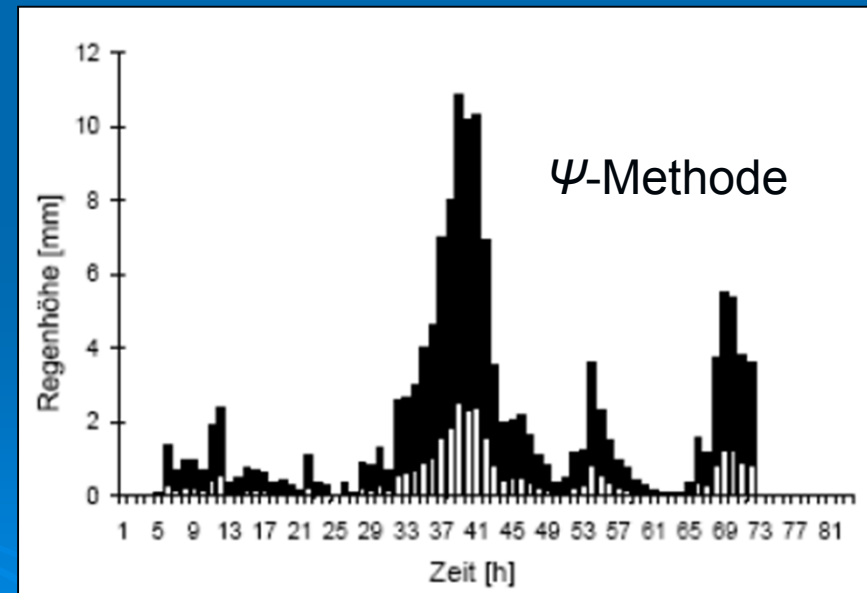
➤ Methoden zur Bestimmung des Effektivniederschlages

- ϕ -Index-Verfahren
 - Gebietsniederschlag = Konstanter Wert
 - Annahme: Infiltrationsrate zu jedem Zeitpunkt konstant

- ψ -Methode
 - ψ ist Abflussbeiwert
 - Effektivniederschlag ist prozentualer Anteil des Gesamtniederschlags

$$0 \leq \psi \leq 1$$

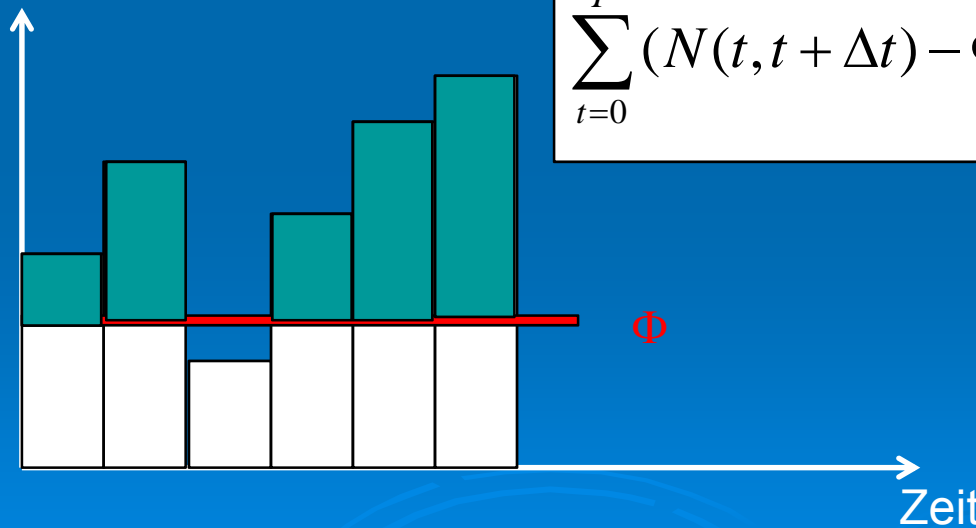
$$Q_D = \psi * N = N_{eff}$$



Ermittlung Effektivniederschlag 1

➤ Methoden zur Bestimmung des Effektivniederschlages

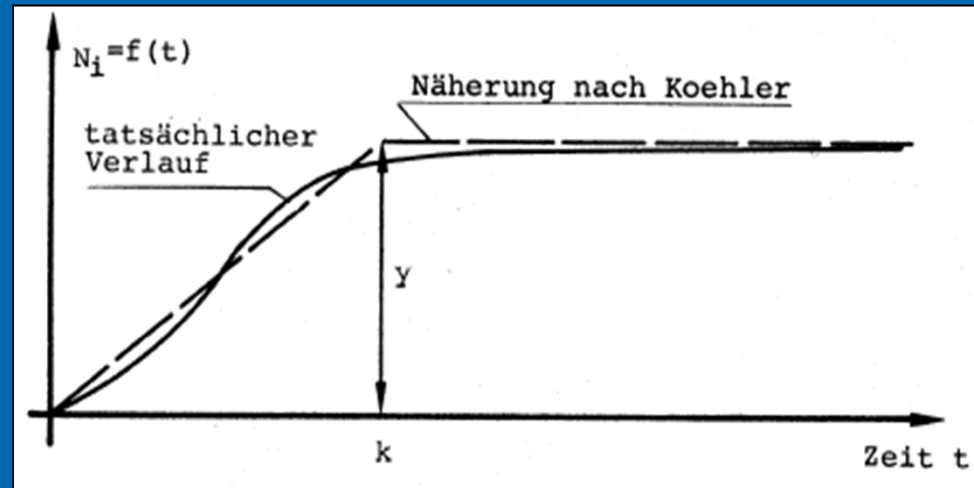
- Φ -Index-Verfahren
 - Gebietsniederschlag = Konstanter Wert
 - Annahme: Infiltrationsrate zu jedem Zeitpunkt konstant



$$\sum_{t=0}^T (N(t, t + \Delta t) - \Phi) \cdot F = \int_{t=0}^{t=T} (Q(t) - QB) dt$$

Ermittlung Effektivniederschlag 2

- Verfahren nach Köhler
 - Regendauer hat auf Abflussbeiwert Einfluss
 - Anstieg zuerst linear, dann konstant

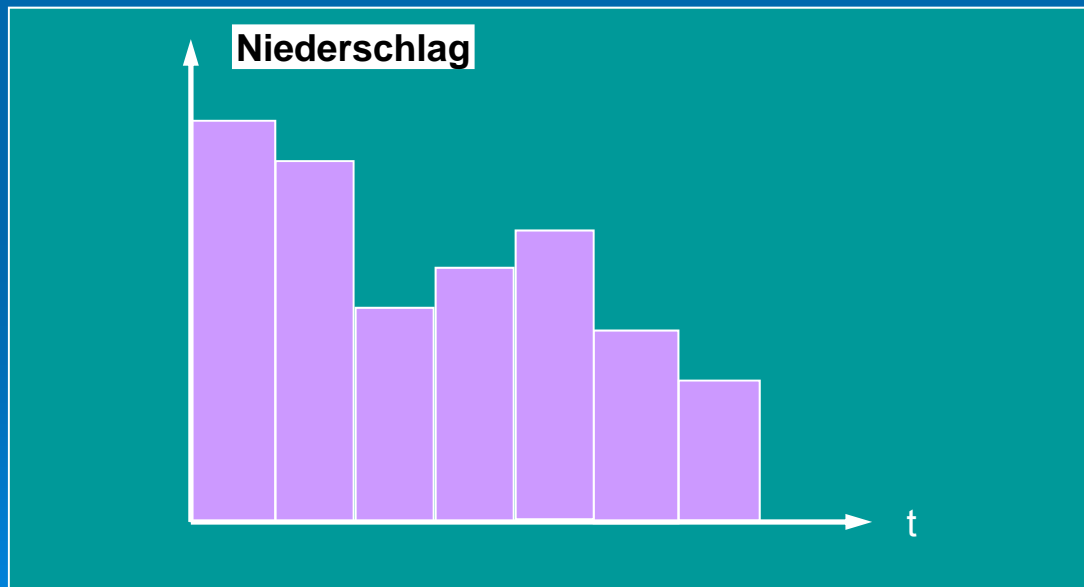


$$\sum_{i=1}^k \left[\left(\frac{i}{k} * y \right) * N_i^Z * N_i \right] + \sum_{i=k+1}^m \left[y * N_i^Z * N_i \right] = A = \sum N_{EFFi}$$

- $[(i/k)*y]$ für $i \leq k$ bzw. y für $i > k$ beschreibt den Einfluss der Regendauer
- Wenn $k = 1 \rightarrow$ kein Einfluss der Zeit

Ermittlung Effektivniederschlag 3

- Verfahren nach Horton
 - Versickerungsrate nimmt mit zunehmender Niederschlagsdauer ab
 - Abnahme folgt einer Exponentialverteilung
 - Wenn $k = 0 \rightarrow \phi$ -Index-Verfahren

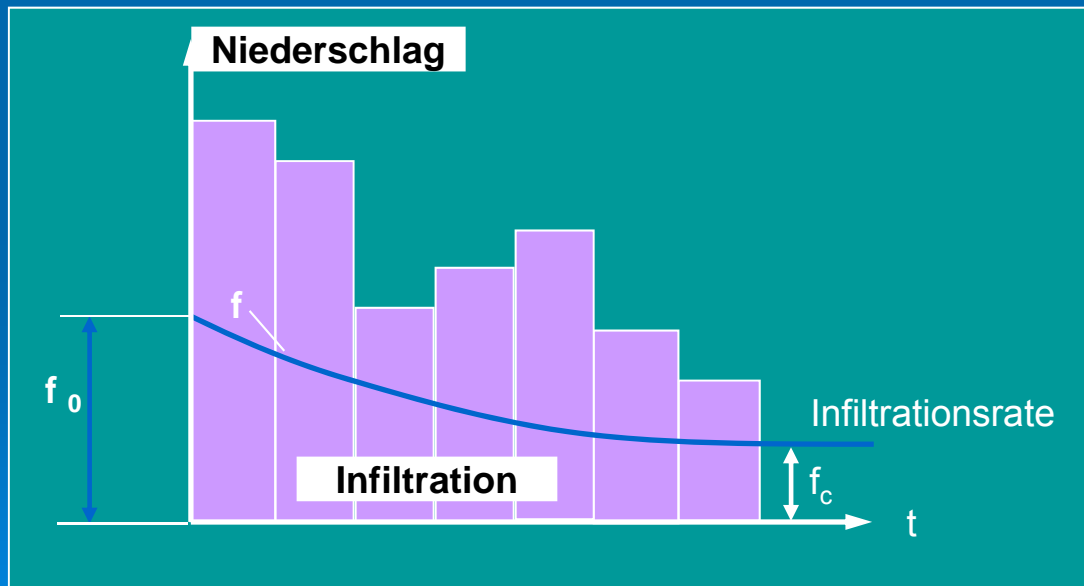


Ermittlung Effektivniederschlag 3

- Verfahren nach Horton
 - Versickerungsrate nimmt mit zunehmender Niederschlagsdauer ab
 - Abnahme folgt einer Exponentialverteilung
 - Wenn $k = 0 \rightarrow \phi$ -Index-Verfahren

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) * e^{-k*t}$$

- f ... Infiltrationsrate zur Zeit t
- f_0 ... Anfangsinfiltrationsrate
- f_c ... Endinfiltrationsrate
- k ... Abnahmefaktor



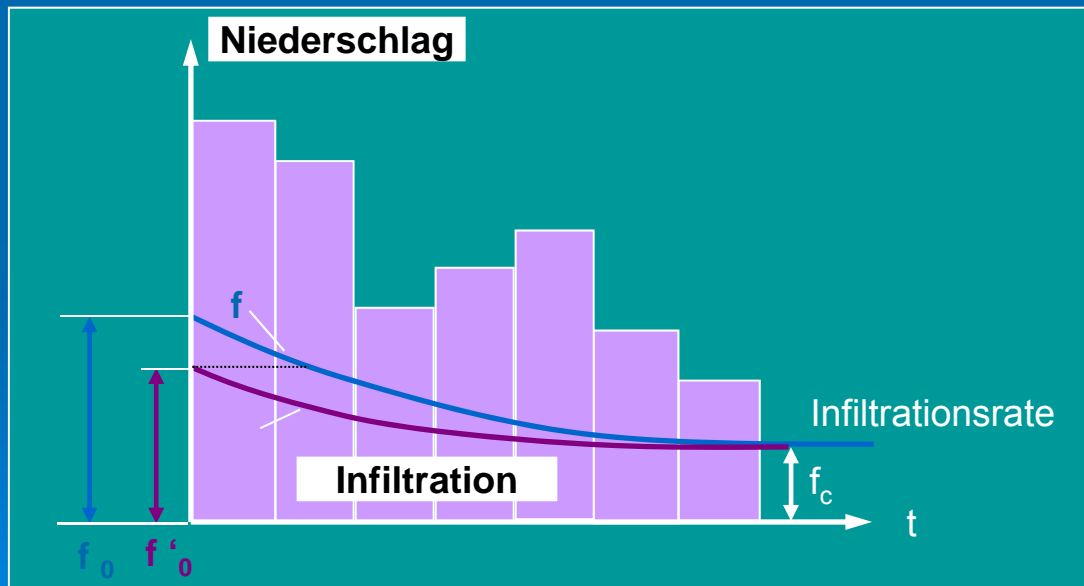
- Kurve f: Niederschlag auf trockenen Boden

Ermittlung Effektivniederschlag 3

- Verfahren nach Horton
 - Versickerungsrate nimmt mit zunehmender Niederschlagsdauer ab
 - Abnahme folgt einer Exponentialverteilung
 - Wenn $k = 0 \rightarrow \phi$ -Index-Verfahren

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) * e^{-k*t}$$

- f ... Infiltrationsrate zur Zeit t
- f_0 ... Anfangsinfiltrationsrate
- f_c ... Endinfiltrationsrate
- k ... Abnahmefaktor



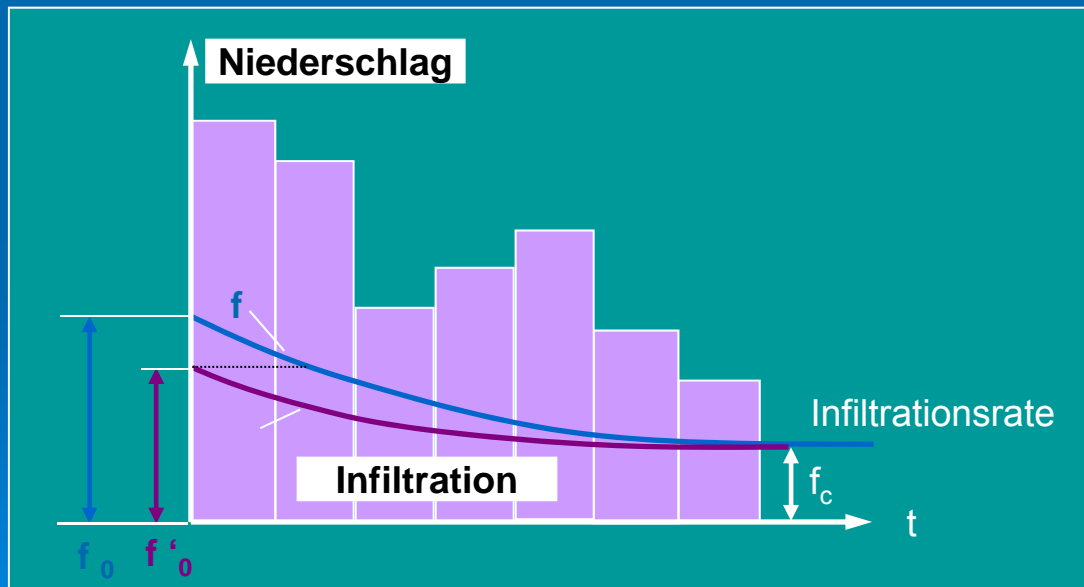
- Kurve f : Niederschlag auf trockenen Boden
- Kurve f' : Niederschlag auf feuchten Boden

Ermittlung Effektivniederschlag 3

- Verfahren nach Horton
 - Versickerungsrate nimmt mit zunehmender Niederschlagsdauer ab
 - Abnahme folgt einer Exponentialverteilung
 - Wenn $k = 0 \rightarrow \phi$ -Index-Verfahren

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) * e^{-k*t}$$

- f ... Infiltrationsrate zur Zeit t
- f_0 ... Anfangsinfiltrationsrate
- f_c ... Endinfiltrationsrate
- k ... Abnahmefaktor



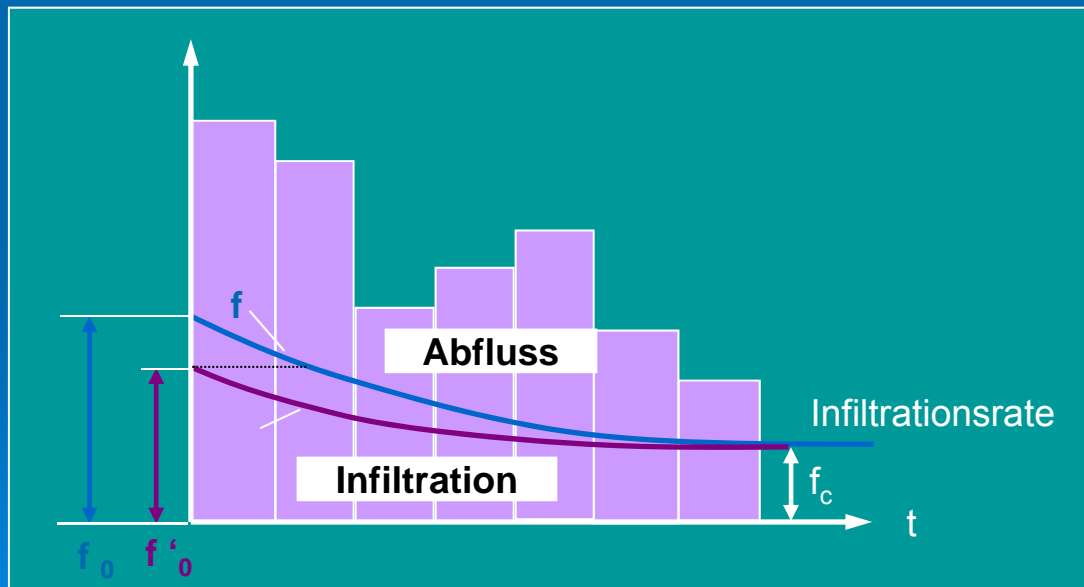
- Kurve f : Niederschlag auf trockenem Boden
- Kurve f' : Niederschlag auf feuchtem Boden
- Parameter f_c und k dieselben
- Parameter f_0 durch Anfangszustand bestimmt

Ermittlung Effektivniederschlag 3

- Verfahren nach Horton
 - Versickerungsrate nimmt mit zunehmender Niederschlagsdauer ab
 - Abnahme folgt einer Exponentialverteilung
 - Wenn $k = 0 \rightarrow \phi$ -Index-Verfahren

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) * e^{-k*t}$$

- f ... Infiltrationsrate zur Zeit t
- f_0 ... Anfangsinfiltrationsrate
- f_c ... Endinfiltrationsrate
- k ... Abnahmefaktor



- Kurve f : Niederschlag auf trockenem Boden
- Kurve f' : Niederschlag auf feuchtem Boden
- Parameter f_c und k dieselben
- Parameter f_0 durch Anfangszustand bestimmt

Ermittlung Effektivniederschlag 4

- SCS-CN-Methode
 - Ermittlung des Rückhalts mittels CN = Gebietskenngröße
 - Boden- und Landnutzungskarten → allgemein verfügbar (Bodenkarte hydr. Atlas oder FAO, Landnutzung Corine)
 - Parameter zur Ermittlung der Curve Number
 - Bodenfeuchte I bis III
 - Bodentyp A bis D
 - Bodennutzung z.B. Weinanbau

$$\frac{F}{S} = \frac{A}{N - I_a}$$

F ... aktueller Rückhalt
S ... Potentiell maximaler Rückhalt
A ... Aktueller Abfluss
N-I_a ... Niederschlag – Anfangsverluste =
Potentiell maximaler Abfluss

$$A = \frac{(N - I_a)^2}{(N - I_a) + S}$$

I_a ... Anfangsverlust ~20 % von S
S ... Pot. max. Rückhalt – über CN

Ermittlung Effektivniederschlag 5

Ermittlung der Bodenfeuchtekategorie

Bodenfeuchtekategorie	Niederschlagshöhe letzten fünf Tage	
	Vegetationsperiode	Übrige Zeit
I	<30	<15
II	30-50	15-30
III	>50	>30

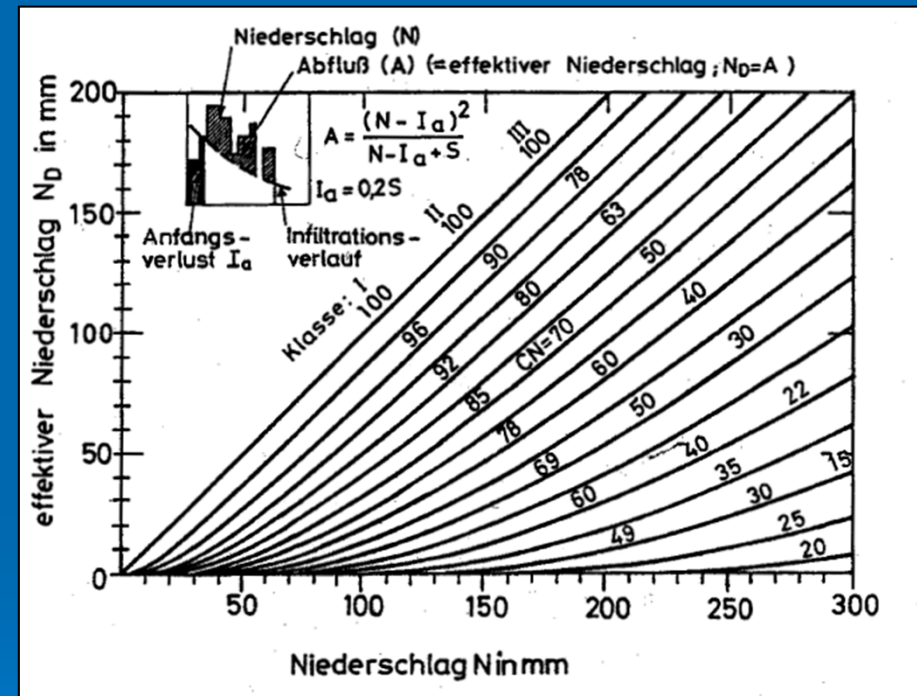
Ermittlung des Bodentyps

- A Böden mit großem Versickerungsvermögen (Tiefe Sand- und Kiesböden)
- B Böden mit mittlerem Versickerungsvermögen (Mitteltiefe Sandböden, lehmiger Sand)
- C Böden mit geringem Versickerungsvermögen (Flache Sandböden, sandiger Lehm)
- D Böden mit sehr geringem Versickerungsvermögen (Tonböden)

Bodennutzung

CN für Bodentyp

	A	B	C	D
Ödland	77	86	91	94
Reihenkulturen (Hackfrüchte)	70	80	87	90
Wein (Terrassen)	64	73	79	82
Getreide (herkömmlich)	64	76	84	88
Weide (fett)	39	61	74	80
Wald (dicht)	25	55	70	77

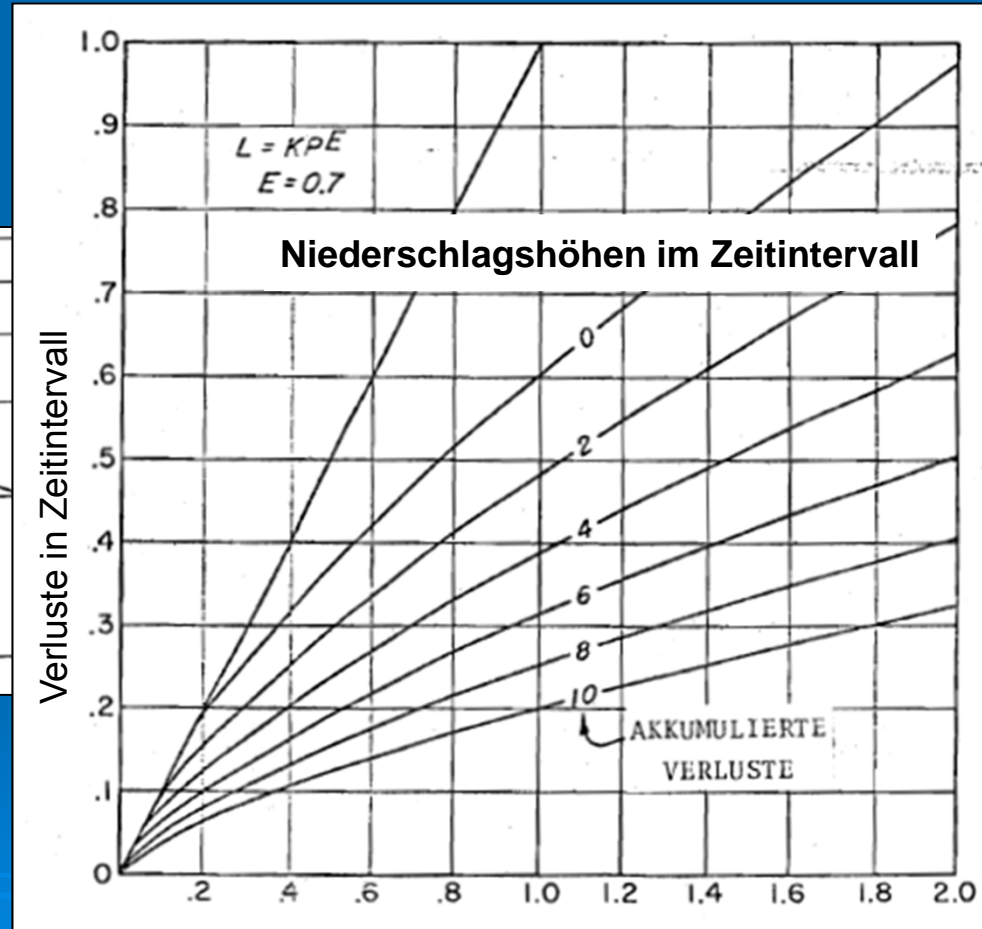
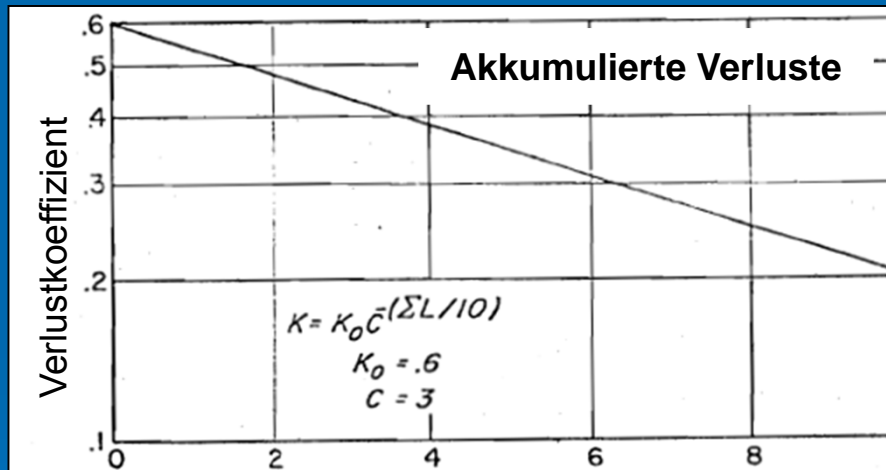


Diskussion

- Φ -Index und Ψ -Methode einfach, da nur ein Parameter verwendet wird
- Horton Formel liefert zustandabhängigen Verlauf der Verluste (aber nur von der Zeit abhängig)
- CN-Methode ist auf Grund der Klassenvorgabe einfach anwendbar
- Methoden, die sowohl die voran gegangenen Verluste als auch den Niederschlagsverlauf berücksichtigen!!

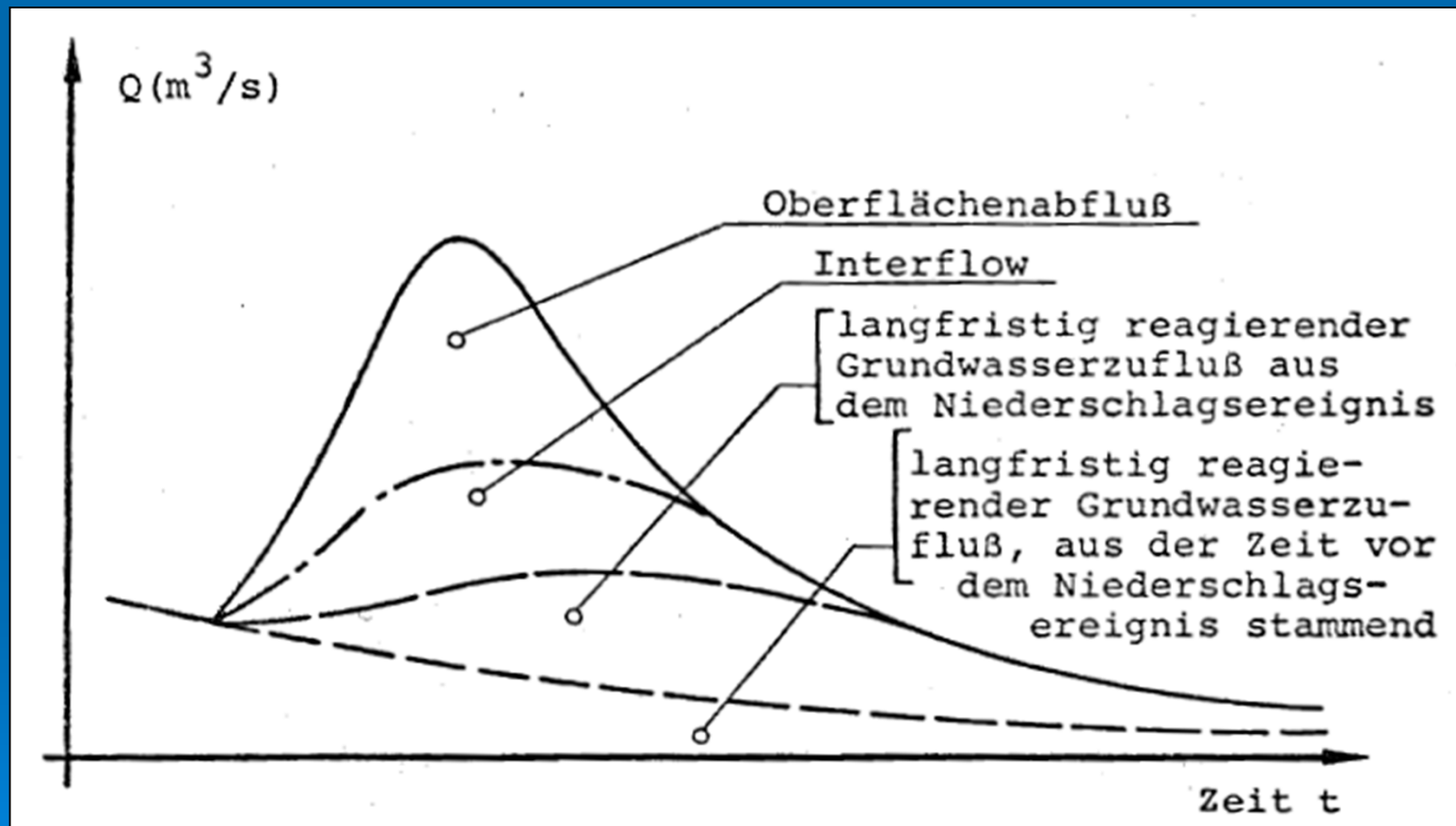
Ermittlung Effektivniederschlag 5

- Methode der akkumulierten Verluste



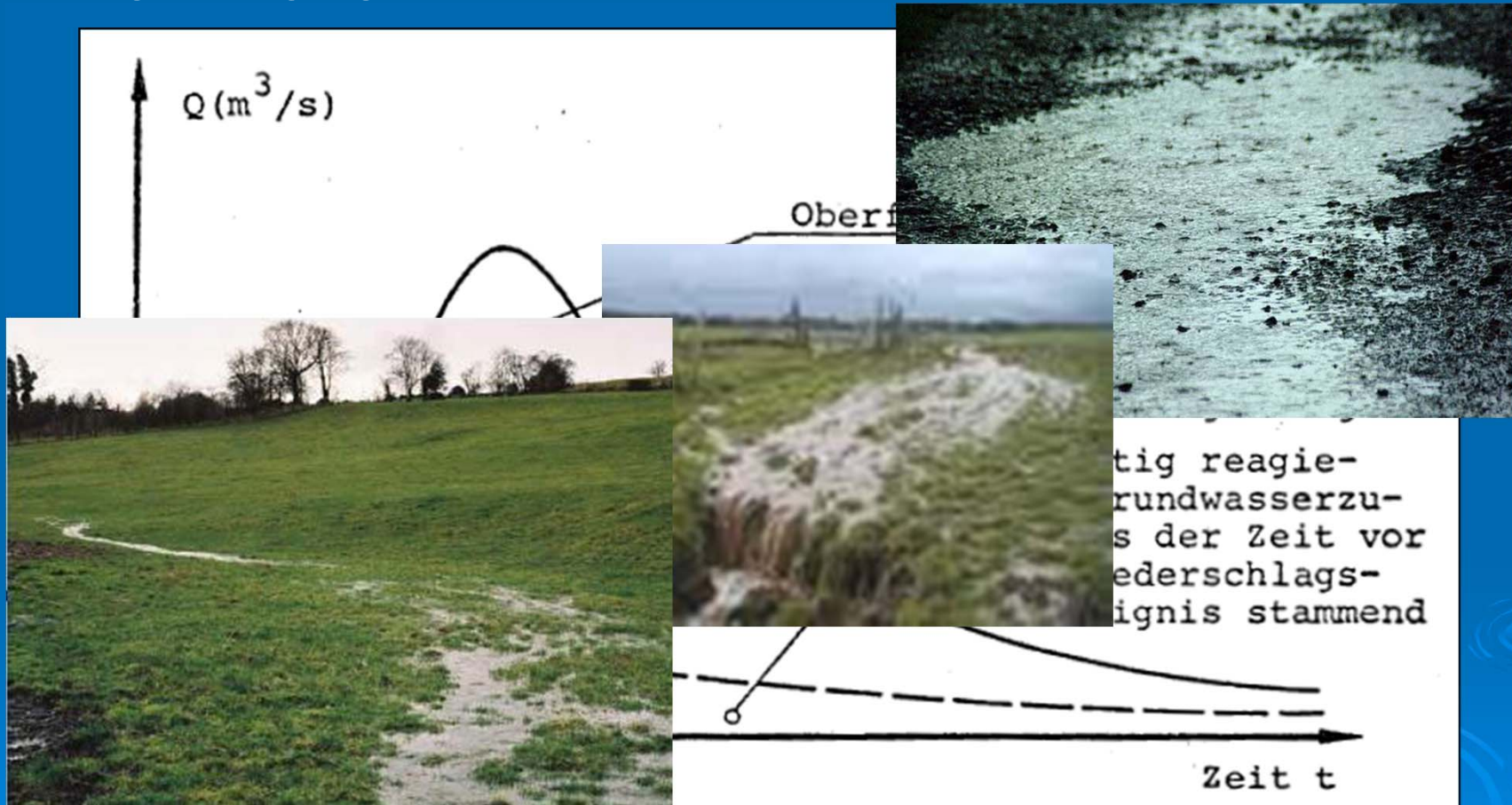
Basisabfluß - Definitionen

➤ Definitionen

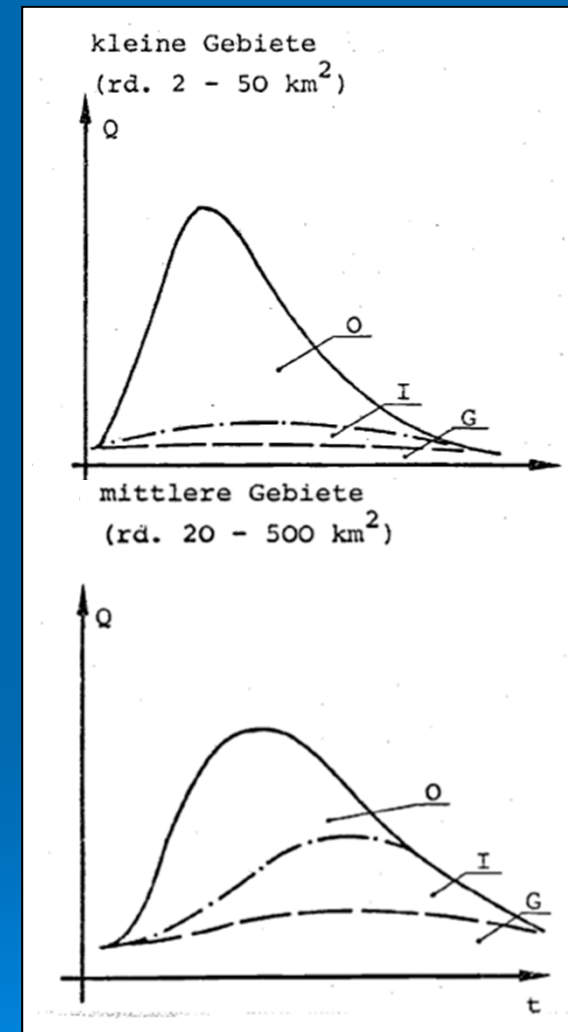
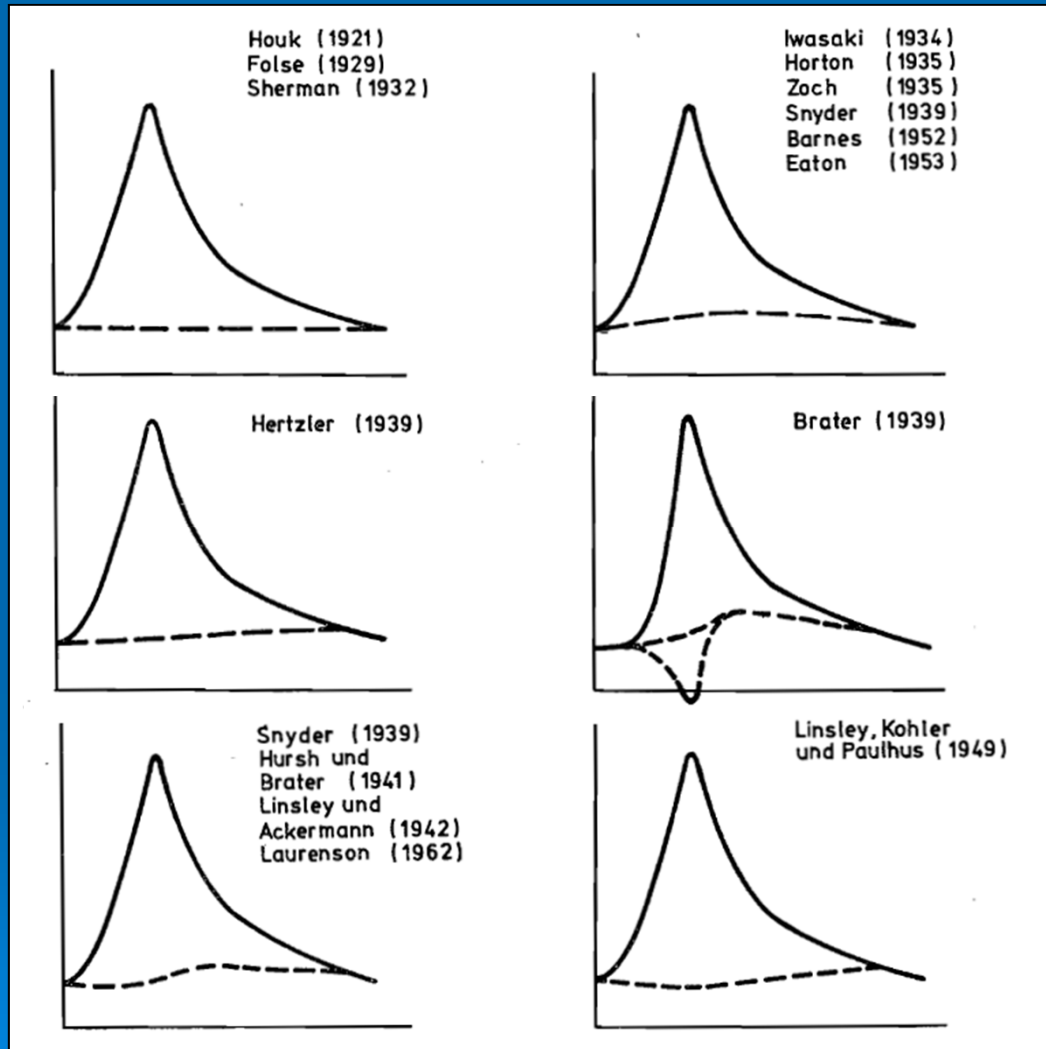


Basisabfluß - Definitionen

➤ Definitionen



Basisabfluss – Abtrennung



Basisabflussabtrennung

➤ Konzeptionelles Modell

Wenn der Abfluss (Oberfläche, Interflow, Grundwasser) in einzelnen Speicher erfolgt, dann kann man auf Grund unterschiedlicher Speicherdynamik (Dynamik des jeweiligen Prozesses) eine Abtrennung vornehmen

$$I(t) - O(t) = dS(t) / dt$$

$$I(t) = 0$$

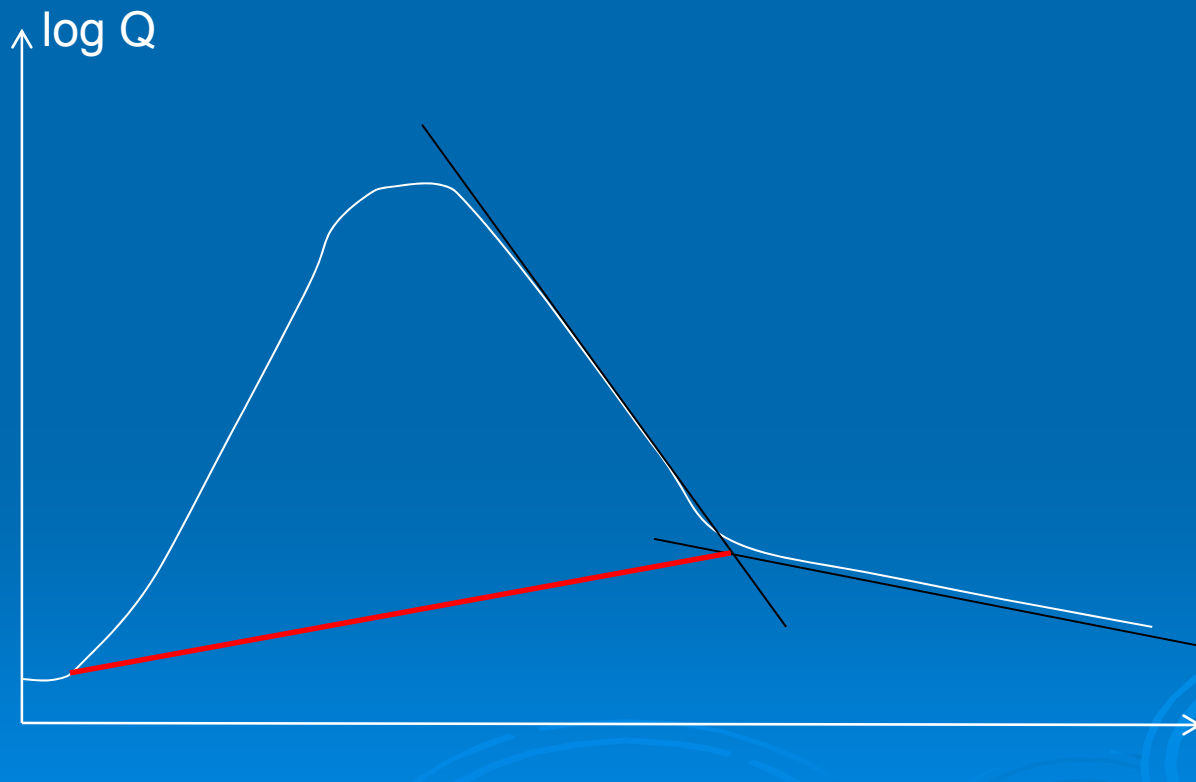
$$\text{Annahme...} O(t) = \frac{1}{\tau} \cdot S(t)$$

$$O(t) + \tau \cdot \frac{dO(t)}{dt} = 0$$

$$O(t) = O_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Basisabflussabtrennung

Wenn ein anderer Speicher wirksam wird, resultiert ein Knick in der $\log Q$ - t Kurve



Anwendung

Einzugsgebiet Innbach-Trattnach

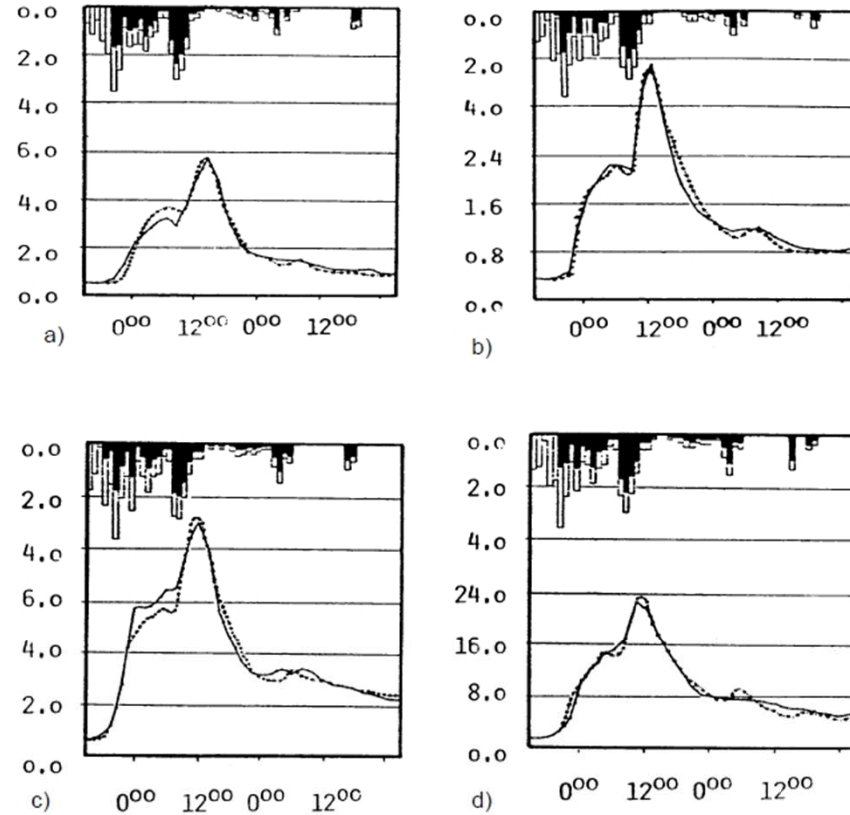
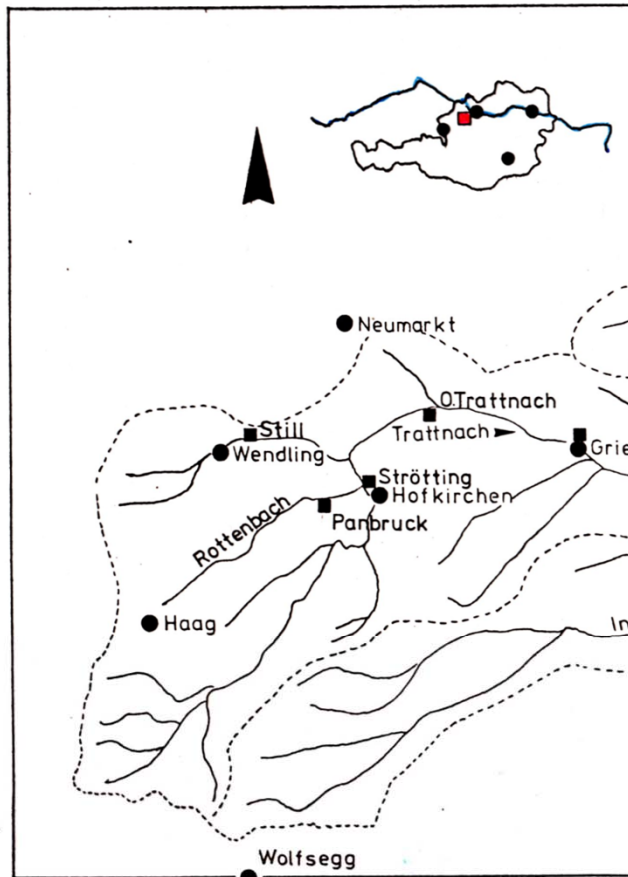
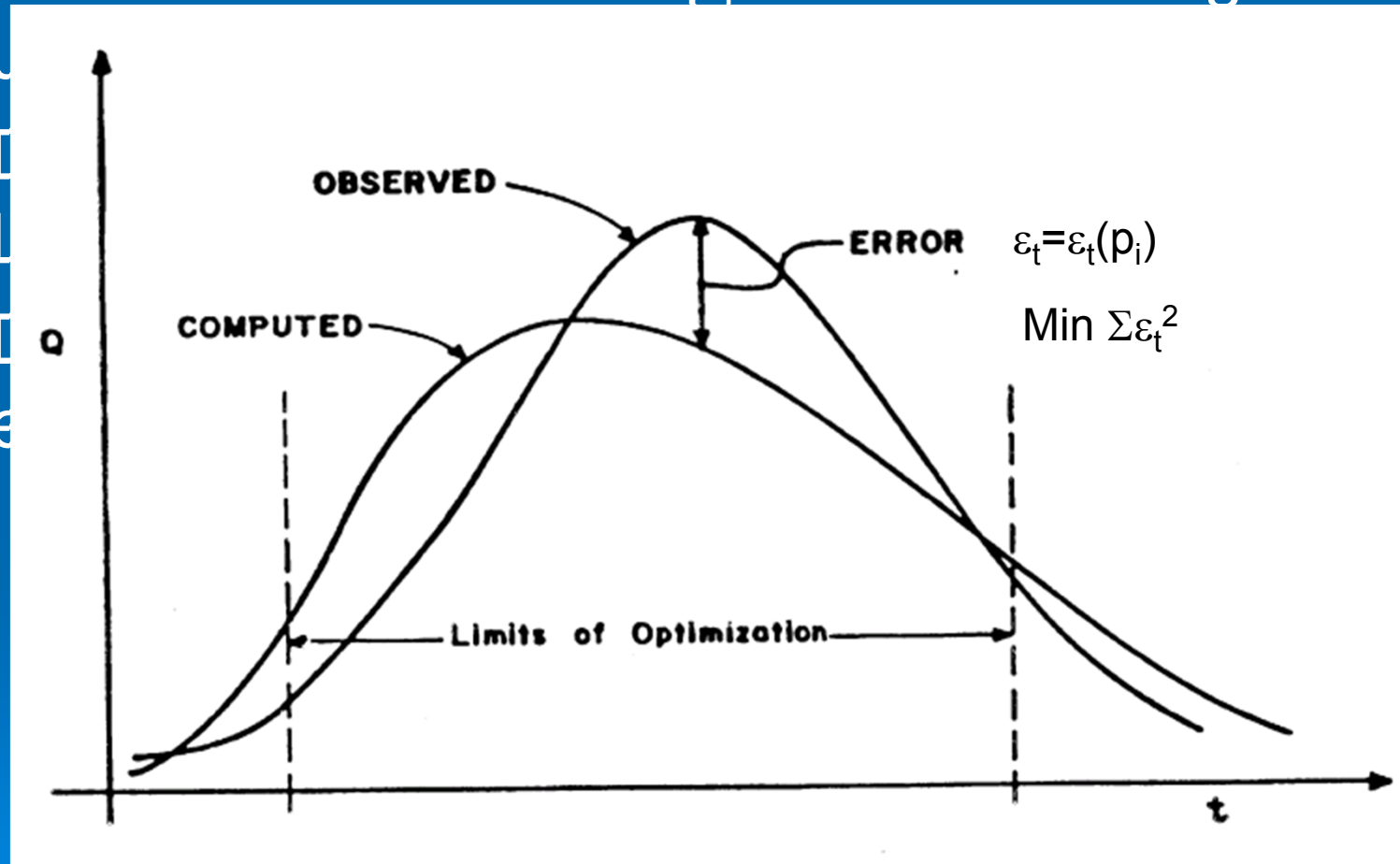


Abb. 8.12 Beispiele einer UH-Analyse: Niederschlags-Abfluss-Analysen für 4 Pegel im Einzugsgebiet der Trattnach in Oberösterreich (14.7.1974). a) Still, b) Panbruck, c) Strötting, d) Obertrattnach

Parameterschätzung

- Es werden Parameter p_i bei Berechnung des N_e



Gleichungssystem

$$Q_1 = Ne_1 \cdot x_1$$

$$Q_2 = Ne_1 \cdot x_2 + Ne_2 \cdot x_1$$

$$Q_3 = Ne_1 \cdot x_3 + Ne_2 \cdot x_2 + Ne_3 \cdot x_1$$

$$Q_i = Ne_1 \cdot x_i + Ne_2 \cdot x_{i-1} + Ne_3 \cdot x_{i-2} = \sum_{j=1}^n Ne_j \cdot x_{i+1-j}$$

Analytische Einheitsganglinie

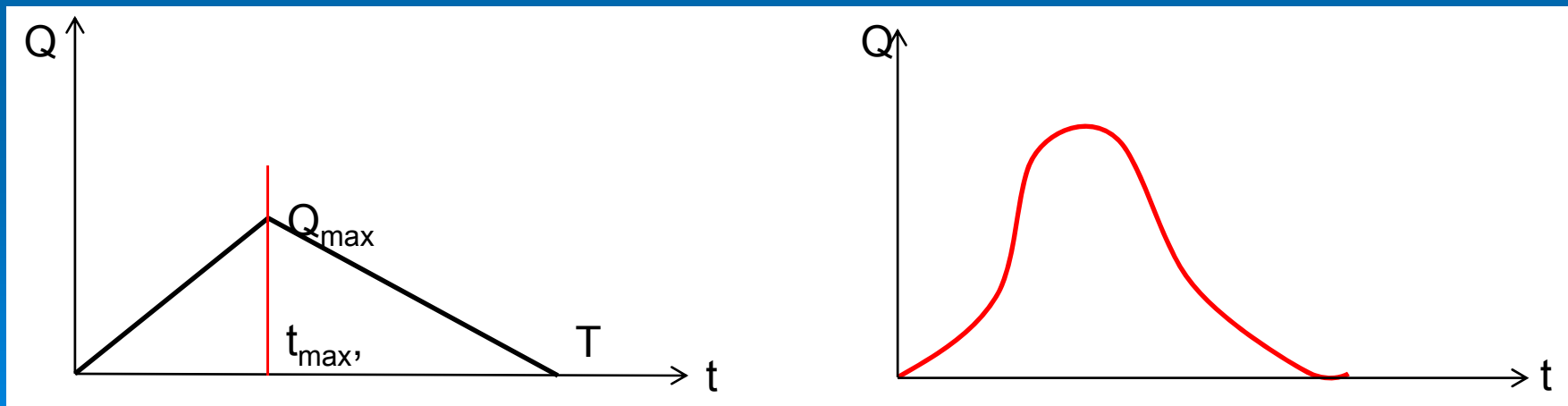
- Formal ist es einfach die x_i der Einheitsganglinie zu berechnen. ABER

Analytische Einheitsganglinie

- Formal ist es einfach die x_i der Einheitsganglinie zu berechnen. ABER
- Jeder Fehler (Messfehler, Modellfehler,..) bewirkt einen Fehler in der Gleichung der zu einem fehlerhaften x_i -Wert führt

Analytische Einheitsganglinie

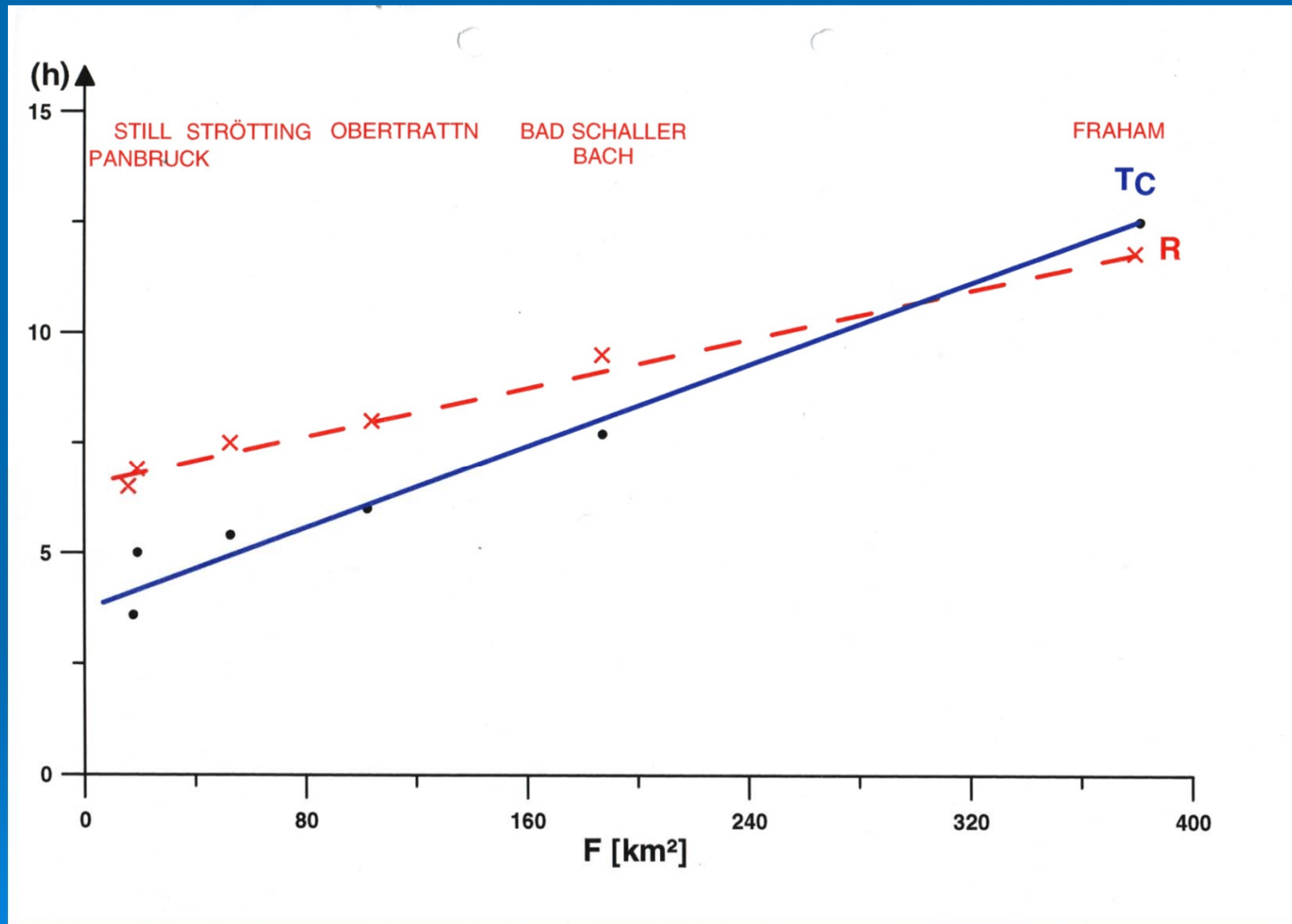
- Formal ist es einfach die x_i der Einheitsganglinie zu berechnen. ABER
- Jeder Fehler (Messfehler, Modellfehler,..) bewirkt einen Fehler in der Gleichung der zu einem fehlerhaften x_i -Wert führt
- Annahme einer vereinfachten EGL



Analytische Einheitsganglinie

- $Q(t) = a t^B e^{-Ct}$
- Für ein beliebiges t kann x_t berechnet werden
- Vorteil: die Funktion hat eine vorgegebene Struktur
- An Stelle vieler x_t sind nur drei Parameter nötig a, B, C
- Diese Parameter sind mit Translation und Retention verknüpft (siehe auch Clark UH)

Analytische Einheitsganglinie



Zusammenfassung

- Grundprinzipien der Einheitsganglinie
- Dieses Konzept wird in vielen aktuellen Modellen noch immer verwendet
- Annahmen:
 - einheitliche Überregnung in einem Zeitintervall
 - alle N-Verluste werden in einem Modul berücksichtigt
 - einheitliche (zeit-invariante) Systemantwort

Zusammenfassung

- Grundprinzipien der Einheitsganglinie
- Dieses Konzept wird in vielen aktuellen Modellen noch immer verwendet
- Annahmen:
 - einheitliche Überregnung in einem Zeitintervall
 - alle N-Verluste werden in einem Modul berücksichtigt
 - einheitliche (zeit-invariante) Systemantwort
- Vorteil: einfaches Ereignis bezogenes Verfahren

Zusammenfassung

- Grundprinzipien der Einheitsganglinie
- Dieses Konzept wird in vielen aktuellen Modellen noch immer verwendet
- Annahmen:
 - einheitliche Überregnung in einem Zeitintervall
 - alle N-Verluste werden in einem Modul berücksichtigt
 - einheitliche (zeit-invariante) Systemantwort
- Vorteil: einfaches Ereignis bezogenes Verfahren
- Nachteil: bei größeren Einzugsgebieten ist die Annahme konstanter Überregnung nicht mehr gültig; insbesondere in einem alpinen EZ
- Schwierigkeiten bei der Schätzung des Anfangszustandes



Zusammenfassung

➤ Einheitsganglinie

- Ansatz
- Prinzipien
- Superposition

➤ Effektivniederschlag

- Abflussanteile
- Ermittlung

➤ Basisabfluss

- Definitionen
- Abtrennung

- Φ -Index-Verfahren
- Ψ -Methode
- Verfahren nach Köhler
- Verfahren nach Horton
- SCS-CN-Methode
- Methode der akkumulierten Verluste