

1. Auswertung von **Niederschlagsmessungen, Abflusskurve**
2. Verfahren zur Ermittlung der **Verdunstung**
3. Aufstellen und Berechnen von **Wasserbilanzen**
4. Einführung zur **Extremwertstatistik** für Hochwässer
5. Verfahren zur Beschreibung der **Abflussbildung**
6. Verfahren zur Beschreibung der **Abflusskonzentration, Teil 1**
7. Verfahren zur Beschreibung der **Abflusskonzentration, Teil 2**

Literatur:

Dyck & Peschke (1995): Grundlagen der Hydrologie; Verl. f. Bauwesen

Vorlesungsskript Hydrologie 1, Uni BW München, Prof. M. Disse

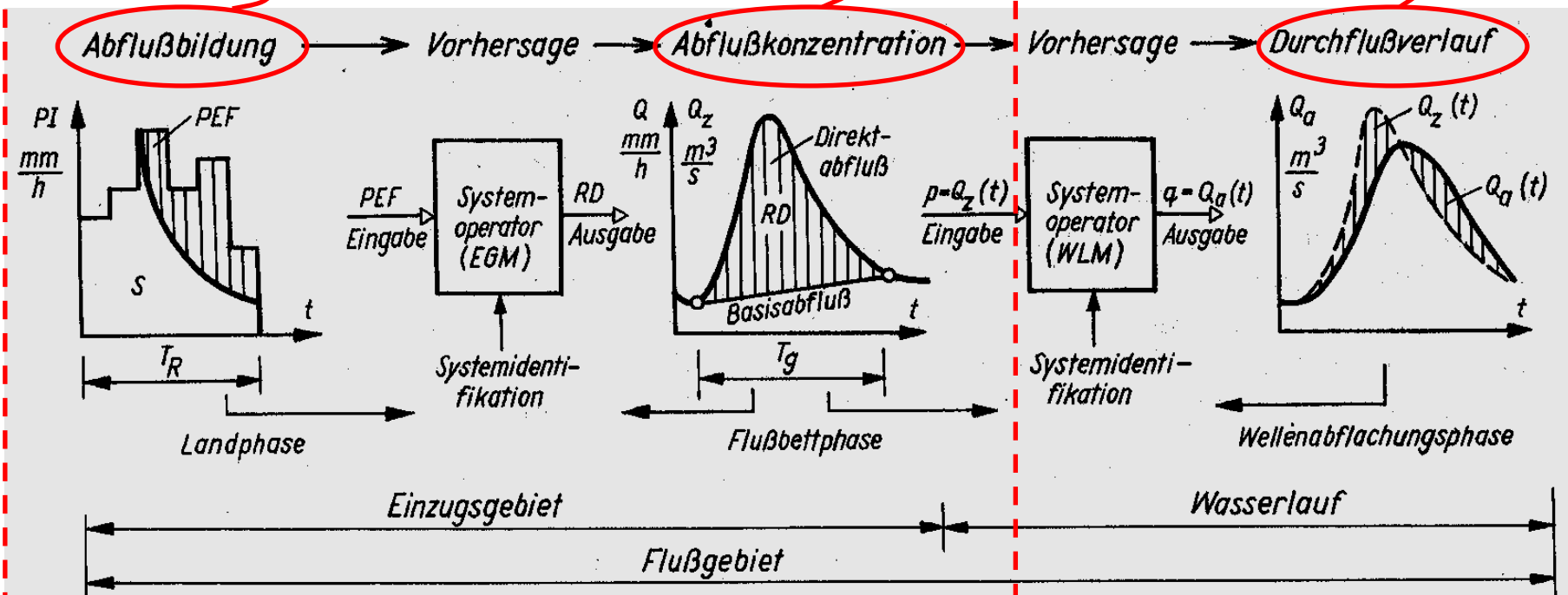
Manuskript zur Vorlesung Hydrologie und Wasserwirtschaft - Hydrologische Modellierung, Prof. Hinkelmann, TU Berlin

www.tu-berlin.de/fak6/iwawi/teachings/downloads/Hydrologische_Modellierung_V.pdf

Bestimmung des Anteils des Niederschlags, der nicht im Einzugsgebiet zurückgehalten wird und unmittelbar abfließt (Effektiv-Niederschlag)

Bestimmung der Ganglinie des Abflusses aus dem Einzugsgebiet als Reaktion auf den Effektiv-Niederschlag

Beschreibung der Fortpflanzung der Hochwasserwelle im Fluss/Gewässernetz



Mehrstufiges Modellkonzept zur Beschreibung der Transformation des Niederschlags in den Abfluss (aus Dyck/Peschke, 1995)

Begriffe und behandelte Verfahren

1. Erfassung der **Abflussbildung**

wesentliches Ziel:

Ermittlung des Anteils des Niederschlags, der nicht im Einzugsgebiet zurückgehalten wird o. verdunstet und daher unmittelbar zum Abfluss gelangt („Effektivniederschlag“)

behandelte Methoden:

- einfache Beiwerte
- Koaxial-Diagramm
- SCS-Verfahren

2. Erfassung der **Abflusskonzentration**

wesentliches Ziel:

Beschreibung der Transformation des Effektivniederschlags in den Abfluss, der am Auslass eines Einzugsgebiets beobachtet werden kann

behandelte Methoden:

Konzeptionelle Impulsantwortverfahren

- Isochronen-Verfahren
- Einheitsganglinie (Unit Hydrograph)

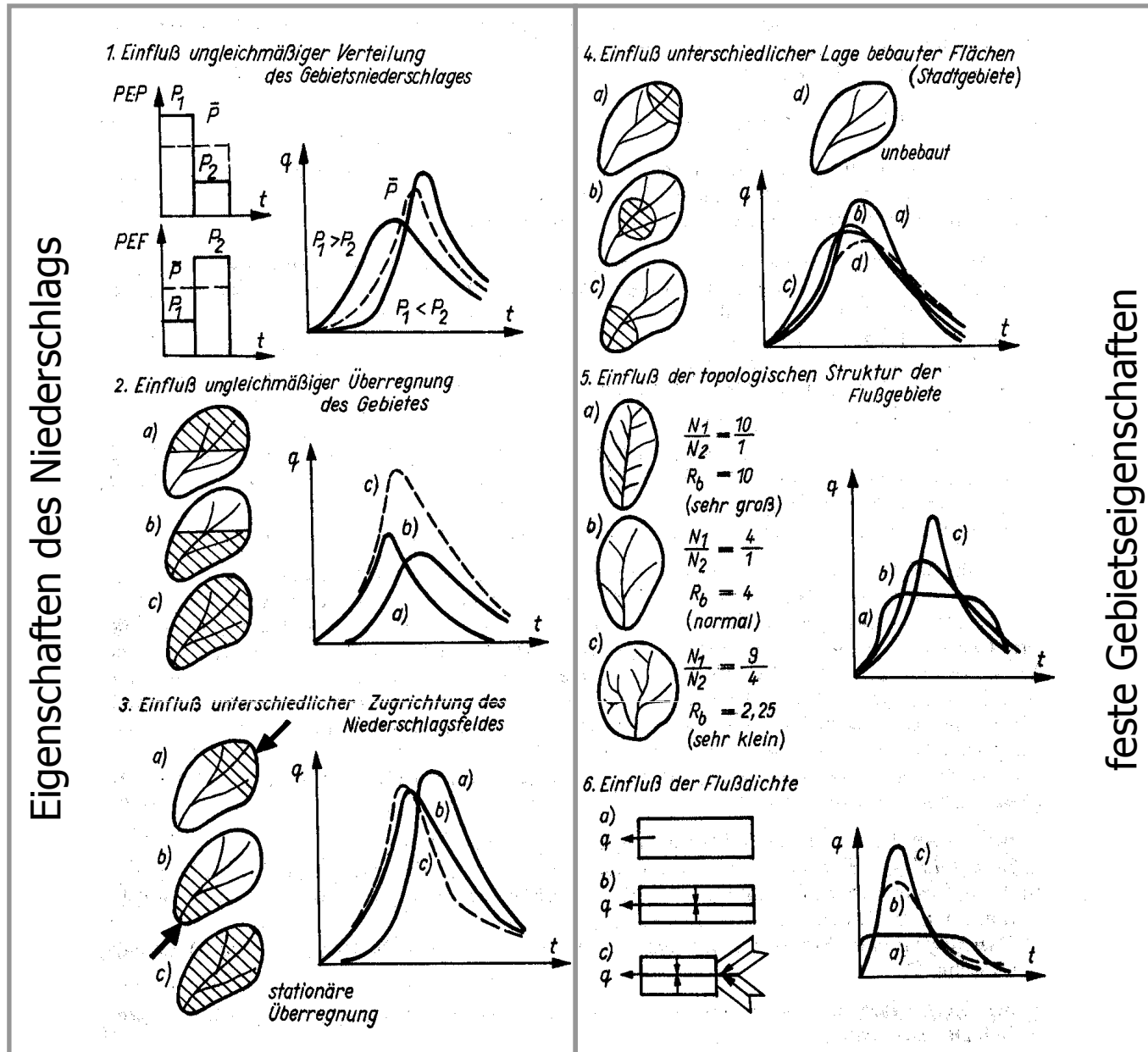


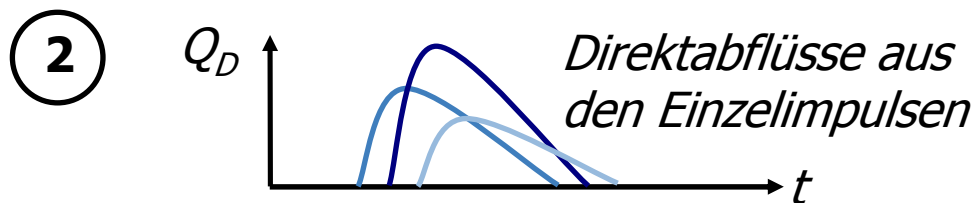
Abb. aus
Dyck/Peschke
1995

Grundidee

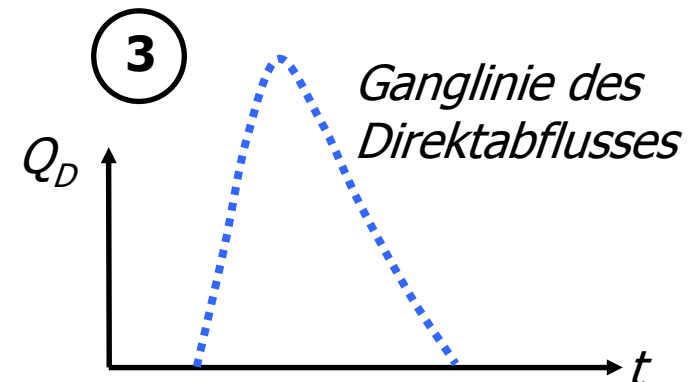
- Die Ganglinie des Effektivniederschlags wird als eine Folge von diskreten Impulsen der Dauer Δt dargestellt (Eingangssignale des Systems)



- Mittels einer für das System (Einzugsgebiet) charakteristischen Vorschrift („Übertragungsfunktion“, „Systemoperator“, „Antwortfunktion“) kann für jeden Effektivniederschlagsimpuls die Systemantwort (Ausgangssignal, hier: Direktabfluss am Gebietsauslass) berechnet werden



- Die aus dem gesamten Niederschlagsereignis resultierende Ganglinie des Direktabflusses erhält man durch Überlagerung der Reaktionen auf die einzelnen Impulse



Grundprinzip 1: "Proportionalitäts- oder Verstärkungsprinzip"

- Aus einem mit k multiplizierten Eingangssignal p folgt ein mit k multipliziertes Ausgangssignal

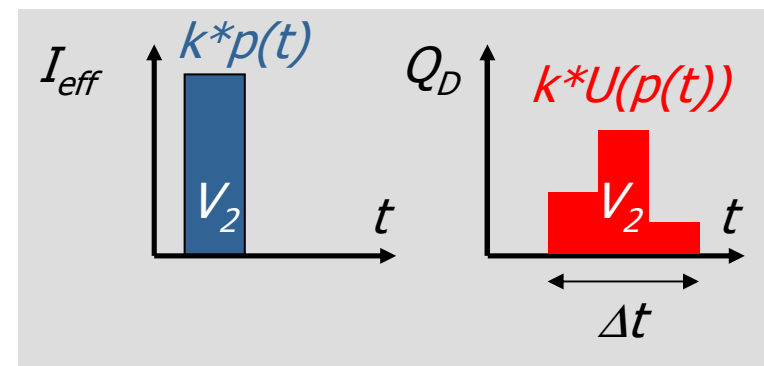
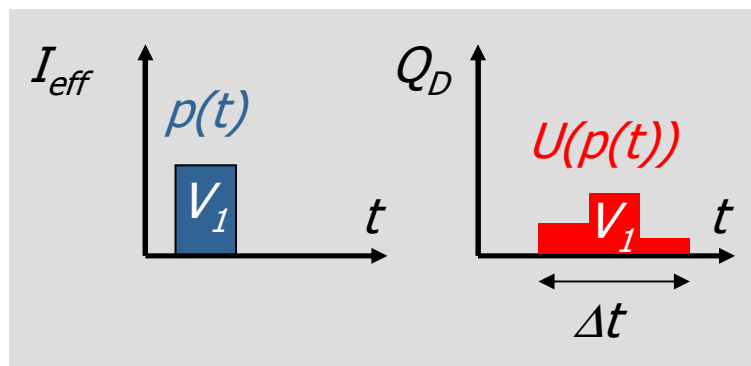
$$U(k \cdot p(t)) = k \cdot U(p(t))$$

U : Übertragungsfunktion

$p(t)$: Eingangssignal, $U(p(t))$: Ausgangssignal

k : beliebige Konstante

- Die Höhe des aus einem Effektivniederschlagsimpuls (I_{eff}) resultierenden Direktabflussimpulses (Q_D) hängt linear von der Höhe des Effektivniederschlagsimpulses ab
- Form und Dauer der aus einem Effektivniederschlagsimpuls resultierenden Direktabflussganglinie sind v. der Effektivniederschlagsintensität unabhängig

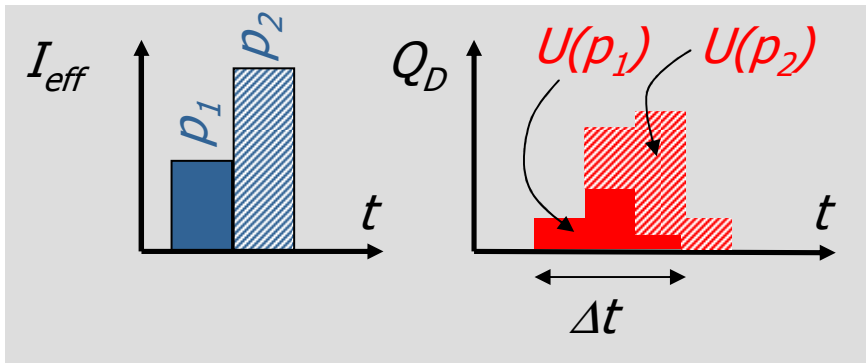


Es gilt die Volumenbilanz: $\int P I_{\text{eff}} dt = \int Q_D dt$ (keine permanente Speicherung)

Grundprinzip 2: "Superpositions- oder Überlagerungsprinzip"

- Die Systemantworten mehrerer (z.B. zeitlich aufeinander folgender) Eingangsimpulse überlagern sich ungestört

$$U(p_1(t) + p_2(t)) = U(p_1(t)) + U(p_2(t))$$



- Die Kombination von Proportionalitäts- und Superpositionsprinzip bezeichnet man als "**Linearitätsprinzip**"

$$U(k_1 * p_1(t) + k_2 * p_2(t)) = k_1 * U(p_1(t)) + k_2 * U(p_2(t))$$

Grundprinzip 3: Zeitlich invariantes Systemverhalten

- Die Übertragungsfunktion ist zeitlich unveränderlich – ein identischer Impuls des Effektivniederschlags erzeugt immer die gleiche Direktabflussganglinie
- Daraus folgt u.a., dass:
 - die Übertragungsfunktion bei Veränderung der Gebietseigenschaften (Vegetation, Versiegelungsgrad etc.) ungültig wird
 - besondere Situationen (gefrorener Boden, Schneeschmelze) mit einer für „Normalbedingungen“ gültigen Übertragungsfunktion nicht behandelt werden können

Weitere Grundannahme: Homogene Niederschlagsverteilung

- Die Ganglinie des Effektivniederschlags wird für das gesamte Einzugsgebiet als gültig angenommen
- Die Anwendung ist daher auf kleine Gebiete beschränkt oder erfordert eine Gliederung in Teileinzugsgebiete

Schritte zur Anwendung von Impulsantwortverfahren

1. Bestimmen der Übertragungsfunktion U für das untersuchte Einzugsgebiet („Systemidentifikation“)



2. Berechnung der Ganglinie des Direktabflusses am Gebietsauslass aus der Ganglinie des Effektivniederschlags mit Hilfe der bekannten Übertragungsfunktion

Methoden +
Anwendungen

Ableitung von U aus Gebietseigenschaften
(z.B. *Isochronen-Verfahren*)

Ableitung von U aus beobachteten Ein- und Ausgangssignalen (Black-Box-Methode)
(z.B. *Einheitsganglinien-Verfahren*)

Idee des Isochronen-Verfahrens

- Ableitung der benötigten Übertragungsfunktion aus der Fließzeit, die der an einem beliebigen Punkt gefallene Effektivniederschlag bis zum Pegel am Gebietsauslass benötigt
- Aus einer gegebenen Ganglinie des Effektivniederschlags kann mittels der bekannten Übertragungsfunktion die Ganglinie des Abflusses am Gebietsauslass ermittelt werden

Anwendungsbereich

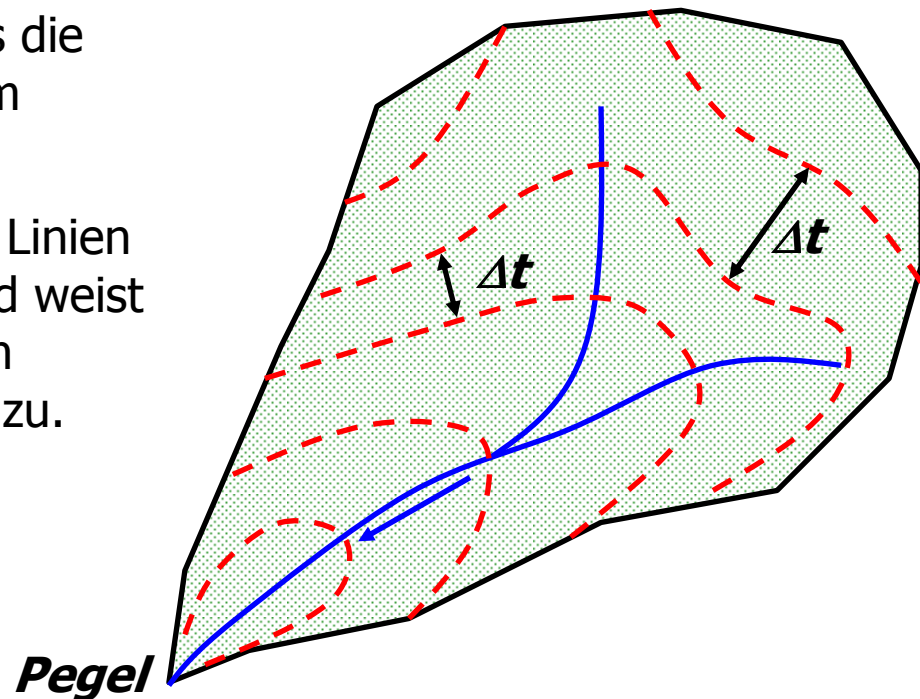
- Gebiete in denen die Geschwindigkeit des aus dem Effektivniederschlag resultierenden, schnellen Abflusses zuverlässig geschätzt werden kann
- In der Stadtentwässerung als „Flutplanverfahren“ bezeichnet (simple geometrische Flächen und konstanten Gefälle)

Schritte zur Anwendung des Isochronen-Verfahrens

1. Ermitteln von Fließzeiten und Zeichnen der Isochronen
2. Aufstellen der Übertragungsfunktion (wird beim Isochronenverfahren Laufzeit-Flächen-Diagramm oder Zeit-Flächen-Diagramm genannt)
3. Diskretisieren des Ganglinie des Effektivniederschlags und Konvertieren der Einheiten
4. Berechnen der erwarteten Ganglinie des Direktabflusses mit Hilfe des Zeit-Flächen-Diagramms (Faltungsoperation)

Ermitteln von Fließzeiten und Zeichnen der Isochronen

- Für jeden Punkt des Gebiets muss die mittlere Fließzeit bis zum Pegel am Gebietsauslass ermittelt werden
- Praktisch zeichnet man hierzu die Linien gleicher Fließzeit (*Isochronen*) und weist der Fläche zwischen benachbarten Isochronen eine mittlere Fließzeit zu.



- Der Abstand der Isochronen kann als Laufzeit Δt ausgedrückt werden
- Für eine einfache Rechnung sollte Δt äquidistant gewählt werden
- Δt ist so zu wählen, dass eine sinnvolle Anzahl Isochronen (ca. 8-10) entsteht

Ermitteln von Fließzeiten und Zeichnen der Isochronen

- Den Isochronenabstand Δt legt man anhand der Fließzeit vom entferntesten Punkt der Wasserscheide bis zum Pegel (Konzentrationszeit T_c) fest

$$\Delta t = T_c / n \quad (n: \text{angestrebte Anzahl der Isochronen})$$

- Die Berechnung von T_c erfordert die Kenntnis der Fließgeschwindigkeit v des zusammenfließenden Effektivniederschlags!

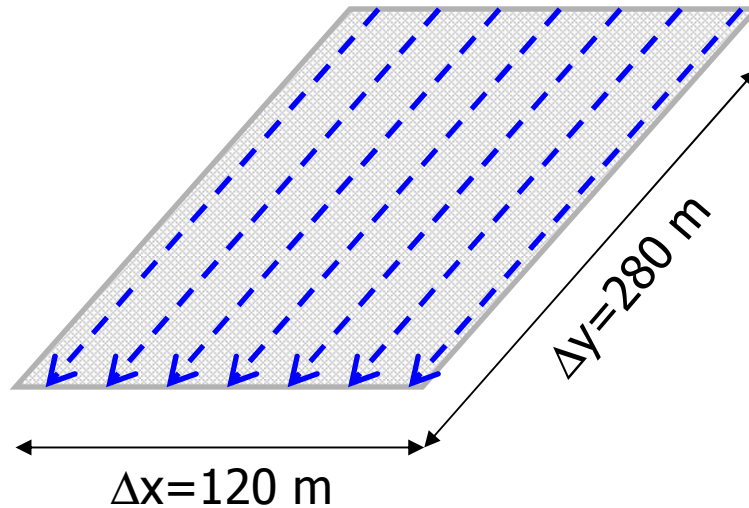
- Auch zur Festlegung der räumlichen Lage der Isochronen benötigt man die Fließgeschwindigkeit v !

$$v = \Delta x / \Delta t \quad (\Delta x: \text{räumlicher Isochronenabstand, } \Delta t: \text{zeitlicher Iso.-abstand})$$

- In natürlichen Einzugsgebieten ist v schwierig zu ermitteln, weil
 - Gefälle und Rauigkeiten räumlich variabel sind
 - verschiedene Abflusskomponenten zum Direktabfluss beitragen
→ empirische Formeln (z.B. Kirpich, US SCS)
- Für künstliche Oberflächen mit hohem Abflussbeiwert und bekanntem Gefälle (Stadtgebiete) lässt sich v mit hydraulischen Ansätzen schätzen

Ermitteln von Fließzeiten und Zeichnen der Isochronen

Beispiel: Isochronen für eine geneigte versiegelte Fläche



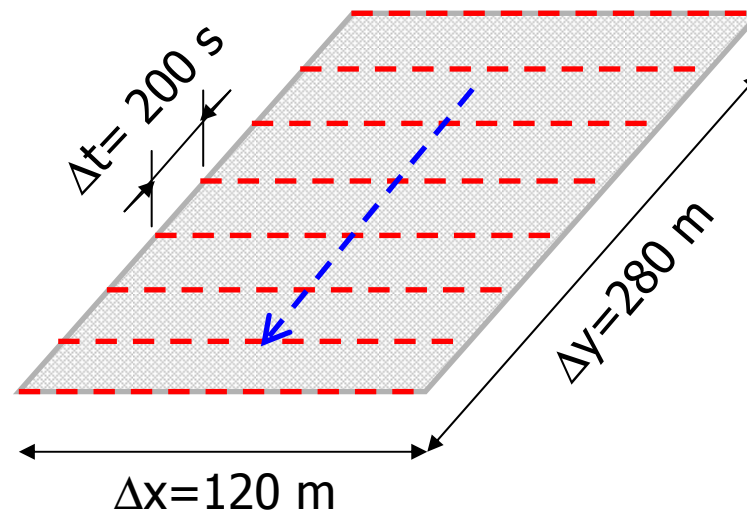
Annahmen:

- mittlere Fließgeschwindigkeit des Oberflächenabflusses $v = 0.2 \text{ m/s}$
- konstantes Gefälle

- Die maximale Fließzeit ist $T_c = \Delta y / v = 1400 \text{ s}$
- Um 7 Isochronen-Intervalle zu erhalten, wählt man als zeitlichen Abstand der Isochronen $T_c / 7 = 1400 \text{ s} / 7 = 200 \text{ s}$
- Der räumliche Abstand der Isochronen ergibt sich zu $200 \text{ s} * 0.2 \text{ m/s} = 40 \text{ m}$

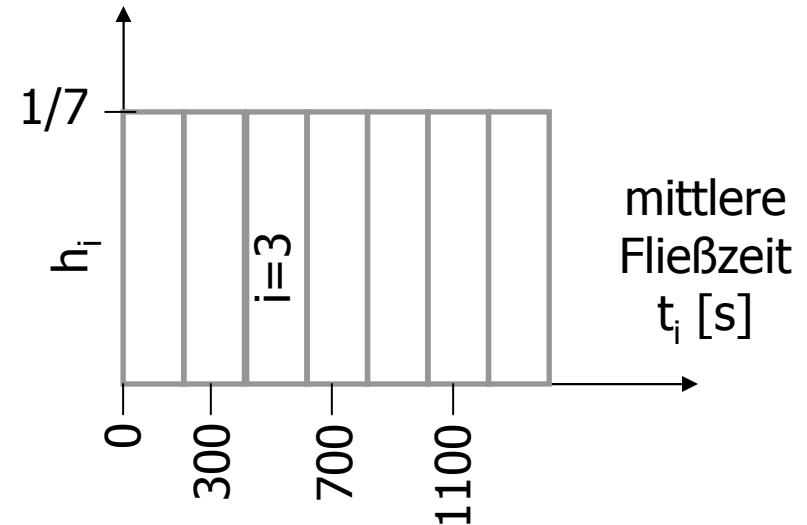
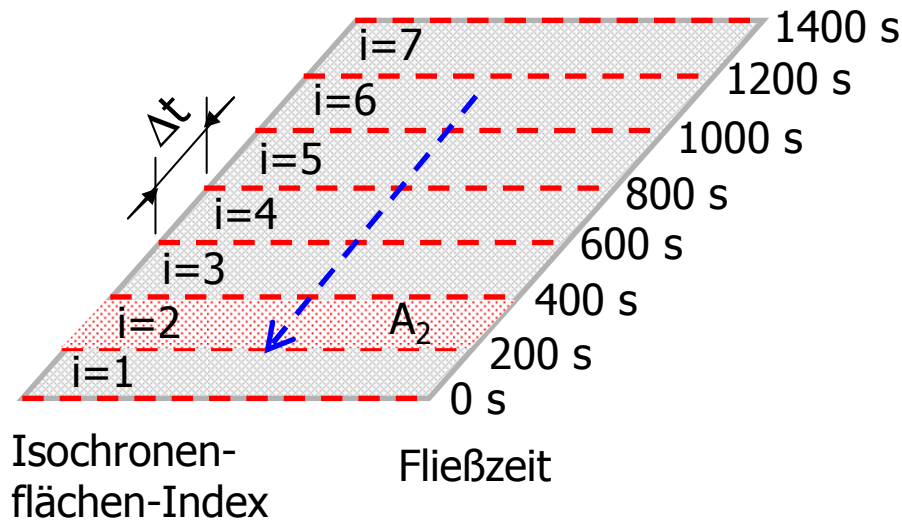
Ermitteln von Fließzeiten und Zeichnen der Isochronen

Bild der Isochronen im regelmäßigen Intervall $\Delta t = 200$ s



Aufstellen des Zeit-Flächen-Diagramms

- Im Zeit-Flächen-Diagramm trägt man den Flächenanteil zwischen den Isochronen über der zugehörigen Fließzeit zum Gebietsauslass auf



- Fläche zwischen 2 Isochronen: A_i
- Flächenanteil: $h_i = A_i / \Sigma A_i$
- mittl. Fließzeit: $t_i = (i-0.5) \cdot \Delta t$

- Das Zeit-Flächen-Diagramm stellt dar, wie ein Impuls des Effektivniederschlags, der das gesamte Gebiet überdeckt, über die Zeit verteilt zum Abfluss am Gebietsauslass führt → Impulsantwort
- Die Summe der Ordinaten h_i ist 1

Aufstellen des Zeit-Flächen-Diagramms

- Bei der Anwendung auf unregelmäßig begrenzte Gebiete unterscheiden sich die Werte h_i und es entsteht ein unregelmäßiges Zeit-Flächen-Diagramm

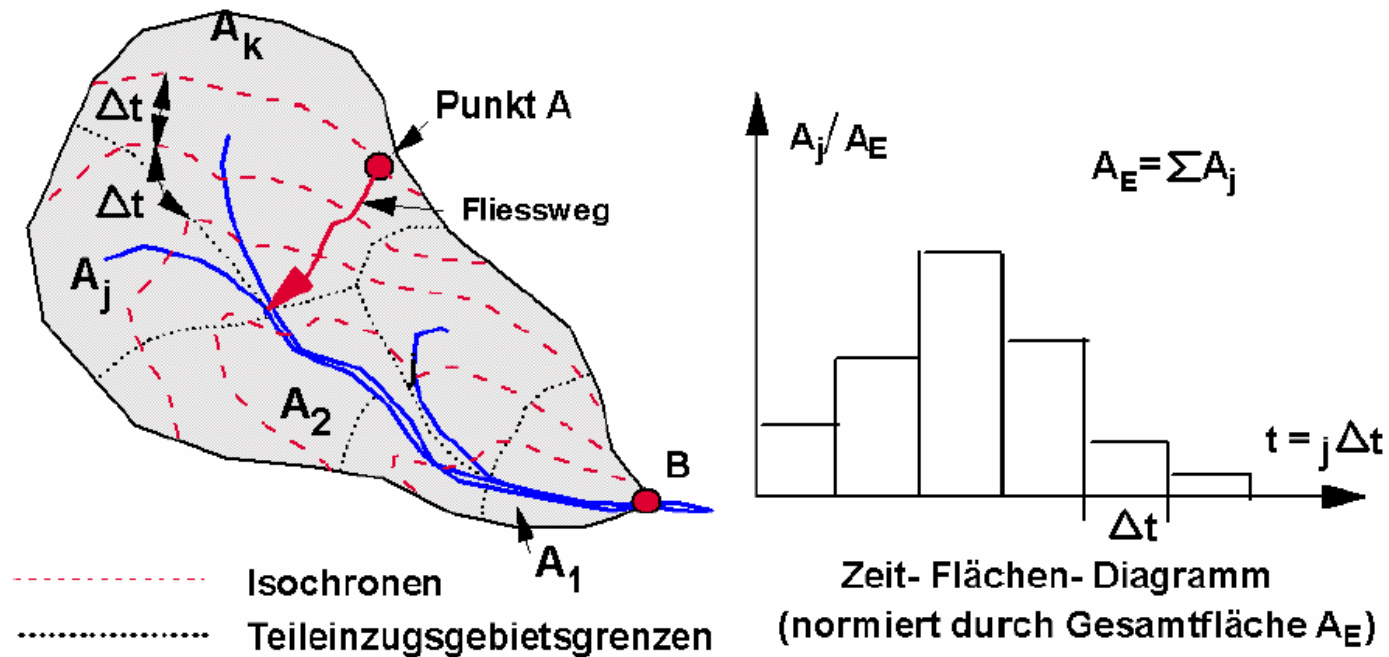
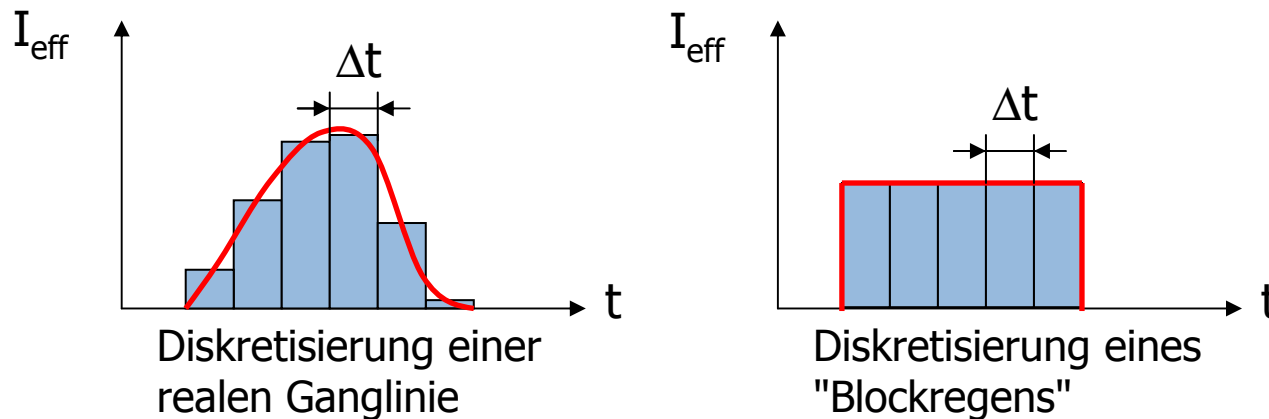


Abb. aus Disse, Vorlesungsskript Hydrologie 1

Diskretisierung und Umrechnung des Niederschlags

a) Zeitliche Diskretisierung

Die Ganglinie des Effektivniederschlags-Intensität I_{eff} wird als Folge von Rechteckimpulsen der Dauer Δt (Isochronenabstand) dargestellt:

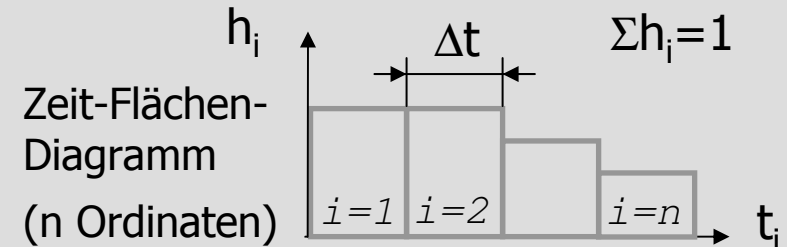
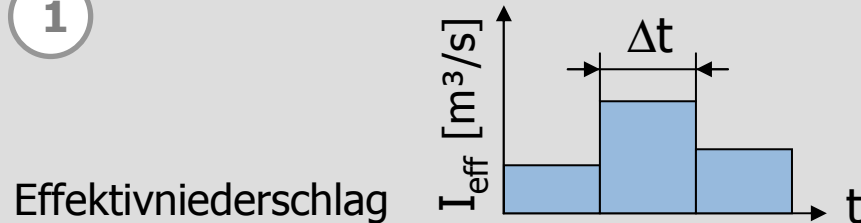


b) Umrechnen der Einheit des Effektivniederschlags

Die Effektivniederschlagsintensität I_{eff} [mm/h] wird mit Hilfe der Fläche des Einzugsgebiets [z.B. m^2] in die Einheit des Abflusses [z.B. m^3/s] umgerechnet.

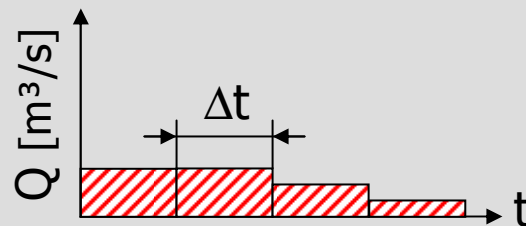
Berechnen der erwarteten Abflussganglinie („Faltungsoperation“)

1

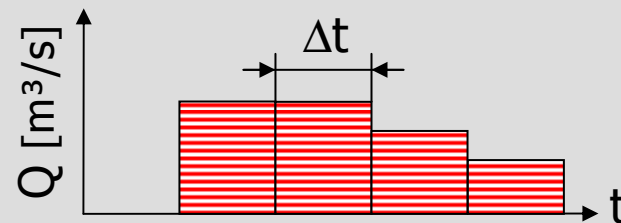


2

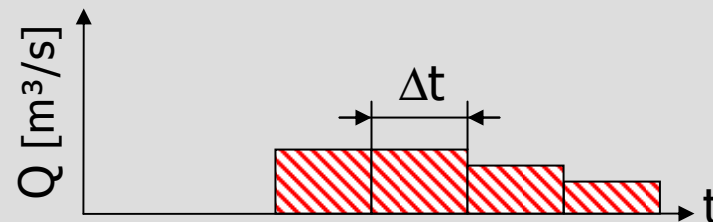
Abfluss aus 1.
Niederschlags-
impuls



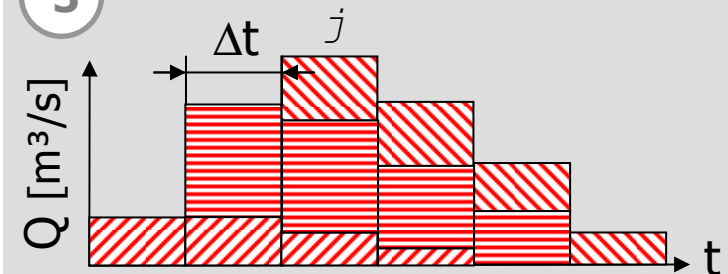
Abfluss aus 2.
Niederschlags-
impuls



Abfluss aus 3.
Niederschlags-
impuls



3

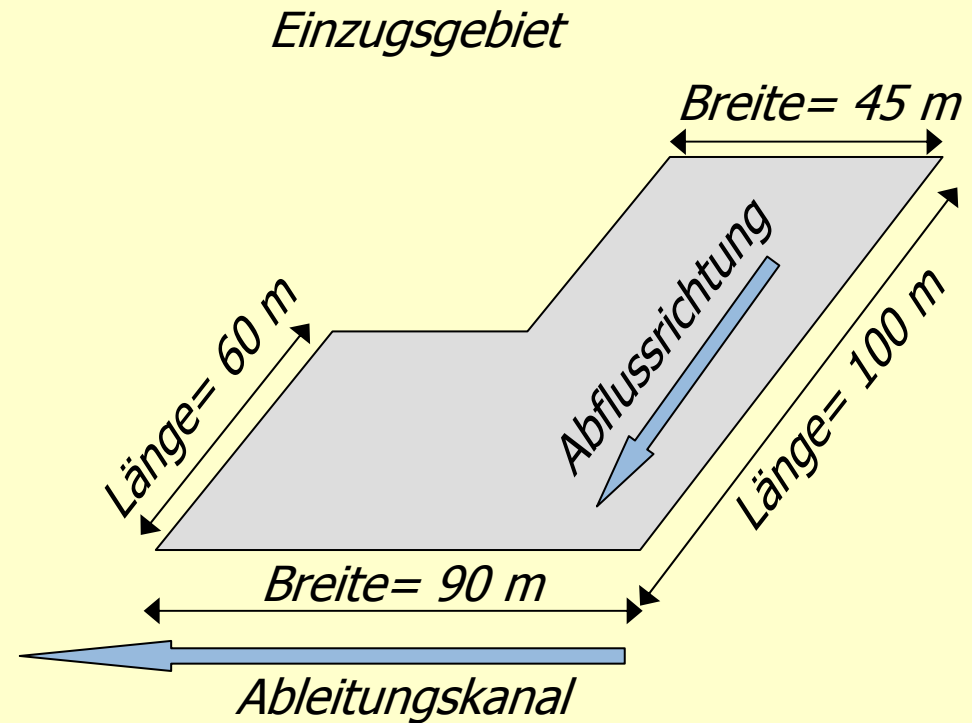
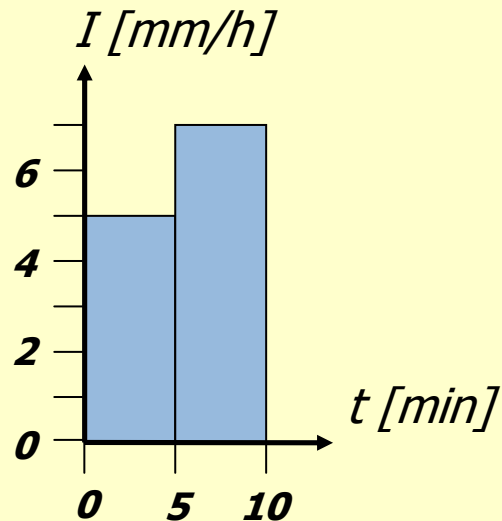


Überlagerung der Abflüsse aus
allen Niederschlagsimpulsen
(aus dem Effektivniederschlag
resultierende Abflussganglinie)

$$Q_j = \sum_{i=1}^n I_{j-i+1} * h_i$$

Gegeben:

Niederschlagsganglinie



- Abflussbeiwert (zeitl. & räuml. konstant): $\psi=1$
- Geschwindigkeit des Oberflächenabflusses: $v= 20 \text{ cm/sek}$
(Annahme: zeitl. & räuml. konstant)

Gesucht: Ganglinie des Abflusses, die den Ableitungskanal erreicht [Liter/s]

Schritt 1: Erstellen des Isochronenplans

1a) Festlegen der Anzahl der Isochronenintervalle (n): 5 (einfaches Bsp.)

1b) Berechnen des zeitlichen Abstands der Isochronen (dt) mit Hilfe der Konzentrationszeit T_c

T_c entspricht der maximalen Fließzeit $\rightarrow T_c$ ergibt sich aus dem maximalen Fließweg L_{max} und Fließgeschwindigkeit v .

$$T_c = L_{max} / v \quad \rightarrow T_c = 100 [m] / 0.2 [m/s] = \mathbf{500 s}$$

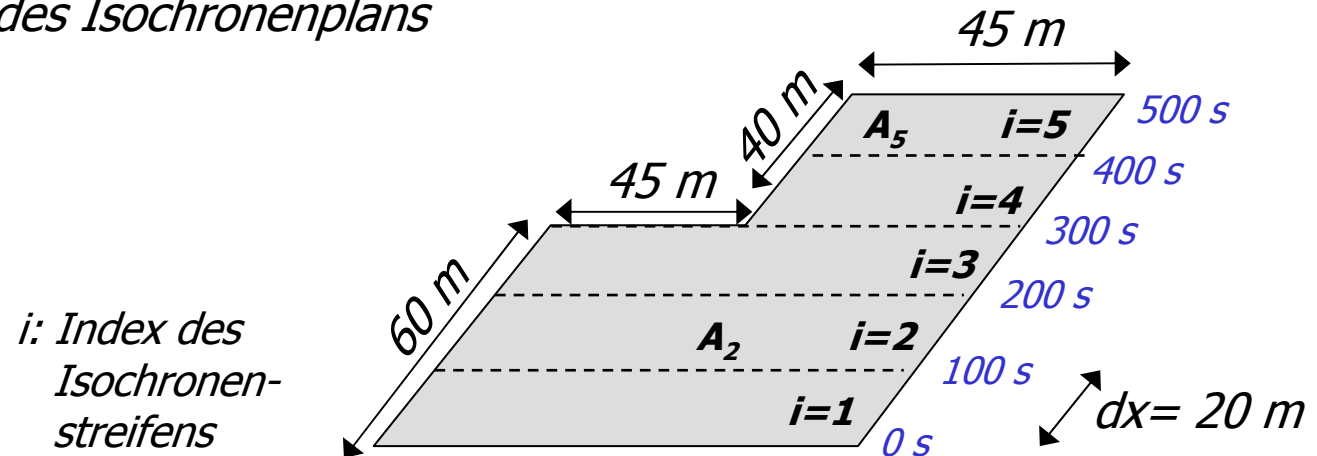
Der zeitliche Abstand der Isochronen (dt) ist:

$$dt = T_c / n \quad \rightarrow dt = 500 [s] / 5 = \mathbf{100 s}$$

1c) Der räumliche Abstands der Isochronen (dx) ist:

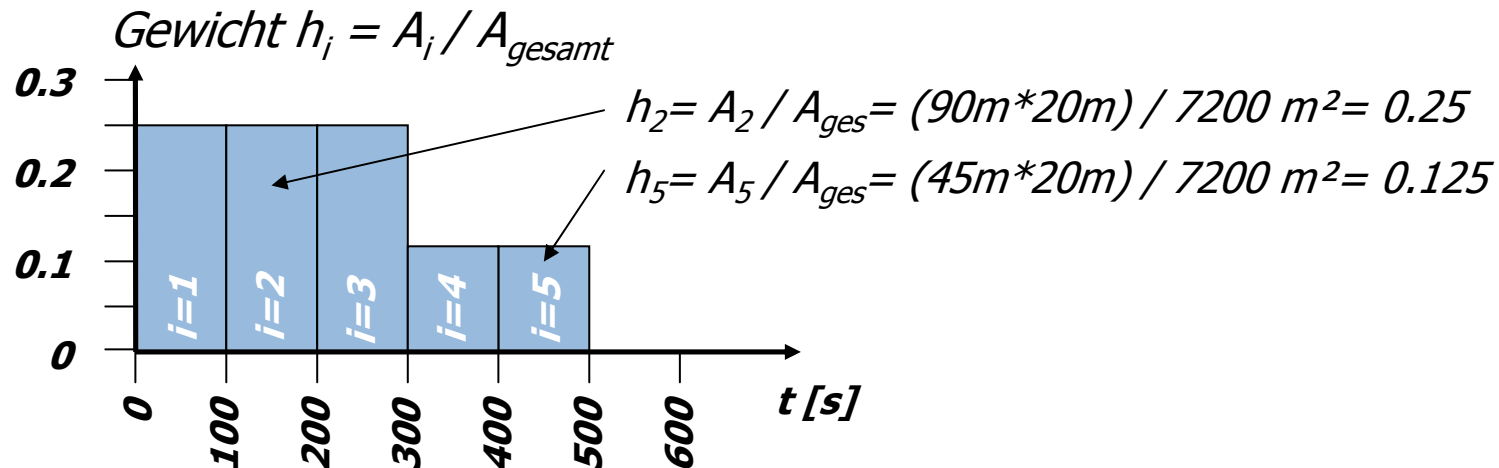
$$dx = v * dt \quad \rightarrow dx = 0.2 [m/s] * 100 [s] = \mathbf{20 m}$$

1d) Zeichnen des Isochronenplans



Schritt 2: Erstellen des Zeit-Flächen-Diagramms

→ Auftragen der Flächenanteile der Isochronenstreifen (Gewichte h) über der jeweiligen Fließzeit. Die Summe der h_i über alle Isochronenstreifen i ergibt 1.



Schritt 3: Diskretisieren der Niederschlagsganglinie

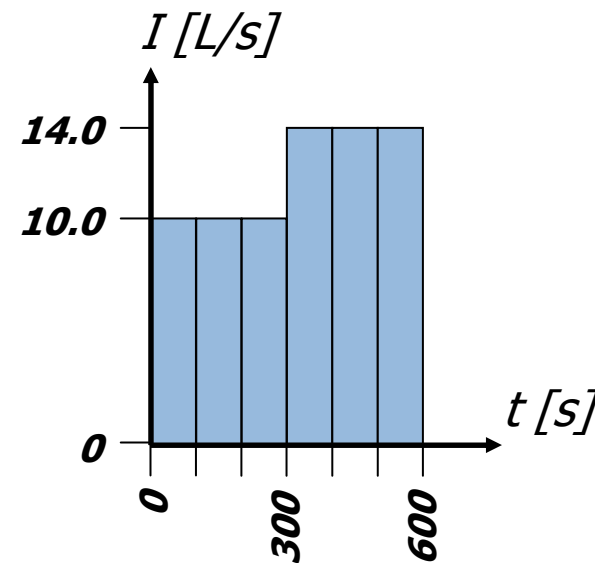
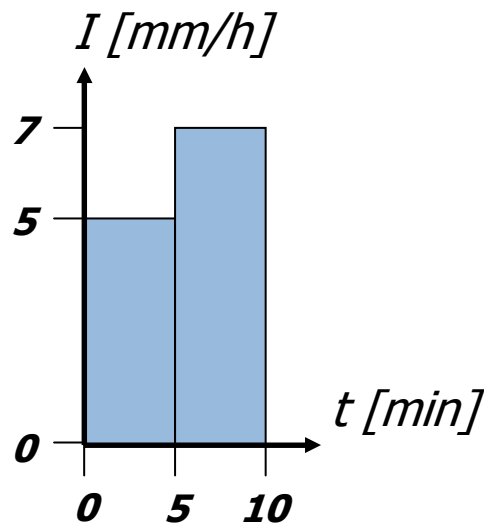
3a: Umrechnen der Niederschlagsintensität [mm/h] in die Einheit des Abflusses [Liter/s] unter Verwendung der bekannten Einzugsgebietsfläche

$$1 \frac{\text{mm}}{\text{h}} \cdot 7200 \text{m}^2 = 1 \frac{\text{mm}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{h}}{3600 \text{s}} \cdot \frac{1 \text{m}}{1000 \text{mm}} \cdot 7200 \text{m}^2 = \frac{7200}{3.6 \cdot 10^6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = \frac{7200 \text{ L}}{3600 \text{ s}} = 2.0 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

$$\rightarrow 5 \text{ mm/h} = 10 \text{ L/s}$$

$$\rightarrow 7 \text{ mm/h} = 14 \text{ L/s}$$

3b: Niederschlagsganglinie in Impulse der Dauer dt (zeitl. Isochronenabstand) auflösen



Schritt 4: Berechnen der Direktabflussganglinie

Anzahl der Ordinaten der Direktabflussganglinie (m) = $6 + 5 - 1 = 10$

(m = Anzahl Niederschlagsimpulse + Anzahl Ordinaten des Zeit-Flächen-Diagramms - 1)

Arbeitstabelle:

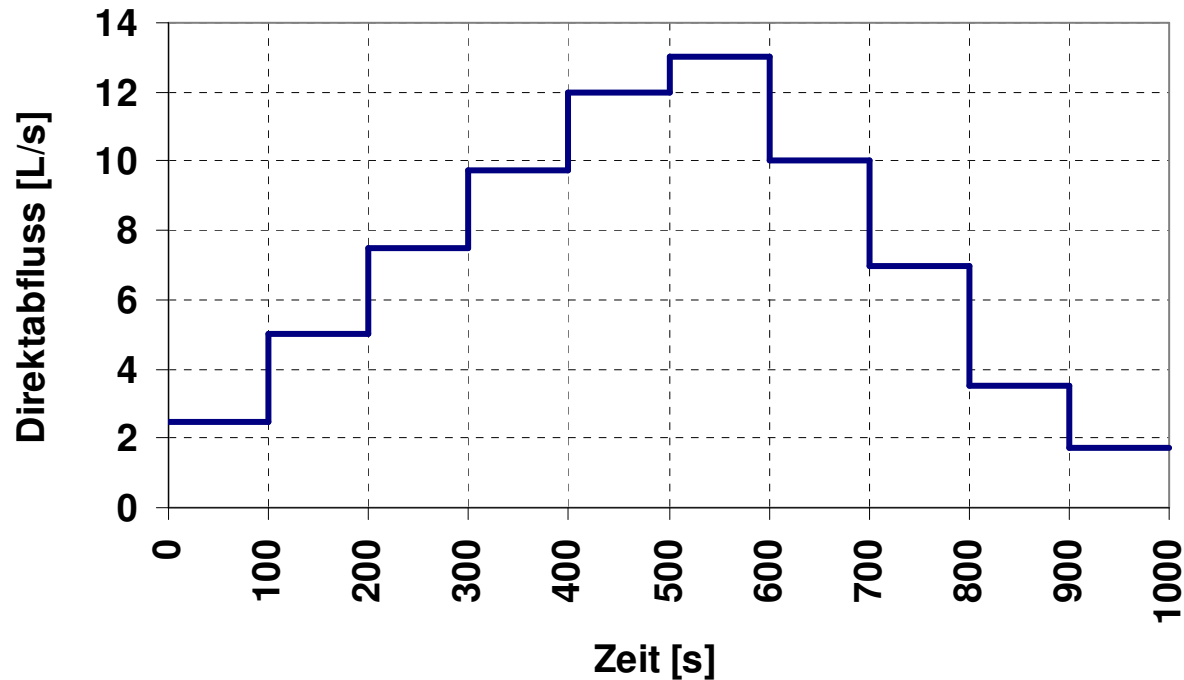
Zeitindex Niederschlag		1	2	3	4	5	6	
Intervall [sek]		0 - 100	100 - 200	200 - 300	300 - 400	400 - 500	500 - 600	
Intensität [L/sek]		10	10	10	14	14	14	
Zeitindex Abfluss	Intervall [sek]							Abfluss [L/sek]
1	0 - 100	=10*0.25						2.50
2	100 - 200	=10*0.25	=10*0.25					5.00
3	200 - 300	=10*0.25	=10*0.25	=10*0.25				7.50
4	300 - 400	=10*0.125	=10*0.25	=10*0.25	=14*0.25			9.75
5	400 - 500	=10*0.125	=10*0.125	=10*0.25	=14*0.25	=14*0.25		12.00
6	500 - 600		=10*0.125	=10*0.125	=14*0.25	=14*0.25	=14*0.25	13.00
7	600 - 700			=10*0.125	=14*0.125	=14*0.25	=14*0.25	10.00
8	700 - 800				=14*0.125	=14*0.125	=14*0.25	7.00
9	800 - 900					=14*0.125	=14*0.125	3.50
10	900 - 1000						=14*0.125	1.75

Resultierende Abflussganglinie aus 1. NS-Impuls

Erster Faktor: Niederschlagsintensität des Zeitintervalls

Zweiter Faktor: Gewichte aus dem Zeit-Flächen-Diagramm ($h_1 \dots h_5$)

Spaltensumme = Summe der Abflussreaktionen in einem Zeitintervall

Schritt 4: Plot der Direktabflussganglinie**Schritt 5: Ergebnis-Kontrolle**

- *Zur Kontrolle ist es sinnvoll, das Gesamtvolumen des Niederschlags und das Volumen des Direktabflusses zu vergleichen. Beide müssen übereinstimmen.*
- *Beide Volumina betragen im Beispiel 7200 Liter bzw. 7.2 m³.*