

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**

Beispiele für Wasserbilanzrechnungen

- Bilanz für ein Einzugsgebiet
- Bilanz für ein Standgewässer
- Wasserbilanz im Boden

- **Grundlage aller Wasserbilanzrechnungen ist das Prinzip von der Erhaltung der Masse.**

„Fließt Wasser aus einem System (= abgrenzbarer Ausschnitt der Realität; z.B. Flasche, See, Einzugsgebiet ...) ab, dann nimmt entweder die im System gespeicherte Wassermenge ab oder/und sie wird durch zufließendes Wasser ersetzt.“

- **Es gibt keine Formeln zu lernen! Es ist lediglich die allgemeine Gleichung für die jeweilige Aufgabe anzupassen:**

$$\sum_{i=1}^m \text{Zufluss}_i - \sum_{j=1}^n \text{Abfluss}_j - \sum_{k=1}^p \Delta S_k = 0$$

S: in den Speichern des Systems gespeicherte Wassermengen

Beliebte Fehlerquellen:

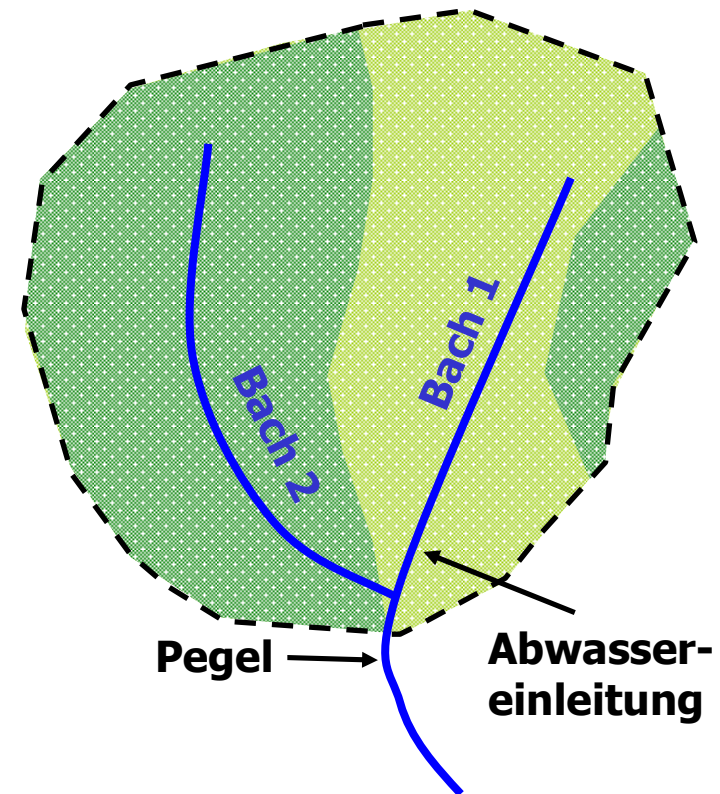
- **„Vermischen“ unterschiedlicher Einheiten**
- **Vergessen von Termen**
- **Vorzeichenfehler:**
 - Zu- und Abflüsse sind hier als Betrag (+) anzugeben
 - $\Delta S > 0$ bei Speicherfüllung, $\Delta S < 0$ bei Speicherentleerung
 - allg. Rechenregel bei Klammern: $a - (b+c) = a - b - c$

Gegebene Informationen:

- Einzugsgebiet von 124 km² Größe, davon 82 km² Wald, restliche Fläche in landwirtschaftlicher Nutzung
- langjähr. mittlerer Niederschlag: 815 mm/a
- langjähr. mittlere Verdunstung: 600 mm/a (Wald), 460 mm/a (Landwirtschaft)
- mittlerer Durchfluss (MQ) am Pegel: 1.52 m³/s

Fragen:

1. Welche Menge Abwasser in m³/s wird im Mittel in „Bach 1“ eingeleitet?
2. Nehmen wir an, der Gebietsniederschlag ist mit einem Fehler von $\pm 20\%$ behaftet. Welche Auswirkung hat das auf die geschätzte mittlere Abwassereinleitung?
3. Welche natürliche Abflussspende [$l\ s^{-1}\ km^{-2}$] besitzt das Einzugsgebiet?



Teilfrage 1:**1. Auflisten der Terme der Bilanzgleichung:**

Zuflüsse: Niederschlag, Abwassereinleitung

Abflüsse: Verdunstung, Gebietsabfluss

Speicher: keine

2. Formulierung der Bilanzgleichung:

$$\text{Niederschlag} + \text{Abwassereinleitung} - \text{Verdunstung} - \text{Gebietsabfluss} = 0$$

3. Festlegen von Basiseinheit: z.B. m^3/s (wie die gesuchte Größe)**4. Berechnen aller bekannten Terme in der Basiseinheit:**

$$\text{Niederschlag} [\text{m}^3/\text{s}] = 815 \frac{\text{mm}}{\text{a}} * 0.001 \frac{\text{m}}{\text{mm}} * \frac{1}{365 * 86400} \frac{\text{a}}{\text{s}} * 124 \text{ km}^2 * 10^6 \frac{\text{m}^2}{\text{km}^2} = 3.205 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\text{Verdunstung} [\text{m}^3/\text{s}] = \left(600 \frac{\text{mm}}{\text{a}} * \frac{82 \text{ km}^2}{124 \text{ km}^2} + 460 \frac{\text{mm}}{\text{a}} * \frac{124 - 82 \text{ km}^2}{124 \text{ km}^2} \right) *$$

$$0.001 \frac{\text{m}}{\text{mm}} * \frac{1}{365 * 86400} \frac{\text{a}}{\text{s}} * 124 \text{ km}^2 * 10^6 \frac{\text{m}^2}{\text{km}^2} = 2.173 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

gegebene Größen

Einheitenkonvert.

5. Umstellen der Bilanzgleichung und Einsetzen:

$$\text{Abwassereinleitung} = \text{Verdunstung} + \text{Gebietsabfluss} - \text{Niederschlag}$$

$$\text{Abwassereinleitung} = 2.173 \text{ m}^3/\text{s} + 1.52 \text{ m}^3/\text{s} - 3.205 \text{ m}^3/\text{s} = 0.488 \text{ m}^3/\text{s}$$

6. Kontrolle des Ergebnisses auf Plausibilität (wichtig !):

- Ergebnis ist > 0 und hat eine sinnvolle Größenordnung
- Immerhin ca. 30% des beobachteten Abflusses am Pegel stammen aus der Abwassereinleitung

Teilfrage 2: Q_{Abw} bei Unter-/Überschätzung des Niederschlags um 20%

Bei Überschätzung: $Q_{Abw} = 2.173 + 1.52 - 3.205 * 1.2 = -0.153 \text{ m}^3/\text{s}$

Bei Unterschätzung: $Q_{Abw} = 2.173 + 1.52 - 3.205 * 0.8 = 1.129 \text{ m}^3/\text{s}$

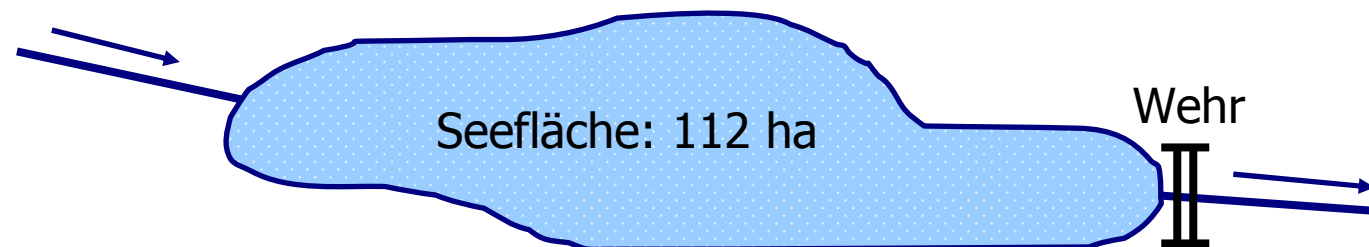
→ Der potentielle Fehler ist groß, wenn eine Größe als Restglied der Wasserbilanz berechnet wird! Fehler aller Terme addieren sich.

Teilfrage 3: Natürliche Abflusspende des Einzugsgebiets

$$(1.52 - 0.488) \text{ m}^3/\text{s} * 1000 \text{ l/m}^3 / 124 \text{ km}^2 = 8.3 \text{ l/s/km}^2$$

Gegebene Daten eines 6-monatigen Gewässermonitorings:

- Zufluss: $3.715632 \cdot 10^8 \text{ m}^3$, Abfluss: $3.5891424 \cdot 10^8 \text{ m}^3$
- gemessener Niederschlag: 462 mm, gemessene Verdunstung: 510 mm
- Wasserstands des Sees zu Beobachtungsbeginn: 24.43 müNN
- Wasserstands am Oberpegel des Wehrs zu Beobachtungsende: 170 cm am Pegel
- Pegelnullpunkt: 22.81 müNN

**Fragen:**

1. Wird der See durch einen Zufluss von Grundwasser gespeist oder umgekehrt?
2. Mit Hilfe welcher Methoden / Daten könnte man obige Frage beantworten, wenn Messungen des Zu- und Abflusses nicht vorliegen?
3. Welche Methoden würden sich für die kontinuierliche Messung des Durchflusses im Zufluss bzw. Abfluss des Sees eignen?

Teilfrage 1:**1. Auflisten der Terme der Bilanzgleichung:**

Zuflüsse: Niederschlag "P", Zuflussvolumen " V_{zu} ", Zufließendes GW-Vol. " V_{GW} "

Verluste: Verdunstung "ET", Abflussvolumen " V_{ab} "

Speicher: Änderung des Wasserstands (Staulamelle) " ΔV_{See} "

Man hätte V_{GW} genauso gut als Verlustterm anführen können, weil ja noch unbekannt ist, ob das Grundwasser den See speist oder der See das Grundwasser.

2. Formulierung der Bilanzgleichung:

$$P + V_{zu} + V_{GW} - ET - V_{ab} - \Delta V_{See} = 0$$

3. Festlegen von Basiseinheit: z.B. m (Die Einheit m erhält man, indem alle Volumina auf die Seefläche bezogen werden.)

4. Berechnen aller bekannten Terme in der Basiseinheit:

$$V_{zu} [m] = \frac{3.715631 \cdot 10^8 \text{ m}^3}{112 \text{ ha} \cdot 10000 \frac{\text{m}^2}{\text{ha}}} = 331.752 \text{ m} \quad V_{ab} [m] = \frac{3.5891424 \cdot 10^8 \text{ m}^3}{112 \text{ ha} \cdot 10000 \frac{\text{m}^2}{\text{ha}}} = 320.459 \text{ m}$$

$$\Delta V_{See} [m] = (22.81 \text{ müNN} + 170 \text{ cm} \cdot 0.01 \frac{\text{m}}{\text{cm}} - 24.43 \text{ müNN}) = + 0.08 \text{ m} \quad P [m] = 0.462 \text{ m}$$

$$ET [m] = 0.51 \text{ m}$$

5. Umstellen der Bilanzgleichung und Einsetzen:

$$V_{GW} = ET + V_{ab} + \Delta V_{See} - P - V_{zu}$$

$$V_{GW} = 0.51 + 320.459 + 0.08 - 0.462 - 331.752 = -11.17 \text{ m}$$

- Berechnetes Volumen V_{GW} ist < 0 . Da es in der Bilanzgleichung als Zufluss angesetzt wurde, handelt es sich tatsächlich um einen Abstrom (Verlust). Das GW wird also durch exfiltrierendes Seewasser gespeist.

6. Kontrolle des Ergebnisses auf Plausibilität (wichtig !):

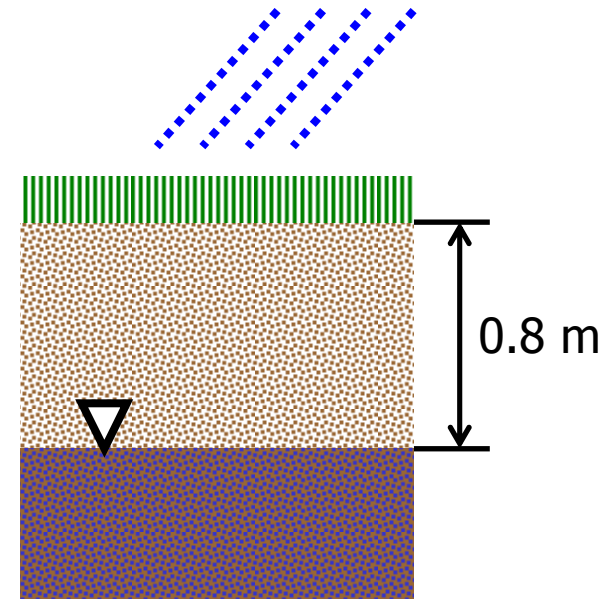
- Umrechnen des Ergebnisses in eine üblichere Einheit [m^3/s] liefert:

$$\frac{-11.17 \text{ m} * 112 \text{ ha} * 10000 \frac{\text{m}^2}{\text{ha}}}{6 \text{ mon} * 30.5 \frac{\text{d}}{\text{mon}} * 86400 \frac{\text{s}}{\text{d}}} = -0.79 \text{ m}^3 / \text{s}$$

- Die Seewasser-Versickerungsrate hat somit eine sinnvolle Größenordnung.

Gegebene Informationen

- Niederschlagshöhe eines 4-stündigen Starkregens: 60 mm
- Interzeptionsleistung der Vegetation: 2 mm
- Annahme: keine Oberflächenabflussbildung
- Verdunstung vernachlässigbar
- mittlerer Wassergehalt der ungesättigten Zone vor dem Niederschlagsereignis: 8 Vol-%
- Porosität des Sandbodens: 25 %
- Grundwasserflurabstand vor dem Regen: 0.8 m
- Annahme: Homogene Verteilung des Wassergehalts in ungesättigter Zone



Fragen

1. Welcher Grundwasserflurabstand liegt nach dem Ende des Niederschlagsereignis vor, wenn der mittlere Wassergehalt der ungesättigten Zone auf 15 Vol-% angestiegen ist?
2. Wie stark müsste die Grundwasseroberfläche ansteigen, wenn der Bodenwassergehalt unverändert bliebe?

Definition wichtiger Größen:

Bodenwassergehalt Θ

- Der volumetrische Bodenwassergehalt ist definiert als Quotient von Wasservolumen V_W und dem Bodenvolumen V_B , welches das Wasser enthält: $\Theta = V_W / V_B$
- Üblicherweise wird Θ in Volumen-% ($\Theta = 100 * V_W / V_B$) angegeben, für Rechnungen verwendet man aber direkt den dimensionslosen Quotienten

Porosität n

- Die Porosität ist definiert als Quotient von Porenvolumen V_P und Bodenvolumen V_B ,
 $n = V_P / V_B$
- Auch die Porosität wird oft in Volumen-% angegeben, für Rechnungen verwendet man den dimensionslosen Quotienten
- Der maximal mögliche Bodenwassergehalt entspricht theoretisch der Porosität (Wassersättigung des Porenraumes). Praktisch enthält der Boden aber auch bei Sättigung noch ein geringes (hier bei Rechnungen vernachlässigtes) Luftvolumen.
- Das freie (luftgefüllte) Porenvolumen ergibt sich aus $V_P - V_W = (n - \Theta) * V_B$

Teilfrage 1:**1. Auflisten der Terme der Bilanzgleichung:**

Zuflüsse: Niederschlag "P"

Verluste: Interzeption "I" (*könnte man auch als Speicher auffassen*)

Speicher: Wasserspeicherung im Boden durch Änderung des Bodenwassergehalts der ungesättigten Zone " S_B ",
Wasserspeicherung durch Änderung des Grundwasserstandes " S_G "

2. Formulierung der Bilanzgleichung:

$$P - I - S_B - S_G = 0$$

3. Festlegen von Basiseinheit: hier bietet sich die Einheit mm an

4. Nähere Betrachtung der Speicherterme:

- Das besondere der Aufgabe besteht darin, dass die beiden Speicherterme nicht unabhängig voneinander sind! Ursache: Ein Anstieg des Grundwassers führt zu einer verringerten Mächtigkeit der ungesättigten Zone, die die Auffeuchtung erfährt.
- Es ist aber anschaulich, zunächst beide Speicherterme isoliert zu betrachten:

Speicherung nur im Boden S_B :

$$S_B = \Delta\Theta * GWFA$$

- $\Delta\Theta$: Änderung des Wassergehalts der ungesättigten Zone [-]
 GWFA: Grundwasserflurabstand [mm]
 (= Mächtigkeit der Bodensäule)

Speicherung nur im Grundwasser S_G :

$$S_G = (n-\Theta) * \Delta GW$$

- n : Porosität des Bodens [-]
 Θ : Wassergehalt der ungesätt. Zone [-]
 $n-\Theta$: „auffüllbare“ Porosität zwischen Anfangswassergehalt und Sättigung.
 ΔGW : Änderung des GW-Stands [mm]

"Parallele" Speicherung im Boden und Grundwasser:

→ Mächtigkeit der ungesättigten Zone wird Funktion des Grundwasserstands

$$S_B = \Delta\Theta * (GWFA_0 - \Delta GW)$$

- $GWFA_0$: Grundwasserflurabstand vor dem Ereignis [mm]
 Θ_0 : mittl. Wassergehalt der ungesättigten Zone vor dem Ereignis [-]

$$S_G = (n-\Theta_0) * \Delta GW$$

- Der Term $(GWFA_0 - \Delta GW)$ beschreibt den Grundwasserflurabstand nach dem Ereignis.

5. Vollständige Bilanzgleichung:

$$P - I - \Delta\Theta * (GWFA_0 - \Delta GW) - (n - \Theta_0) * \Delta GW = 0$$

6. Berechnen aller bekannten Terme in der Basiseinheit:

- P und I liegen bereits in mm vor
- $\Delta\Theta$, Θ_0 und n bleiben dimensionslose Verhältniszahlen [% / 100]
- $GWFA_0$ [mm] = 800 mm

7. Umstellen und Einsetzen in Bilanzgleichung:

$$\Delta GW = (P - I - \Delta\Theta * GWFA_0) / (n - \Theta_0 - \Delta\Theta)$$

$$P - I = 58 \text{ mm,}$$

$$\Delta\Theta = 0.15 - 0.08 = 0.07,$$

$$GWFA_0 = 800 \text{ mm,}$$

$$n = 0.25,$$

$$\Theta_0 = 0.08$$

Für den Grundwasserstand ergibt sich eine Änderung von $\Delta GW = + 20 \text{ mm.}$

8. Kontrolle des Ergebnisses auf Plausibilität (wichtig !):

- Ergebnis mit positivem Vorzeichen bedeutet eine Zunahme der Speicherfüllung, also einen Anstieg des Grundwassers, wie es bei einem Niederschlag zu erwarten wäre.
- Größenordnung erscheint nicht ungewöhnlich.

Teilfrage 2:

Würde sich der mittlere Bodenwassergehalt der ungesättigten Zone nicht ändern, und stattdessen der gesamte Niederschlag unmittelbar zur Grundwasserbildung beitragen, bliebe nur der Speicherterm S_G übrig.

Vereinfachte Bilanzgleichung:

$$P - I - (n - \Theta_0) * \Delta GW = 0$$

Umstellen und Einsetzen in Bilanzgleichung:

$$\Delta GW = (P - I) / (n - \Theta_0)$$

$$\Delta GW = (60 \text{ mm} - 58 \text{ mm}) / (0.25 - 0.08) = 341 \text{ mm}$$

Das Ergebnis wäre ein Grundwasseranstieg um **341 mm** oder 34.1 cm.