



## Kreislaufkomponente Verdunstung

Langsamer Übergang des flüssigen Wassers in den gasförmigen Aggregatzustand unterhalb des Siedepunktes.

### Einflussfaktoren:

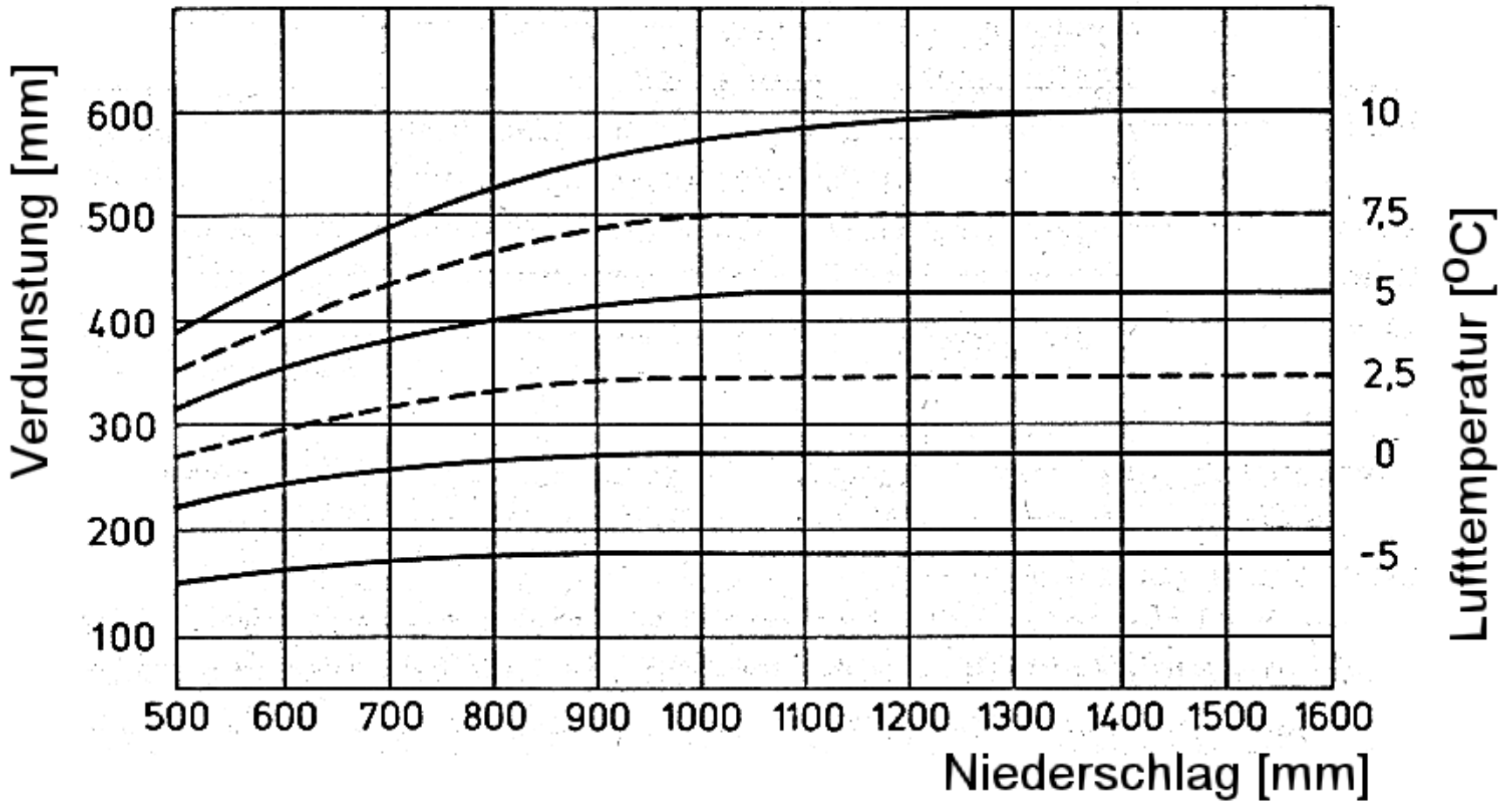
- aktuelles Sättigungsdampfdefizit, vergl. sog. Taupunktkurve
- Globalstrahlung (direkt auftreffendes Sonnenlicht)
- Windgeschwindigkeit (Abtransport d. feuchten Luft)

Ortsverdunstung

- Gebietsverdunstung

punktuell gemessen

flächenbezogener Mittelwert



$$\text{Verdunstung } h_V = f(t, h_N)$$



## Verdunstungsarten:

- Bodenverdunstung von *vegetationsfreien* Landflächen = Evaporation ( $E_b$ ).
- Seeverdunstung von der freien Wasseroberfläche ( $E_w$ ).
- Interzeptionsverdunstung des abgefangenen Niederschlages von der feuchten Pflanzenoberfläche ( $E_i$ ).
- Pflanzenverdunstung (produktiv) = Transpiration ( $E_t$ ).
  
- *Landverdunstung* (aktuell) von vegetationsbedeckten Flächen  
 $E_L = \text{Evapotranspiration} = E_b + E_i + E_t$ .
  
- *Gebietsverdunstung* (aktuell)  
 $E = E_L + E_w = E_b + E_i + E_t + E_w$ .
  
- Potentielle Verdunstung  $E_p$   
Unter gegebenen meteorologischen Bedingungen maximal mögliche Gebietsverdunstung  $E_L + E_w$ .



## Verdunstungsanteile in Mitteleuropa:

Landverdunstung ( $E_L$ ):  $E_b$  :  $E_i$  :  $E_t$  in %

Wald 10 : 30 : 60

Grünland 25 : 25 : 50

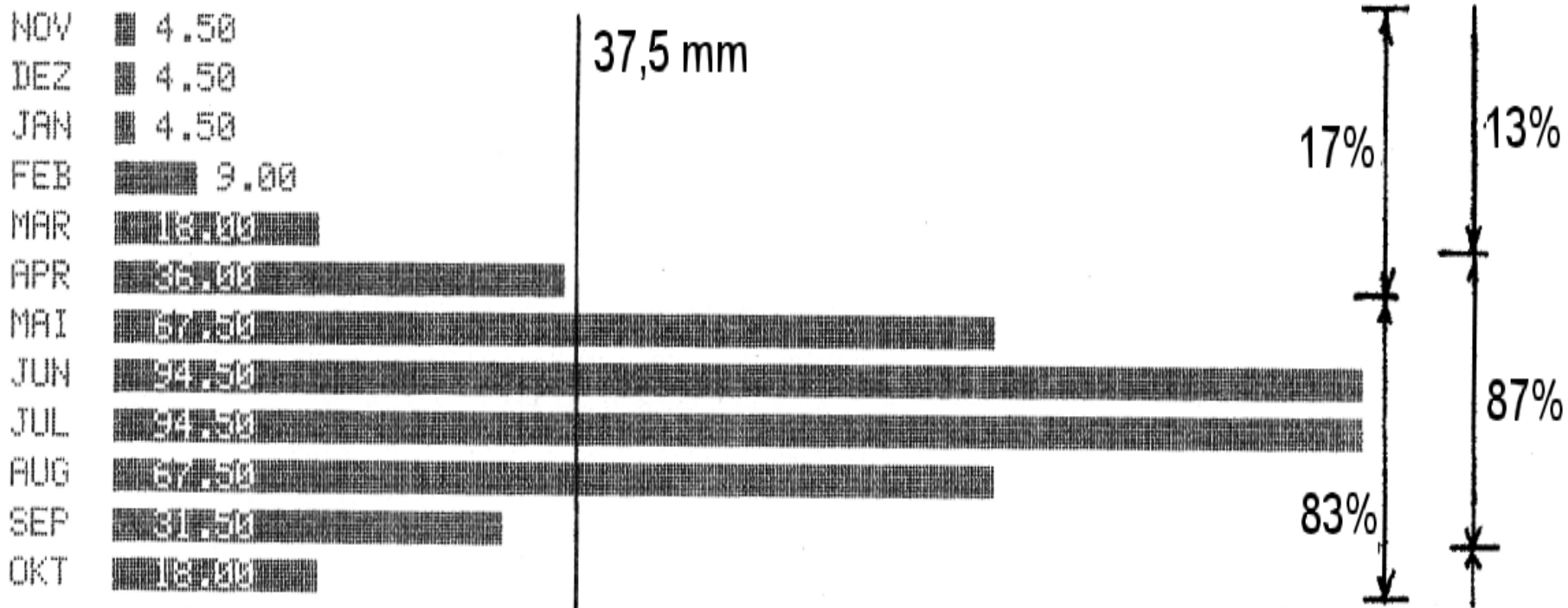
Ackerland 45 : 15 : 40

Seeverdunstung:  $E_w$  800  $\leq h_v \leq$  1000 mm/a

Sommer : 74%

Winter : 26%

Schneeverdunstung (=Sublimation): max. rd. 0,5 mm/d



Mittlere jährliche Gebietsverdunstung  
(alte BRD) 400 - 500 mm



Ermittlung der Verdunstungshöhe aus der Wasserbilanz:  
Aktuelle Gebietsverdunstung bezogen auf  $A_E$  während eines definierten Bilanzzeitraumes.

$$h_{Ve} = h_{Nm} - h_A - (h_S) \quad \text{in mm}$$

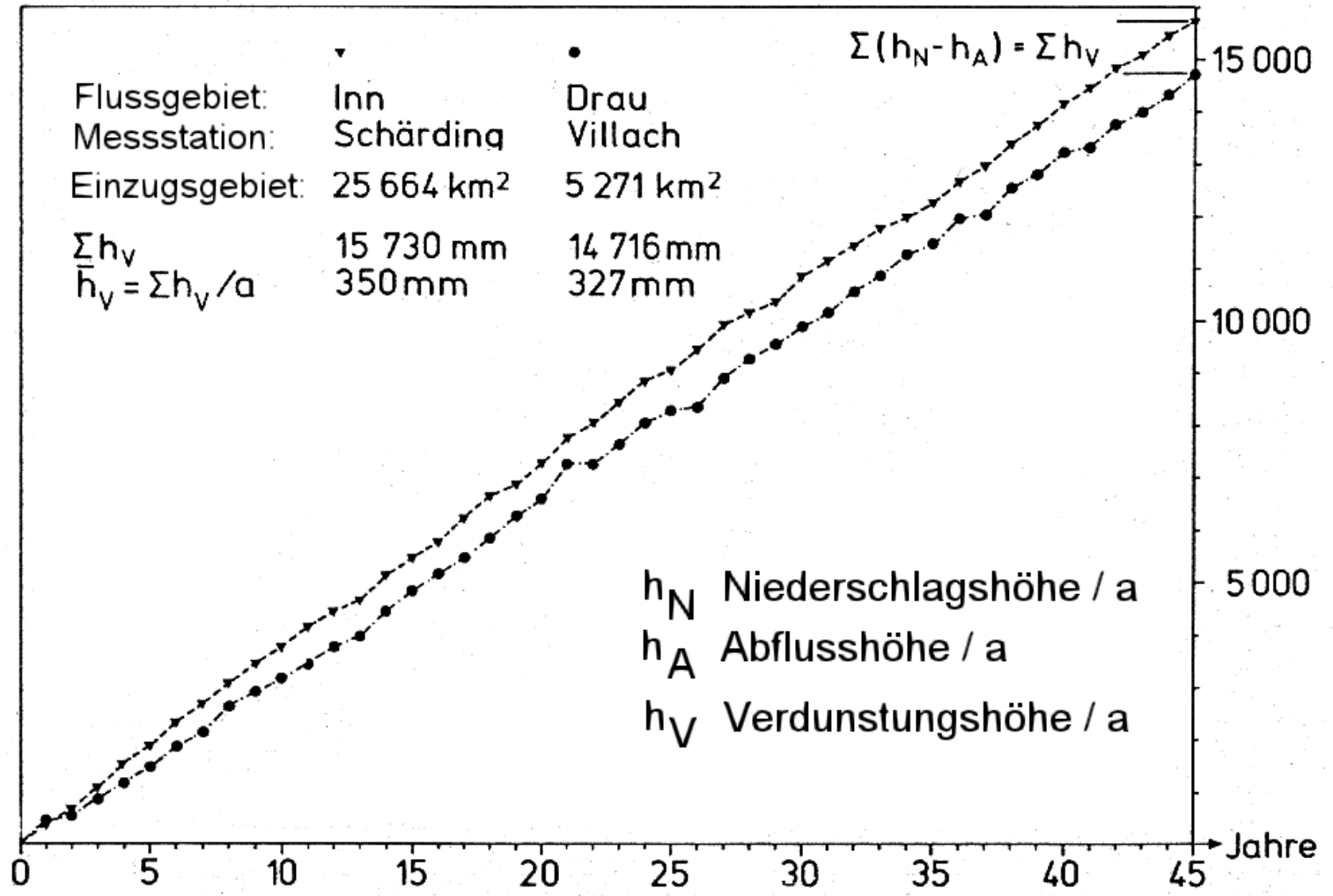
mit

$h_{Nm}$  = mittlere Niederschlagshöhe

$h_A$  = Abflusshöhe

$h_S$  = Rücklageänderung

Beispiel:





Potentielle Gebietsverdunstung  $h_{vp}$   
nach TURC (Evapotranspiration)

$$h_{vp} = (a + b \cdot ts) \cdot ta \cdot n / (ta + 15) \text{ in mm}$$

mit a, b = jahreszeitl. u. geograph. abhängige Konstanten  
(vergl. Dyck, S. (1978))

n  $\geq$  5 Tage = Berechnungszeitraum

ts = mittl. Sonnenscheindauer in h/d

ta = mittl. Lufttemperatur in °C

Potentielle Seeverdunstung von der freien Wasseroberfläche  
nach Baumann, Schendel, Mann

$$h_{v,w} = 0,6 \cdot \sqrt{0,3 + v} \cdot (e_w - e) \text{ in mm}$$

v = Windgeschwindigkeit in m/s in 2m Höhe als Tagesmittel

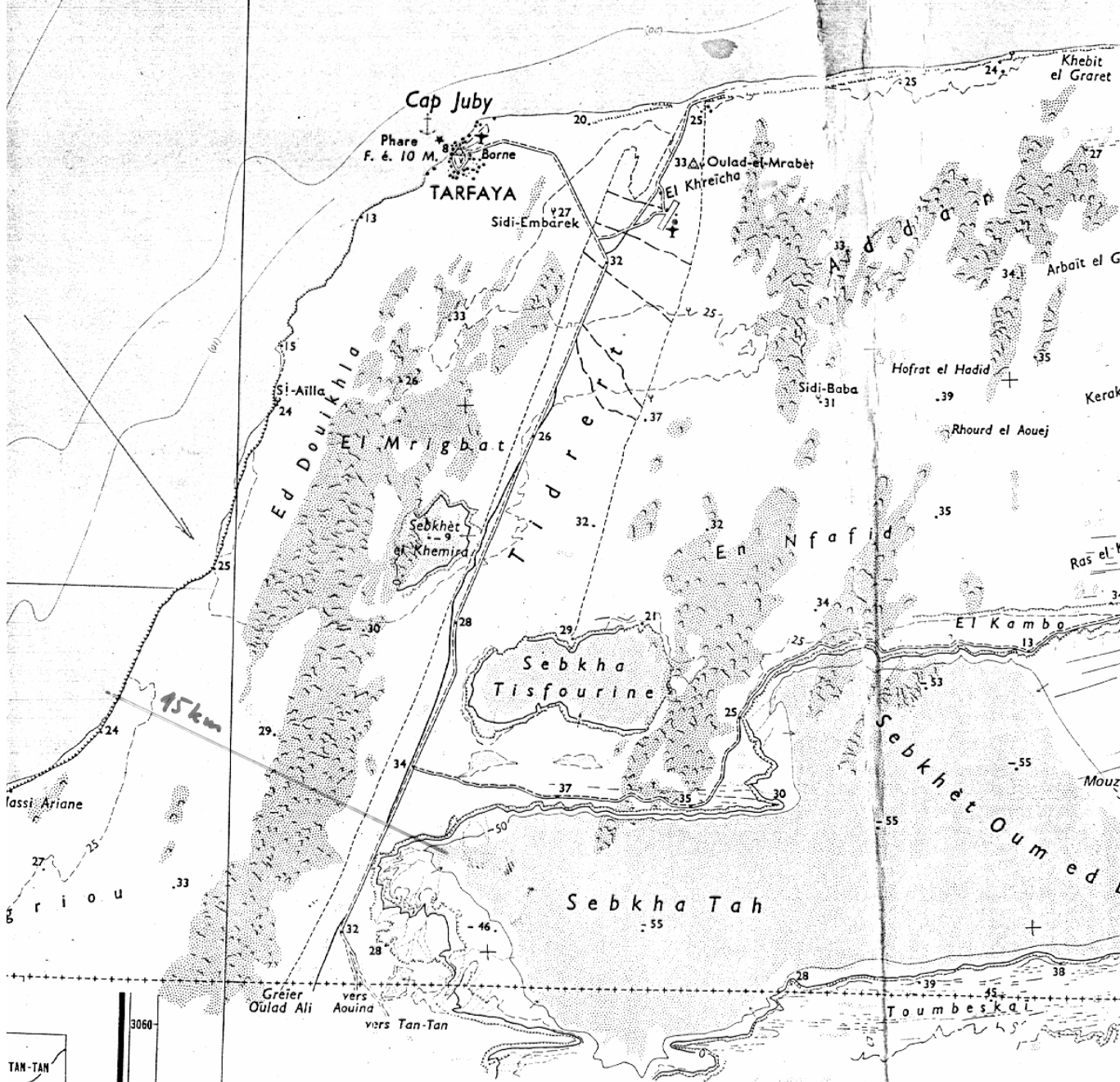
$(e_w - e)$  = Sättigungsdampfdefizit --> Taupunktkurve

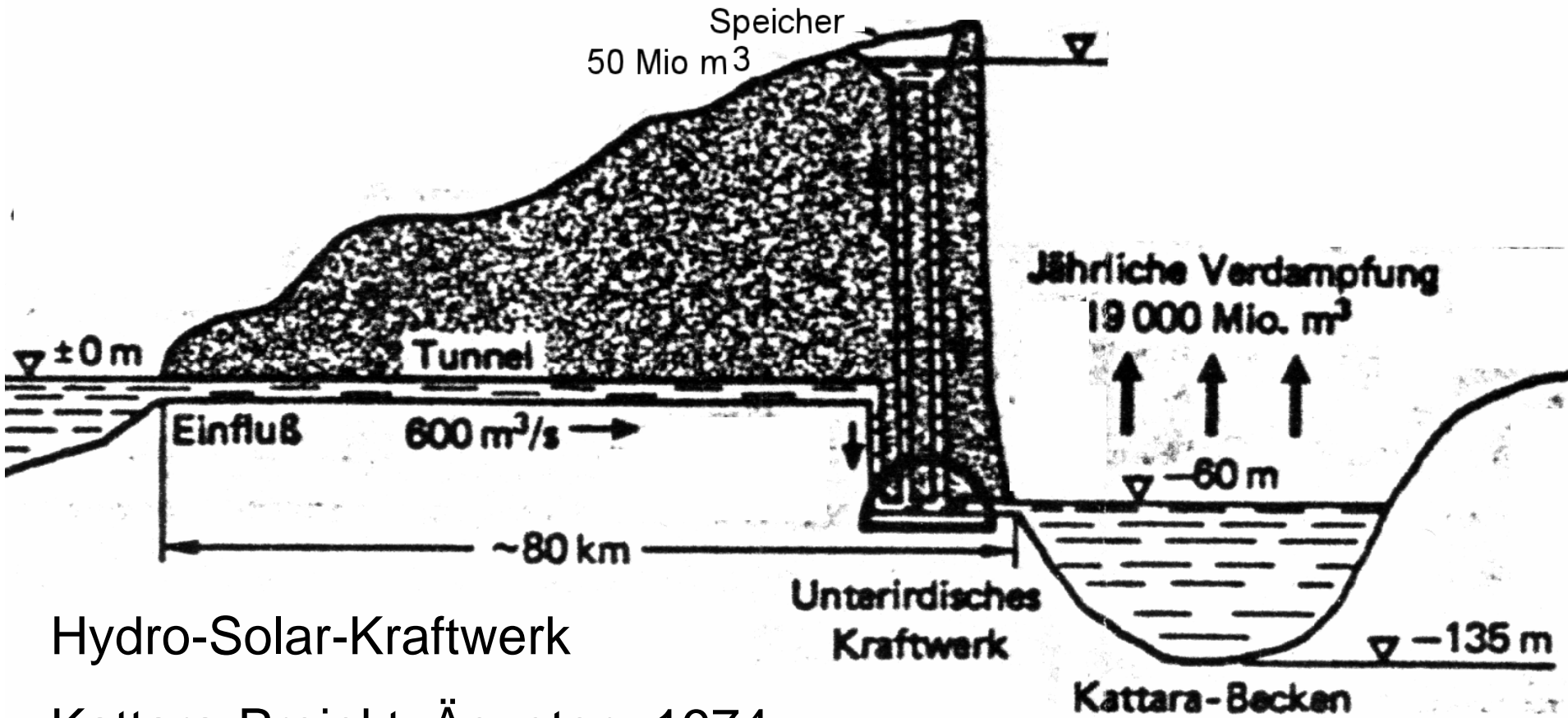




# Geplante Hydro-Solar- Wasserkraft- anlage SEBKAH-TAH, Marokko.

Potentielle Ver-  
dunstung von  
der freien Was-  
seroberfläche  
wichtige Be-  
messungs-  
grundlage:  
 $h_{vW} = 1500\text{mm.}$





## Hydro-Solar-Kraftwerk

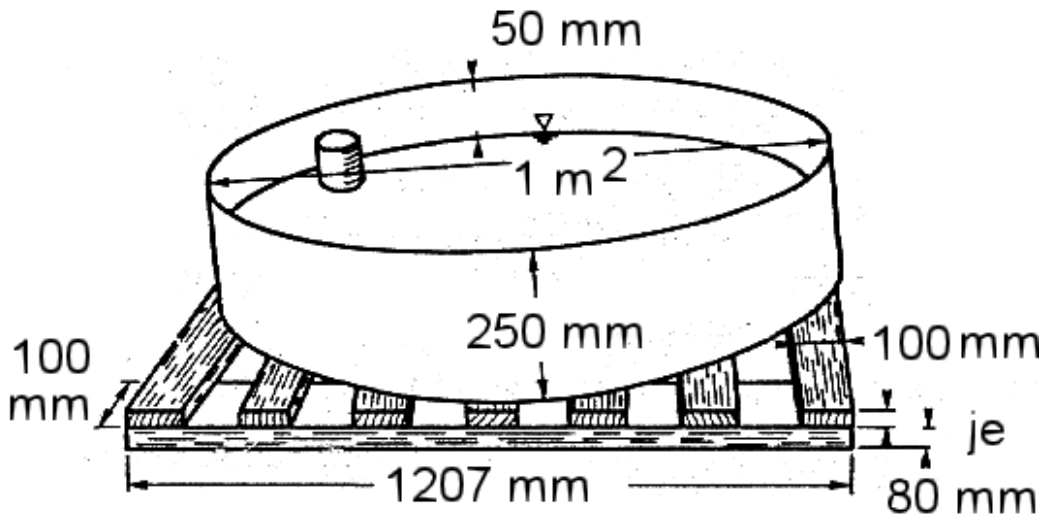
Kattara-Projekt, Ägypten, 1974

(unterlegen im Wettbewerb mit dem Assuan-Staudamm)

Entfernung bis Kairo 200 < 800 km

P = 2.400 (1984) bis 10.000 MW (2000) (Totes Meer rd. -400m)

# Verdunstungsmessung



Verdunstungskessel für den Verdunstungsanteil von der freien Wasseroberfläche  $E_W$ . Dargestellt sind die Abmessungen wie sie in den USA und in Europa üblich sind. In Russland auch Kessel mit 20m<sup>2</sup> Oberfläche und 2m Tiefe.

Die Verdunstungshöhe für einen Zeitraum  $\Delta t$  ergibt sich aus der gemessenen Wasserspiegeländerung, die (besser) mit einem Spitzentaster gemessen wird, unter Berücksichtigung der gleichzeitig mit einem Niederschlagsmesser aufgezeichneten Niederschlagshöhe.



Laboranordnung  
definierter Klimabe-  
dingungen:

Verdunstungsmes-  
sung bei simulier-  
ten Windverhält-  
nissen (Wind-  
stärke und  
Windrichtung).



Gebietsverdunstung  $h_{Ve}$  als Funktion von  $h_{VW}$  :

Da die Verdunstung von der freien Wasseroberfläche örtlich leicht messbar, kann ggf. eine einfache Übertragungsfunktion verwendet werden:

$$h_{Ve} = c \cdot h_{VW} \quad \text{mit} \quad 0,6 \leq c \leq 0,8$$

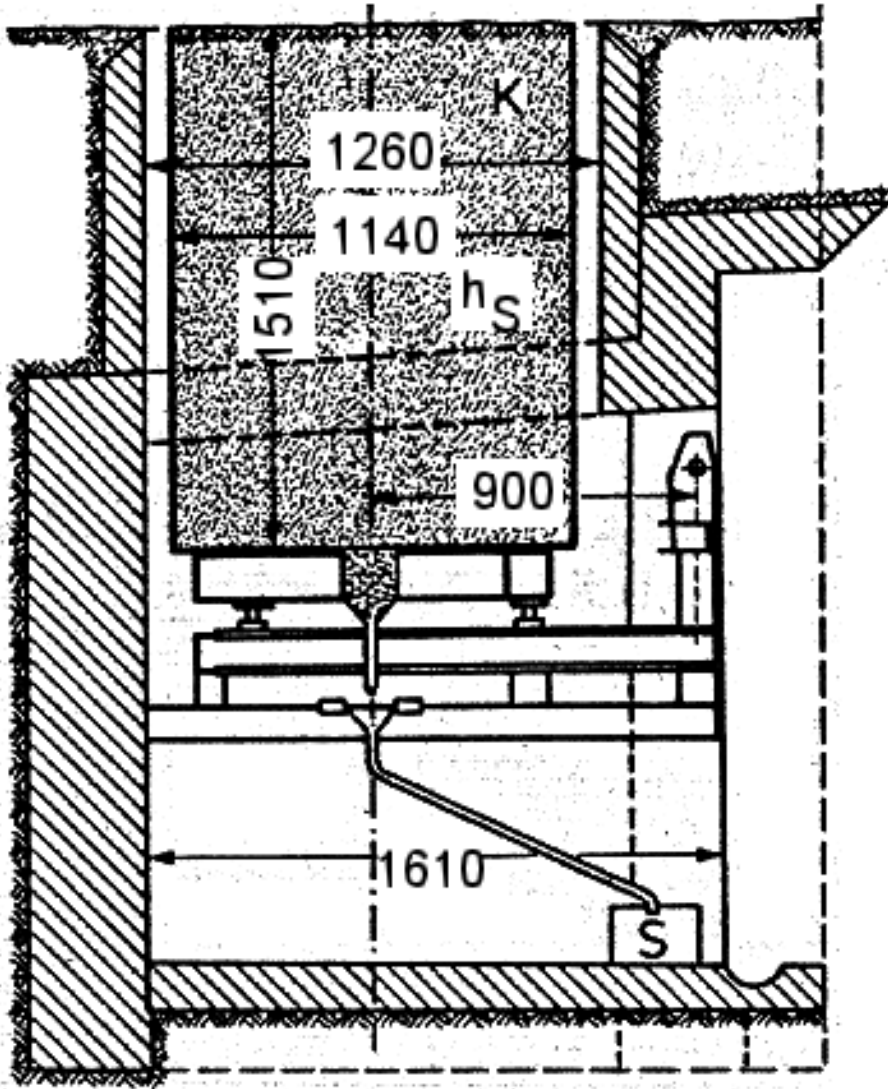
Mitteleuropa:

| Monat        | c   |
|--------------|-----|
| Nov.- Feb.   | 0,6 |
| März - April | 0,7 |
| Mai - Aug.   | 0,8 |
| Sept. - Okt. | 0,7 |

Jedoch n. Herrmann für tägliche Werte:  $0,7 \leq \frac{h_{Vp}}{h_{VW}} \leq 1,0$



$$A \geq 1m^2$$



## Lysimeter

zusammen mit Niederschlagsmesser zur Messung der *aktuellen* und potentiellen Landverdunstung.

Bewachsener Boden auf einer Waage ins Erdreich eingelassen.

Bilanz pro 24h aus:

- ausgesickertem Wasser  $h_{Au}$
- Niederschlagswasser  $h_N$
- Bodenwasservorratsänderung (durch Wägung)  $h_S$  .

$$h_{Ve} = h_N - h_{Au} - h_S$$

2 Beispiele: Station Senne (Ems)  
(Messzeitraum: 24h)

$$h_{Ve} = h_N - h_{Au} - h_S$$



26.04.1985  
t = 5,3°C

01.05.1985  
t = 8,1°C

| $h_N$ [mm] | $h_{Au}$ [mm] | $h_S$ [mm] | $h_V$ [mm] | Bemerkung |
|------------|---------------|------------|------------|-----------|
| 1          | 1,8           | -1,5       | 0,7        | Abgabe    |
| 3          | 1,2           | 2          | -0,2       | Aufnahme  |

Anmerkungen: Zu Beginn des Messzeitraumes kann mehr oder weniger Wasser im Bodenkörper gespeichert sein. Auch wenn kein Niederschlag fällt, kann noch Wasser aussickern und umgekehrt ergibt sich *rechnerisch* eine negative Verdunstung, wenn der Bodenkörper anfänglich sehr trocken war. Nur über größere Bilanzzeiträume werden verlässliche Verdunstungswerte ermittelt.

$$h_{Ve} = h_N - h_{Au}$$



Für tägliche Messungen kann die Bilanzgleichung abhängig von der Größe  $h_S$  auch negative Verdunstungswerte liefern. Je größer der Bilanzzeitraum, desto eher muss sich  $h_S$  eliminieren. Tageswerte der Einzelkomponenten werden über längeren Bilanzzeitraum aufaddiert, so dass

$$h_N \approx h_V + h_{Au}$$

Lysimeter-Messungen alte BRD in mm:

| Art      | Winter    | Sommer    | Jahr      |
|----------|-----------|-----------|-----------|
| $h_{Ve}$ | 050 - 100 | 350 - 400 | 400 - 500 |
| $h_{Vp}$ | 110 - 160 | 440 - 540 | 550 - 700 |

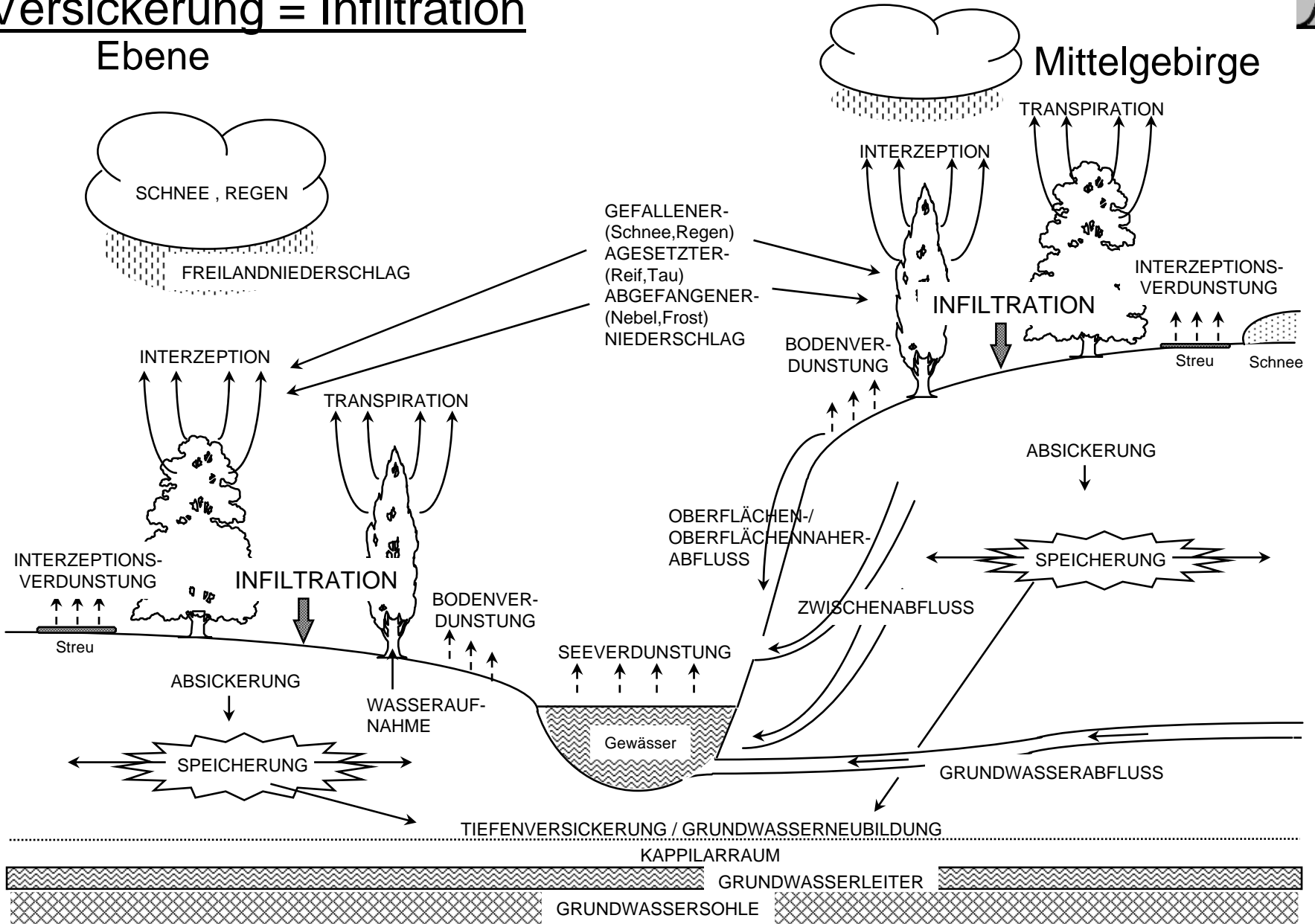




# Versickerung = Infiltration

Ebene

Mittelgebirge





Die Infiltration stellt insgesamt eine Dämpfungs- und Speicherkomponente im Wasserkreislauf dar.

Kennzeichen:

- Verzögerung des letztlich auch zum Abfluss gelangenden Niederschlagswassers
- Lieferung der für Vegetation erforderlichen Bodenfeuchte
- Aufstockung des Grundwassers.

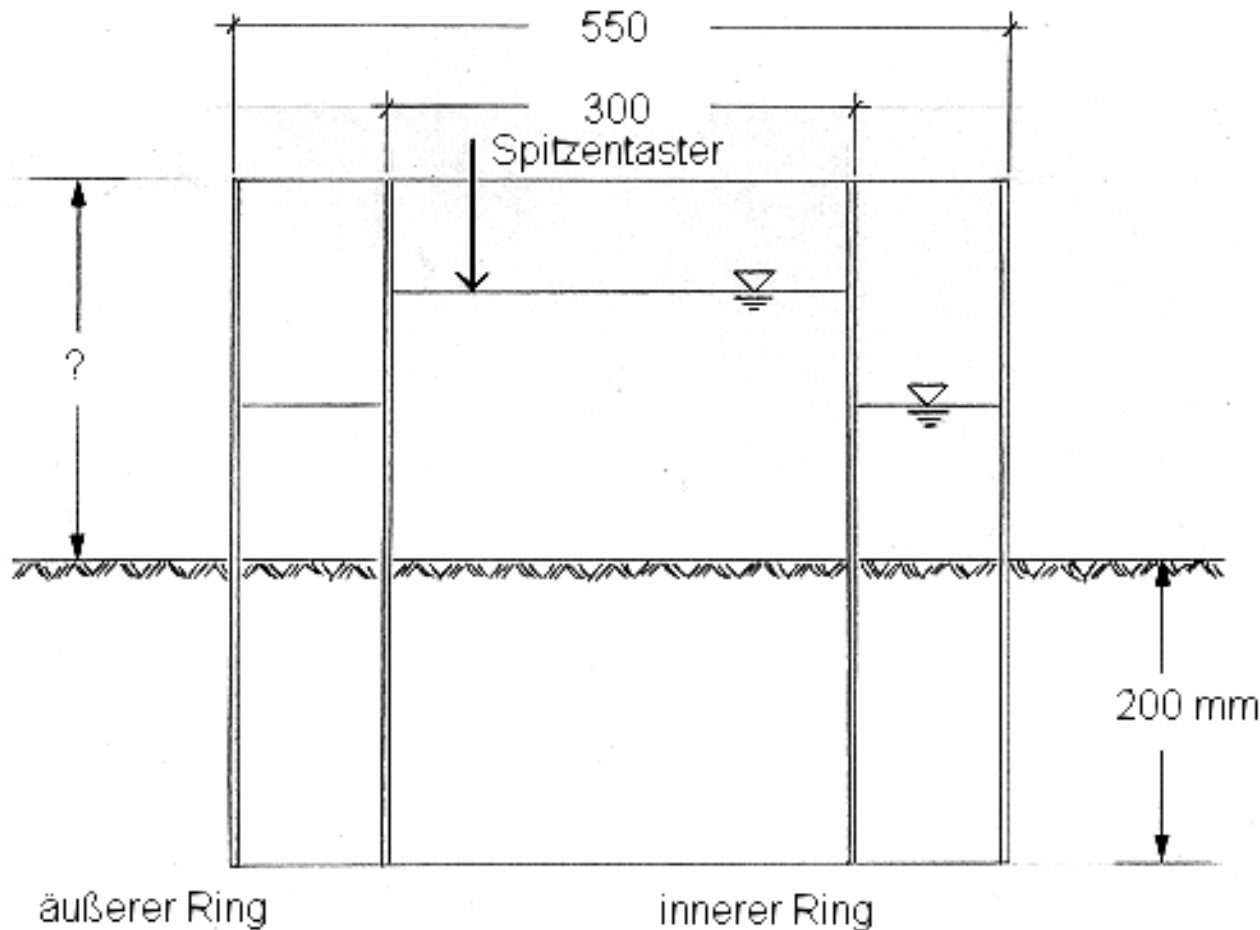
Einflussgrößen:

- Niederschlag (Intensität, Dauer, örtl. Verteilung)
- Bodenart (Gestalt: Verteilung der Hohlräume)
- Vorhandene Bodenfeuchte

Messgröße: Infiltrationsrate  $i_s$  in mm/h.



## Doppelring - Infiltrometer = 2 konzentrische Blechringe



Beide Räume gleichzeitig mit Wasser aufgefüllt.  
Messung mit Spizentaster nur im inneren Ring.  
Es wird die sog. Infiltrationsrate  $i_s$  in mm/h gemessen.



Naturmessungen:

Bedeutung für

a) Wasserhaushalt von Kanälen, vergl. Verkehrswasserbau

MLK            20mm/d

RHK            35mm/d (Bergsenkungsgebiet)

b) Speicherbecken (Talsperren), vergl. Stauanlagenbau

Nidda          50-70mm/d (Basalt-Klüfte Nähe Gießen).

Infiltrationsraten verschiedener Böden in mm/h:

|                   |           |
|-------------------|-----------|
| Lehm, Ton         | < 1       |
| ton. Schlufflehm  | 1 - 5     |
| sandiger Lehm     | 5 - 20    |
| lehmiger Sand     | 20 - 63   |
| feiner Sand       | 63 - 127  |
| grober Sand       | 127 - 254 |
| gobere Sand, Kies | > 254     |



Quelle:  
DIN 4049  
Teil 1  
Hydrologie  
Begriffe,  
quantitativ,  
Sept. 1979.  
Beuth Verlag  
GmbH  
Berlin, Köln

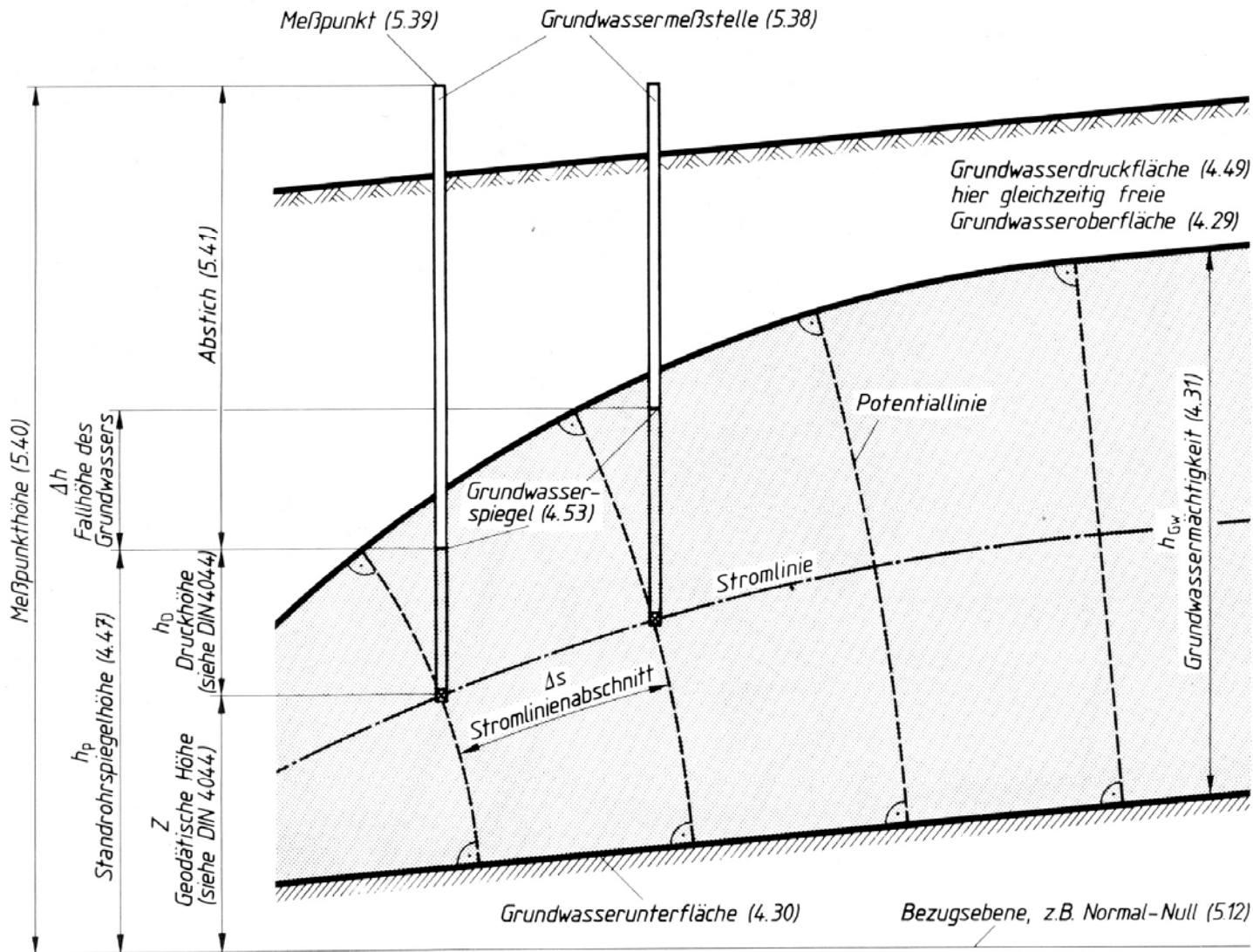
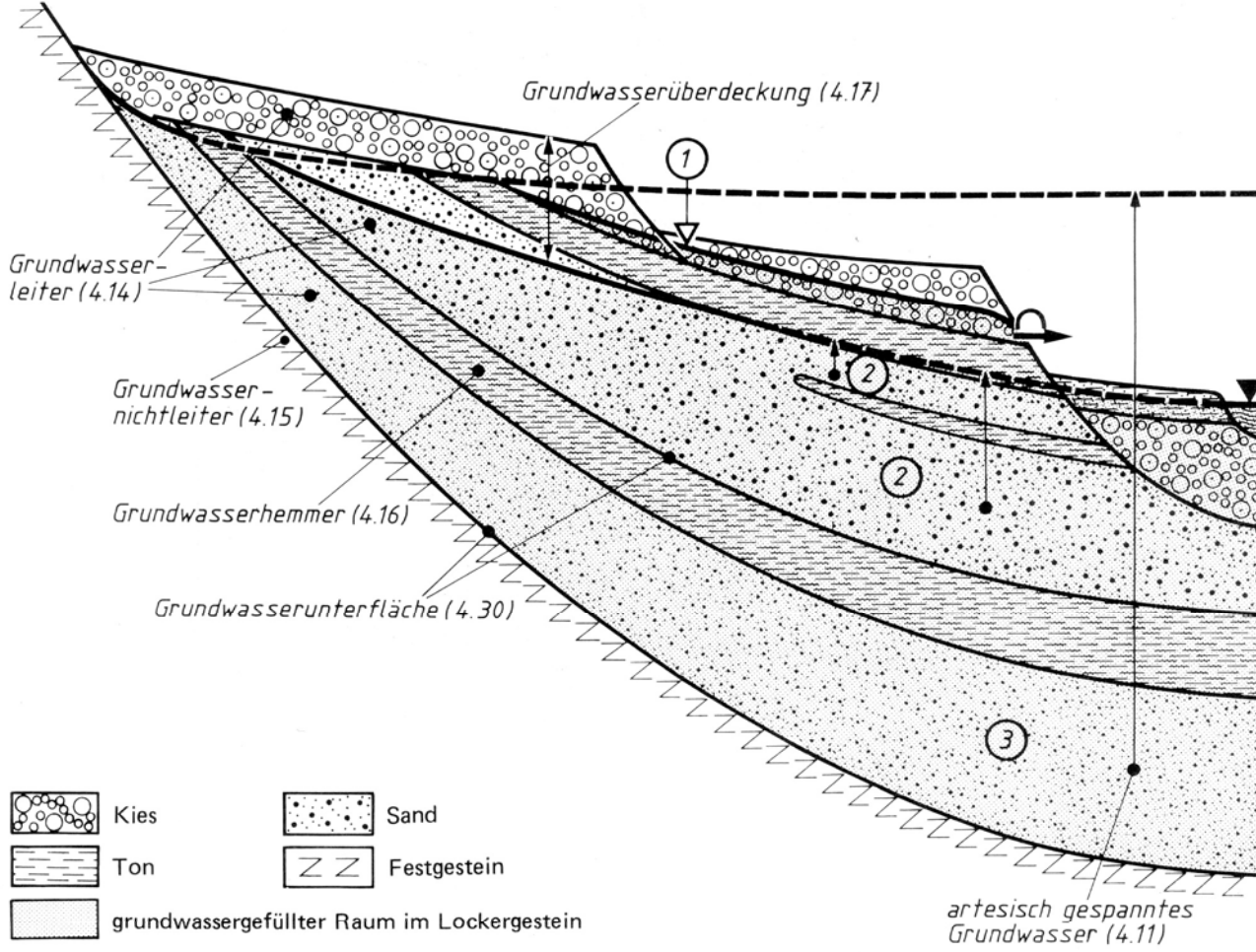


Bild 6. Grundwasserlängsschnitt (4.32) bei freiem Grundwasser (4.9)

## Grundwasserlängsschnitt bei freiem Grundwasser



Quelle:  
 DIN 4049  
 Teil 1  
 Hydrologie  
 Begriffe,  
 quantitativ,  
 Sept. 1979.  
 Beuth Verlag  
 GmbH  
 Berlin, Köln

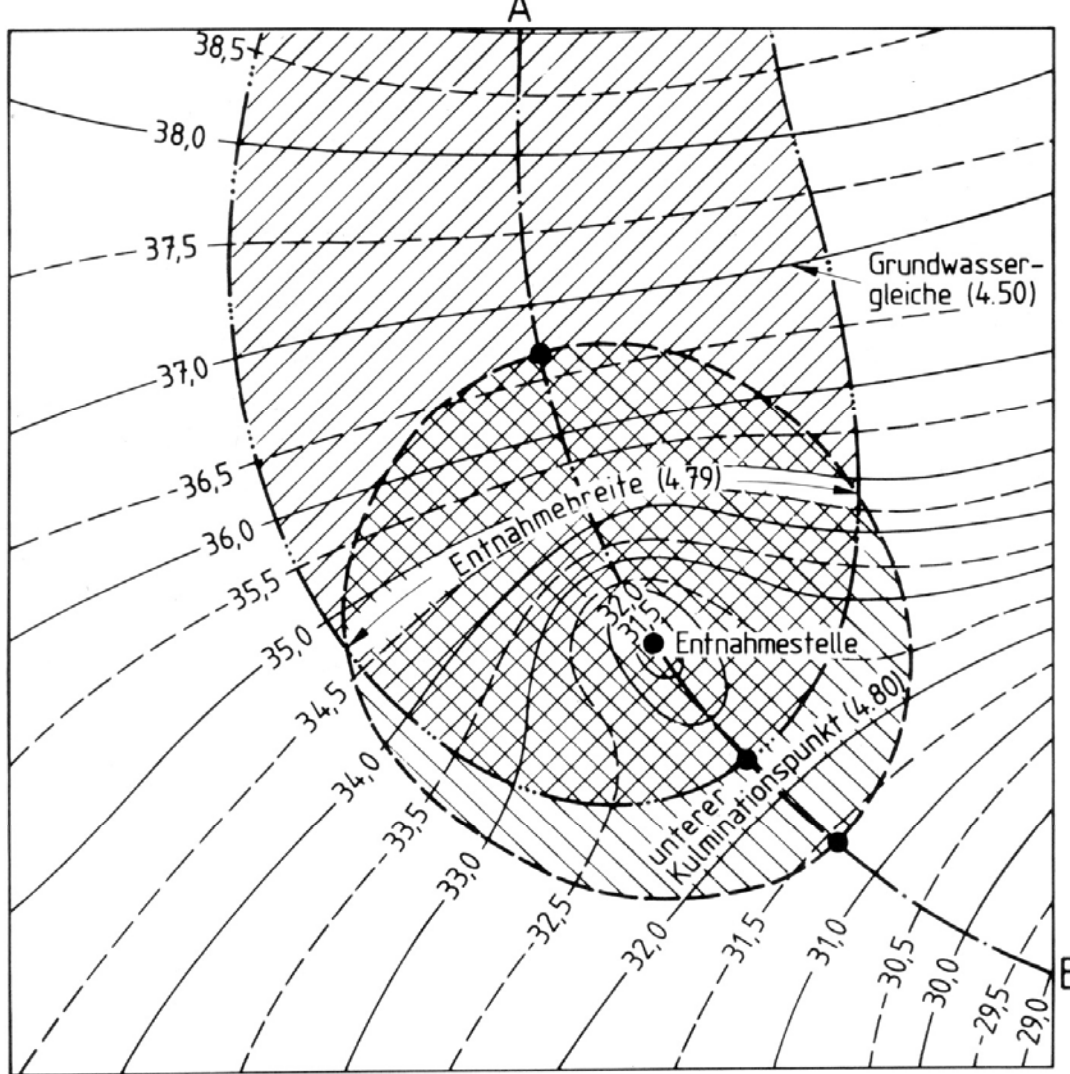


stark überhöht !

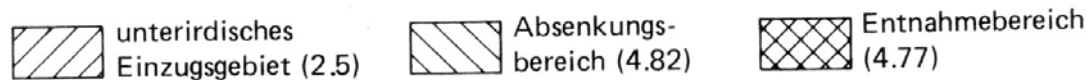
## Grundwasservorkommen im Lockergestein, schematisch.



Quelle:  
DIN 4049  
Teil 1  
Hydrologie  
Begriffe,  
quantitativ,  
Sept. 1979.  
Beuth Verlag  
GmbH  
Berlin, Köln



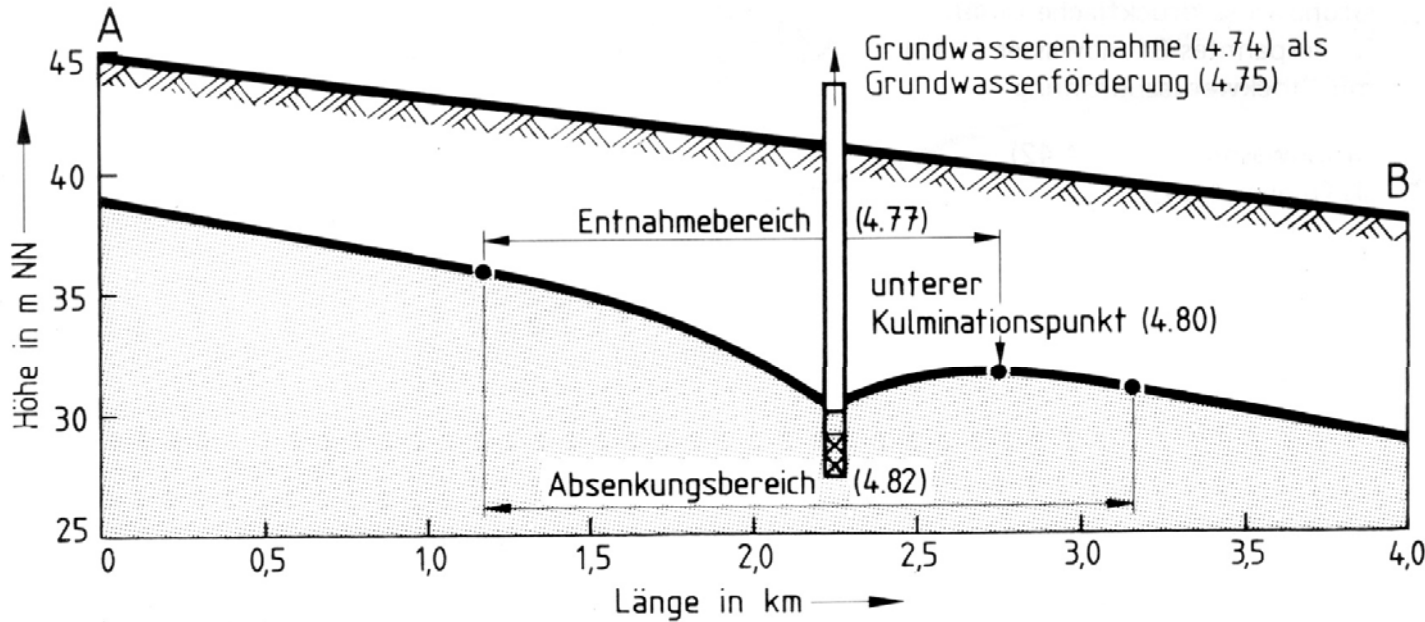
a) Plan der Grundwassergleichen (4.50)



## Grundwasserabsenkung infolge Grundwasserentnahme

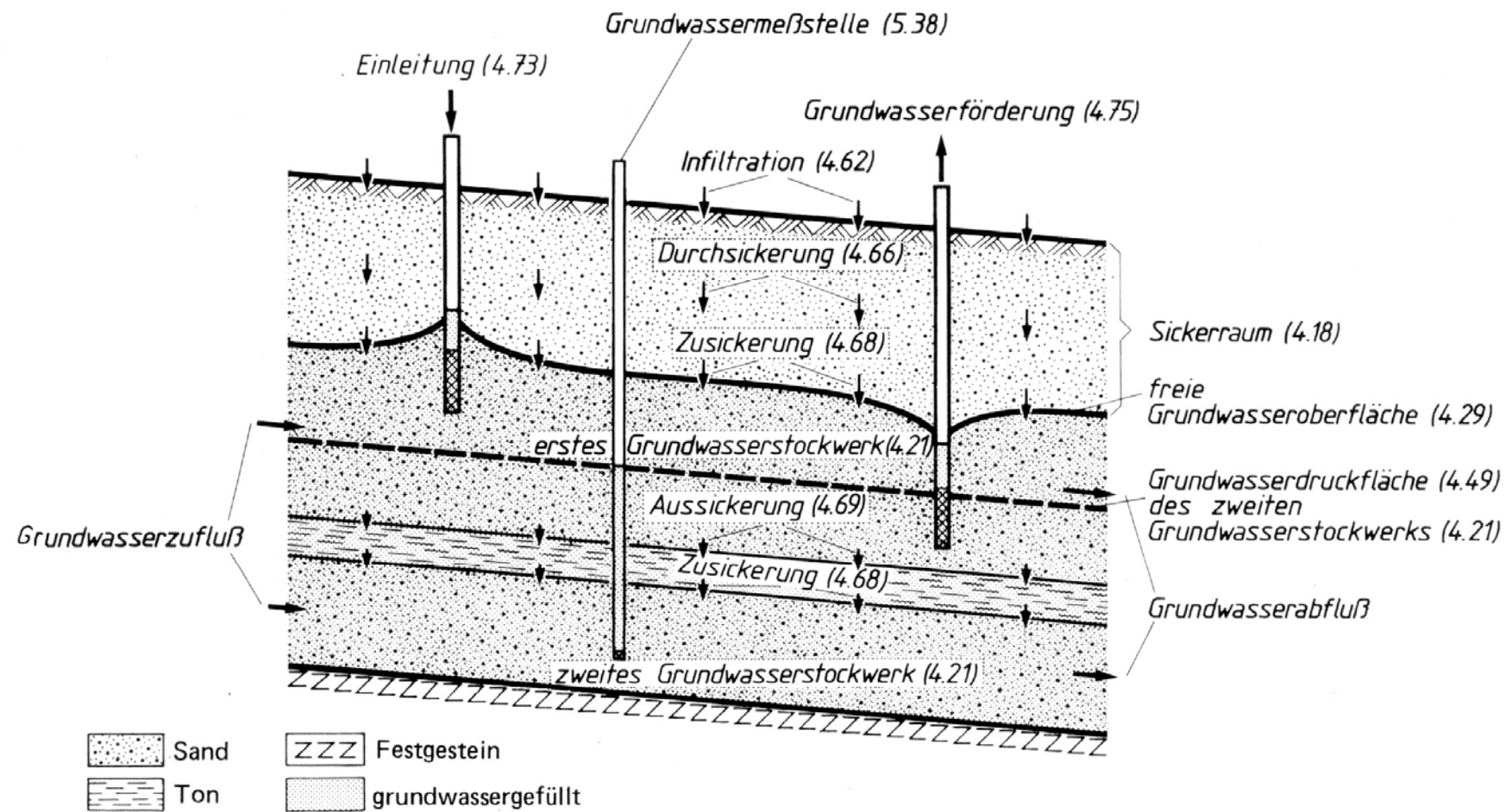


Quelle:  
DIN 4049  
Teil 1  
Hydrologie  
Begriffe,  
quantitativ,  
Sept. 1979.  
Beuth Verlag  
GmbH  
Berlin, Köln



b) Grundwasserlängsschnitt (4.32) A – B





Schema für die Aufstellung der Bilanz eines Grundwasserabschnittes.

Quelle: DIN 4049, Teil 1 Hydrologie, Begriffe, quantitativ, Sept. 1979. Beuth Verlag GmbH Berlin, Köln