

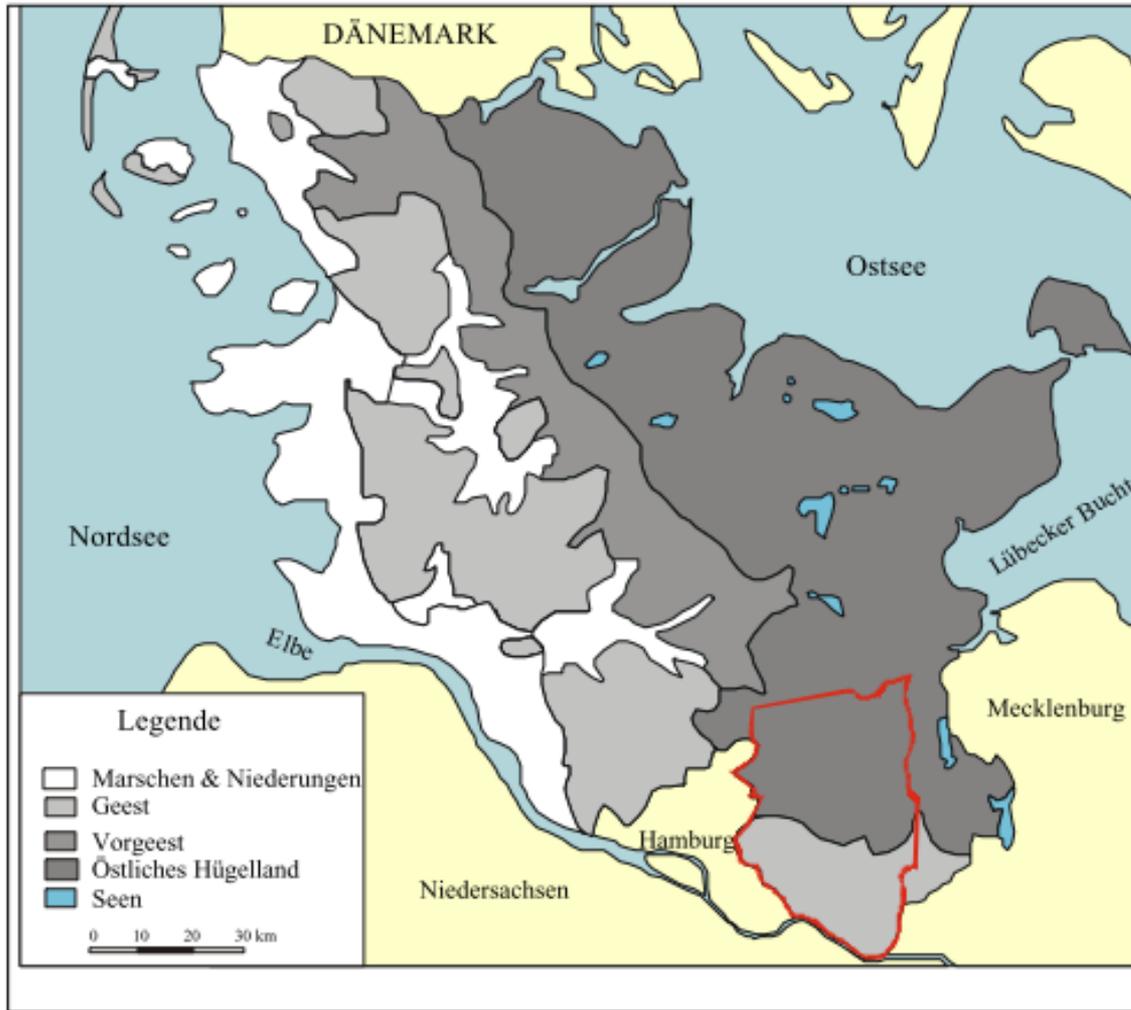
# Grundwasserhydrologie

## (Master Hydrologie)

*Grundwasserneubildung – von der  
Entstehung und Erneuerung von  
Grundwasser*

Dr. Christoph Külls

# Neubildung von Süd-Schleswig-Holstein



Bagrov/Glugla (in GRUNSKÉ, 1975)  
JOSOPAIT & LILICH (1975)  
DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980)  
PROKSCH (1990)  
RENGER & WESSOLEK (1990)  
SCHROEDER & WYRWICH (1990)  
VEKOS (in KLÄMT (1988))



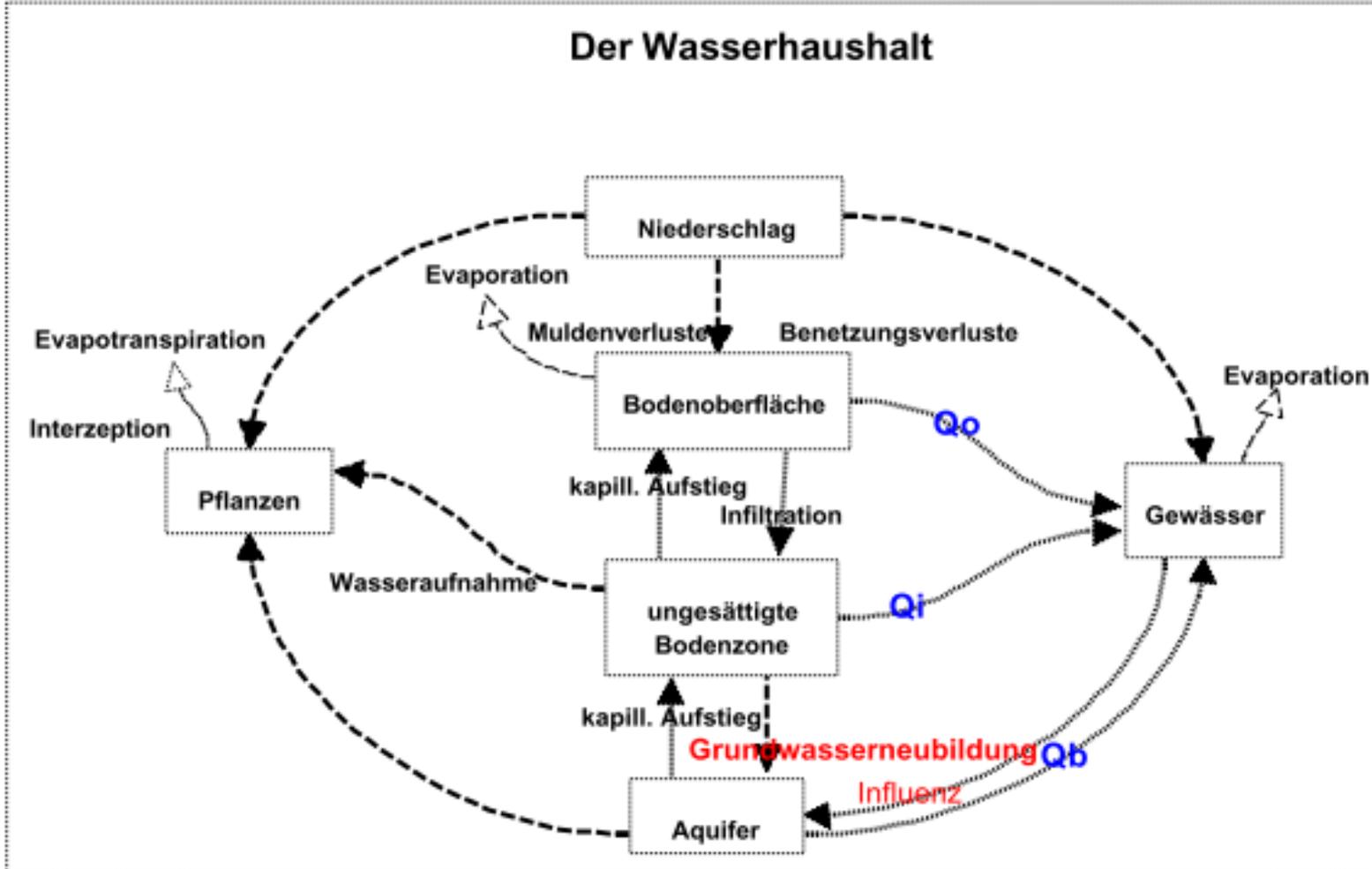
### Legende

#### Östliches Hügelland

-  nicht bis schwach gebleichte Parabraunerde (Brauner Waldboden = eutrophe Parabraunerde)
-  mäßig gebleichte Parabraunerde und Pseudogley-Parabraunerde
-  mäßig gebleichter Waldpodsol, über Lehm meist staunäß (rostfarbener Waldboden = mesotrophe Braunerde)
-  nicht bis schwach gebleichter nasser Waldboden (Pseudogley und Gley)

#### Vorgeest und Hohe Geest

-  feuchter Heidepodsol (Gleypodsol) mit Orterde und Ortstein
-  mäßig bis stark gebleichter Waldpodsol (Braunpodsol-Podsol), über Lehm meist staunäß
-  podsolierte Parabraunerde (Parabraunerde-Podsol)
-  mäßig bis starkgebleichter nasser Waldboden (Podsol-Pseudogley)



: Einflußgrößen auf die Höhe der Grundwasserneubildungsrate.  $Q_0$  = Oberflächenabfluß,  $Q_i$  = Zwischenabfluß,  $Q_b$  = Basisabfluß

## Lysimetermessung und erweiterte Verfahren

### Vorteile

### Nachteile

direkte Meßwerte der Versickerung, bzw. Grundwasserneubildung bei ausreichender Tiefe der Lysimeter

nur im Lockergestein einsetzbar

bei punktueller Betrachtung, wenig zusätzliche Eingangsdaten erforderlich

nur punktuelle Ergebnisse, bei der Übertragung auf die Fläche viele zusätzlichen Informationen notwendig: Niederschlagshöhe, mittlere Monats bzw. Jahrestemperaturen, Oberflächenabfluß, Bewuchs bzw. Flächennutzung, Bodenart, Flurabstand des Grundwassers

Ableitung weiterer Parameter möglich:  
Evapotranspiration

Direktabfluß wird häufig vernachlässigt oder pauschal berechnet

hohe zeitliche Auflösung bei wägbaren Lysimetern

technisch aufwendig: ungestörte Verhältnisse im Lysimeter schwer zu realisieren

## Grundwasserneubildungsrate aus der Bodenwasserhaushaltsmessung

### Vorteile

### Nachteile

direkte Meßwerte im Boden, geringfügige Störung der natürlichen Verhältnisse

nur in relativ homogenen Böden sinnvoll

hohe zeitliche Auflösung möglich

sehr aufwendig bzgl. Messung und Auswertung

Ermittlung kleinflächiger Nutzungs- oder Bodenunterschiede

nur punktuelle Ergebnisse

Ableitung weiterer Parameter möglich: Evapotranspiration, kapillarer Aufstieg

bei punktueller Betrachtung, wenig zusätzliche Eingangsdaten erforderlich

## Grundwasserneubildungsrate aus dem Bodenwasserhaushaltsmodellen

### Vorteile

### Nachteile

Berücksichtigung der relevanten agrarmeteorologischen Eingangsparameter

tlw. erforderliche Eingangsdaten wie Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit

Ableitung von Bodenfeuchte, realer Evapotranspiration, kapillarem Aufstieg möglich

klimatologische Eingangsdaten müssen häufig in täglicher Auflösung vorliegen

bei ausreichender Datengrundlage sehr gute Ergebnisse im kleinräumigen Bereich

Regionalisierung der täglichen oder monatlichen klimatologischen Daten.

Ableitung von Bodenfeuchte, realer Evapotranspiration

Ableitung der Bodenkennwerte wie Feldkapazität, nutzbare Feldkapazität, permanenter Welkepunkt, hydraulische Leitfähigkeit für große Gebiete ist sehr schwierig

<b>Gerinneabfluß</b>	
<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>
relativ einfacher Modellaufbau	langjährige Abflußmessungen nötig
relativ hohe Genauigkeit bei langjährigen Betrachtungen	Voraussetzung: der gesamte Abfluß in Trockenwetterzeiten entstammt ausschließlich dem Grundwasser
	Schwierigkeiten bei effluenten Verhalten des Aquifers
	Fehler durch eventuell nicht erfaßten Grundwasserabstrom und Zwischenabfluß
	im Flachland meist ungenügende Kenntnis des unterirdischen Einzugsgebietes
	Verfahren mathematisch nicht exakt formuliert

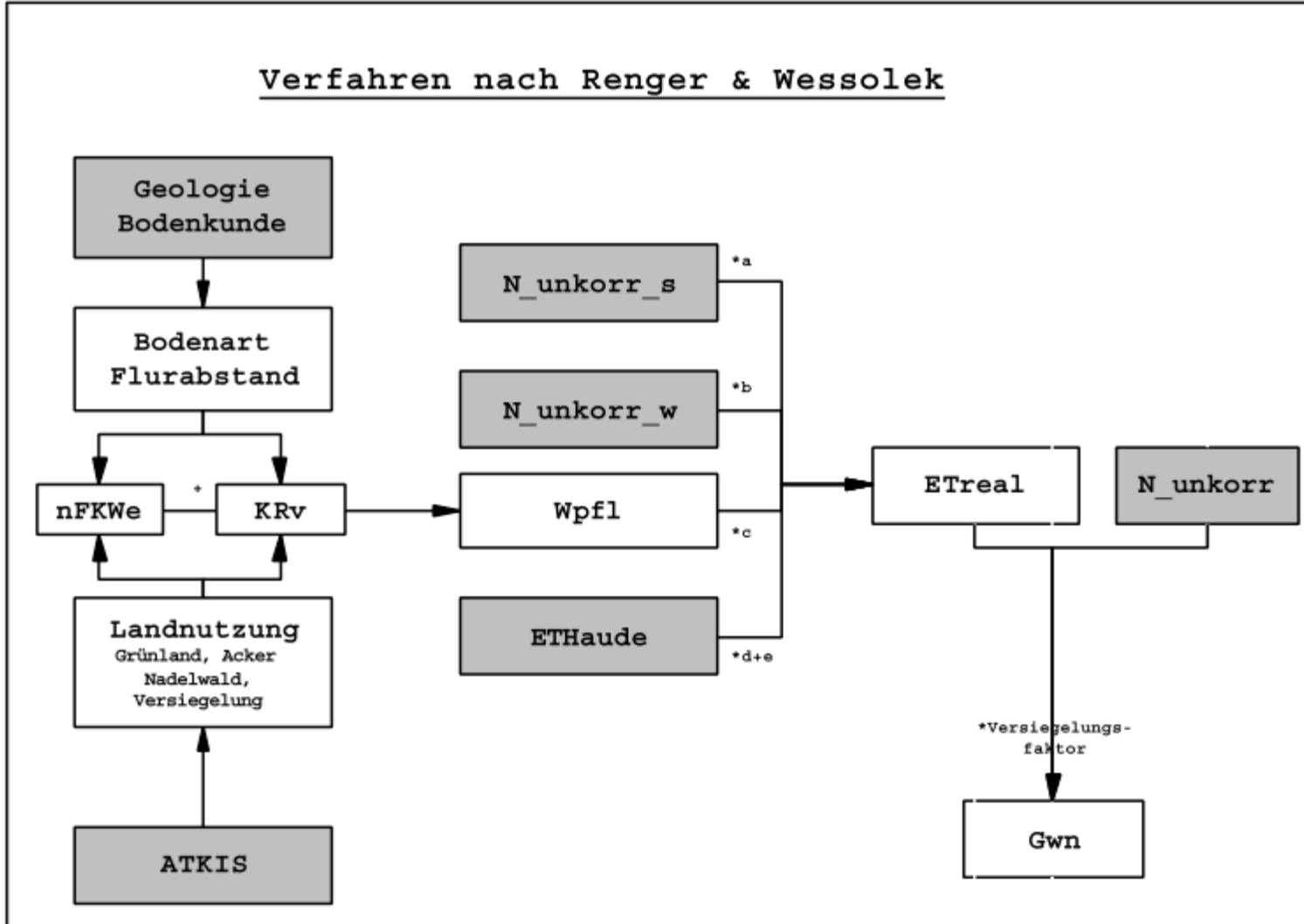
Grundwassermodelle	
Vorteile	Nachteile
umfangreiche Modellierung des Gesamtwasserhaushaltes eines Aquifers	nur sekundär einsetzbar für die Berechnung der Grundwasserneubildung
Berücksichtigung von unterirdischen Ab- und Zustrom	großer Umfang an benötigten Eingangsdaten: <ul style="list-style-type: none"> <li>• dichtes Grundwassermeßstellennetz</li> <li>• hydrogeologische Größen (Transmissivität, <math>k_f</math>-Wert, etc.)</li> </ul>
	komplizierte Eichung und Festlegung der Anfangs- und Randbedingungen für die Modelle
	hohe Anzahl von Grundwassermeßstellen notwendig
Chloridmethode	
Vorteile	Nachteile
geringer Aufwand: <ul style="list-style-type: none"> <li>• in landwirtschaftlich ungenutzten Gebieten 2-3 Probenahmen von wenigen, repräsentativen Brunnen</li> <li>• Niederschlagsbeprobung (Mittelwerte unter Berücksichtigung der Niederschlagshöhe)</li> <li>• Untersuchung des Vorfluters bei Trockenwetterabfluß</li> </ul>	Methode nur anwendbar in kleinen, homogenen Gebieten, in denen das Auftreten von Salz aus: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Landwirtschaft</li> <li>• Streusalzen</li> <li>• geogener Herkunft</li> </ul> auszuschließen ist.

Beim Verfahren nach Renger & Wessolek (1990) wird über den Bodenwasserhaushalt die Grundwasserneubildung an ebenen Standorten im Lockergesteinsbereich, ohne Berücksichtigung des oberirdischen Abflusses und des Zwischenabflusses, ermittelt ( $Q_d = 0$ ). Hierbei wird davon ausgegangen, daß die Differenz zwischen Niederschlag und realen Verdunstung der Grundwasserneubildung entspricht. Voraussetzung ist, daß der Bodenwasserspeicher zu Beginn der Vegetationsperiode bis zur Feldkapazität gefüllt ist. Aus diesem Grunde erfolgt die Berechnung der realen Evapotranspiration als Summe von April bis März des Folgejahres nach der Formel:

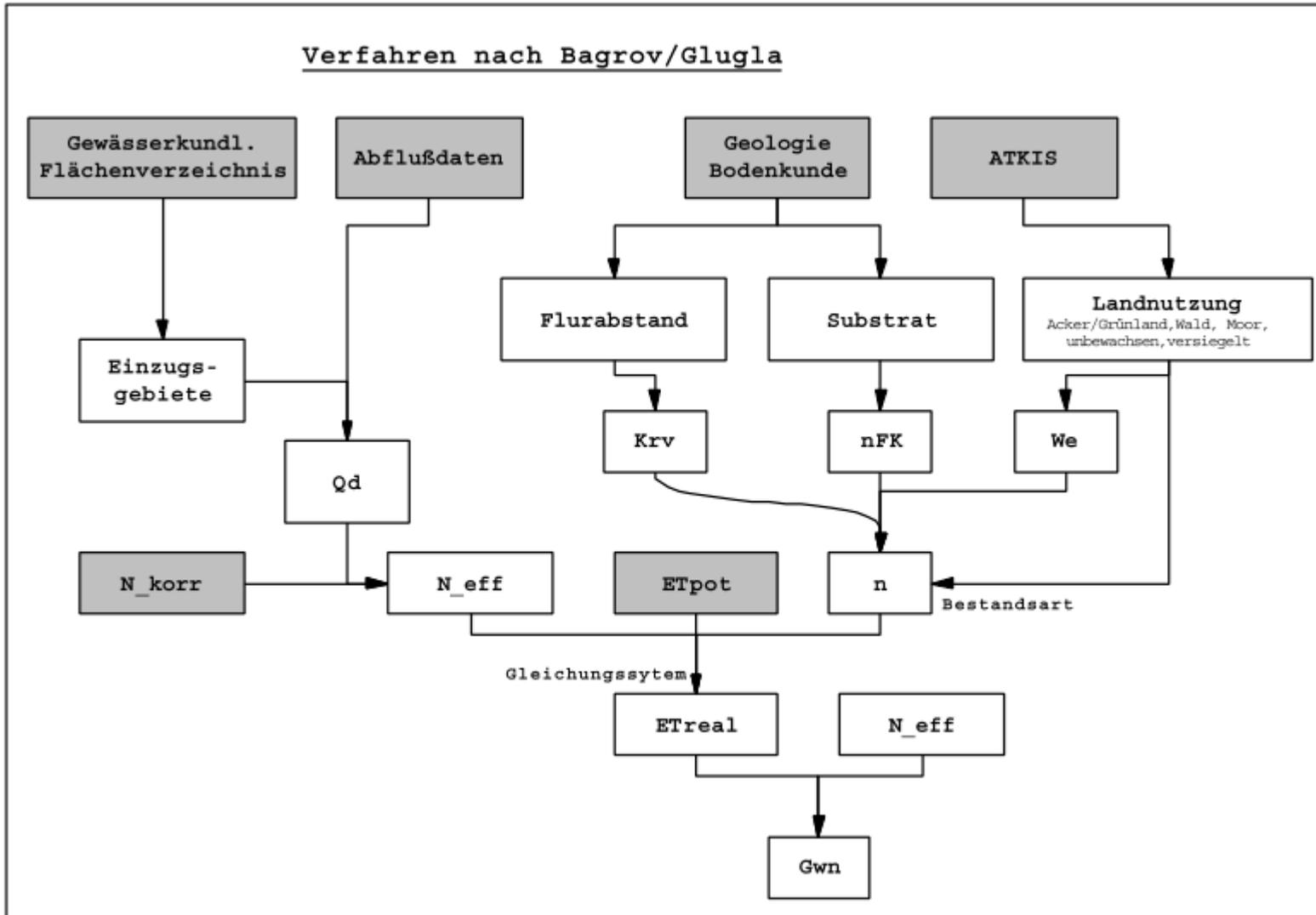
$$E_{ta} = a * N_{SO} + b * N_{Wi} + c * \log W_{pfl} + d * E_{Tp} + e$$

- mit
- $E_{ta}$  = reale Evapotranspiration
  - $E_{Tp}$  = potentielle Evapotranspiration nach Haude (Gras) in mm/a
  - $N_{SO}$  = Sommerniederschlag in mm, Summe 01.04. bis 30.09.
  - $N_{Wi}$  = Winterniederschlag in mm, Summe 01.10. bis 31.03.
  - $W_{pfl}$  = pflanzenverfügbare Wassermenge im Boden in mm

## Verfahren nach Renger & Wessolek

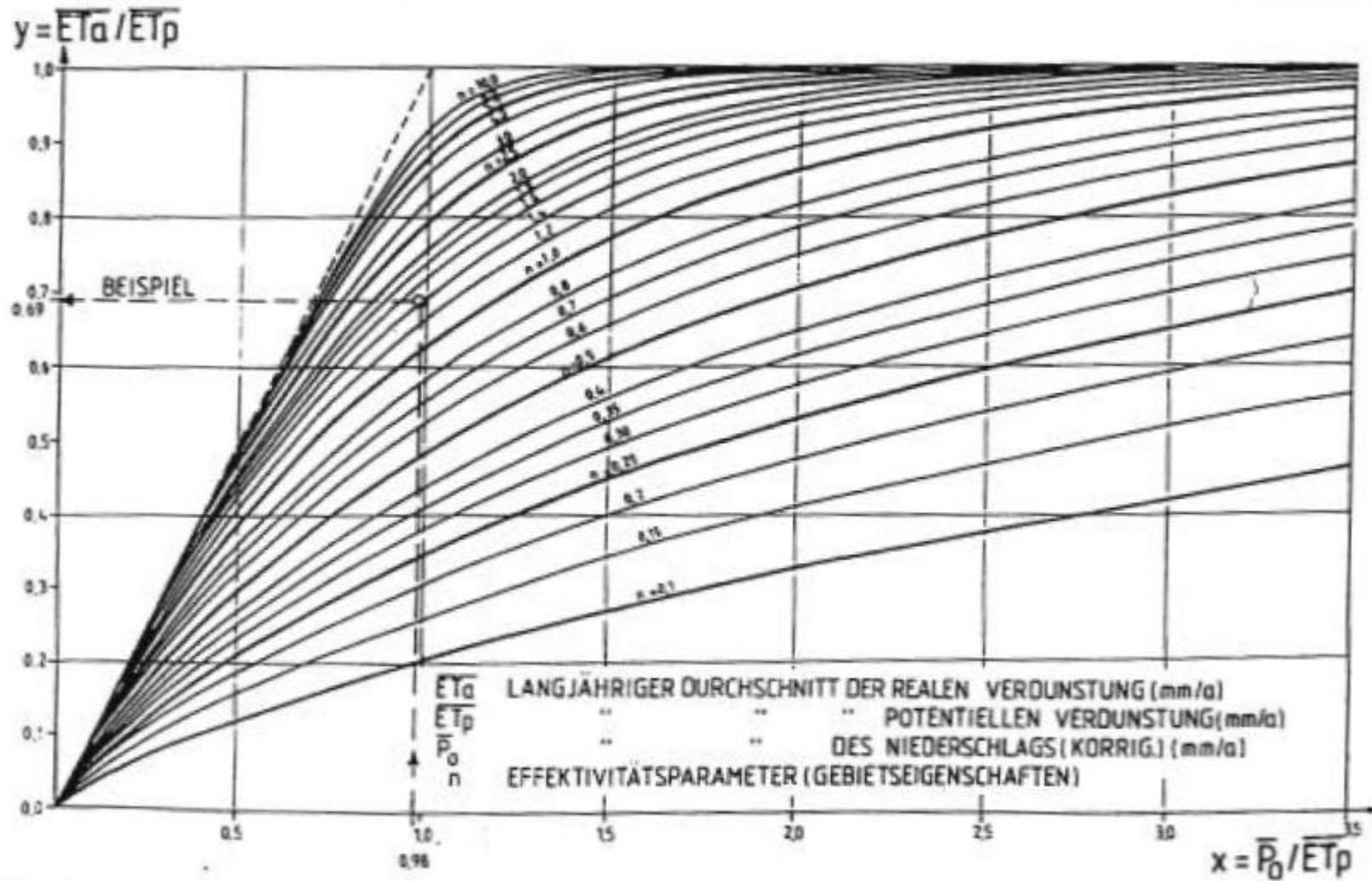


## Verfahren nach Bagrov/Glugla

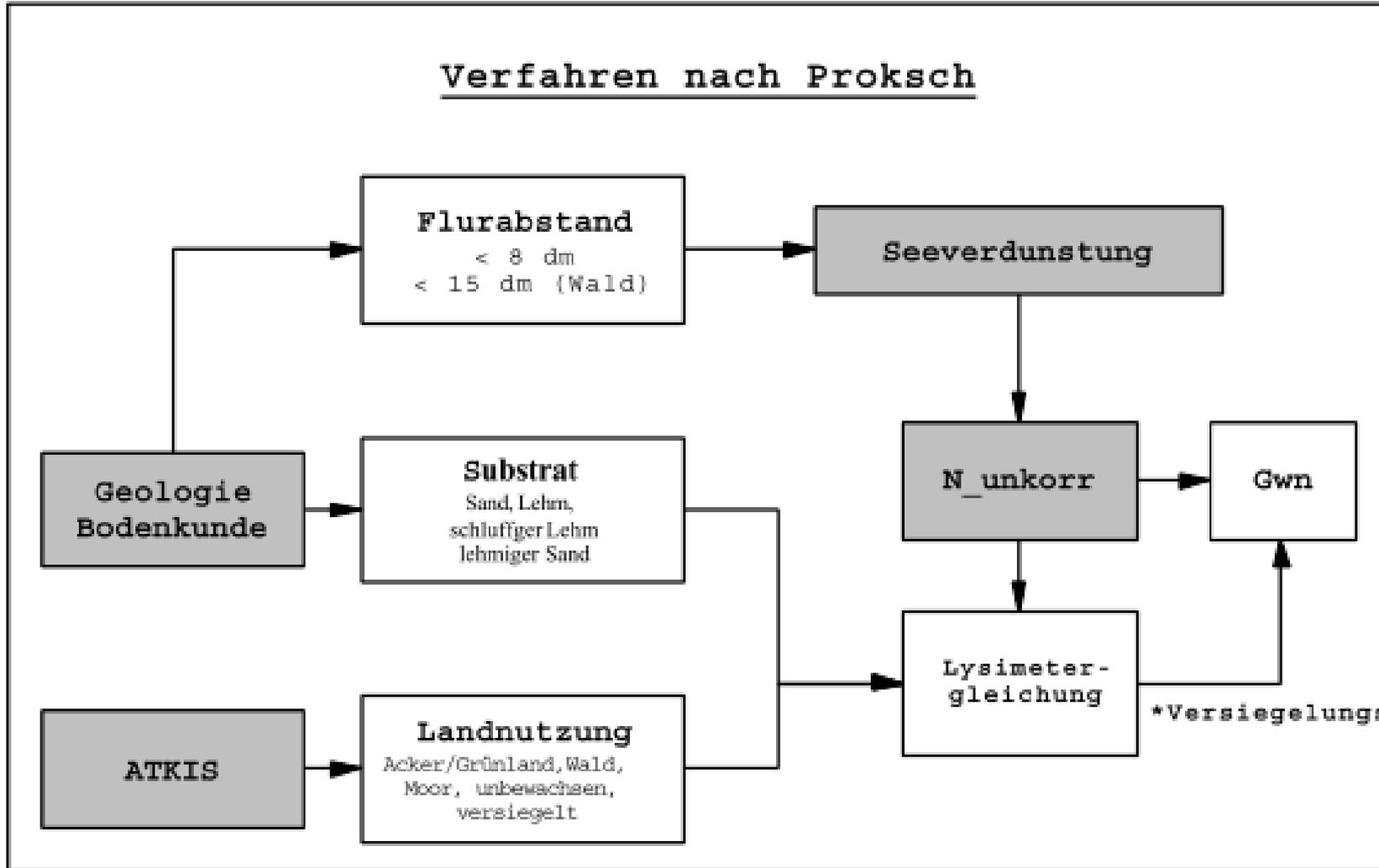


Abgeleitete Werte für den Effektivitätsparameter „n“ in Abhängigkeit vom Bewuchs und der nutzbaren Feldkapazität (nFK)

nFK	Effektivitätsparameter „n“		
	Vegetationslos	Acker-/Grünland	Wald
8	0.30	1.00	3.00
14	0.40	1.50	4.00
15	0.50	1.60	4.00
17	0.60	2.00	5.00
18	0.70	2.00	5.00
22	1.00	3.00	8.00



## Verfahren nach Proksch

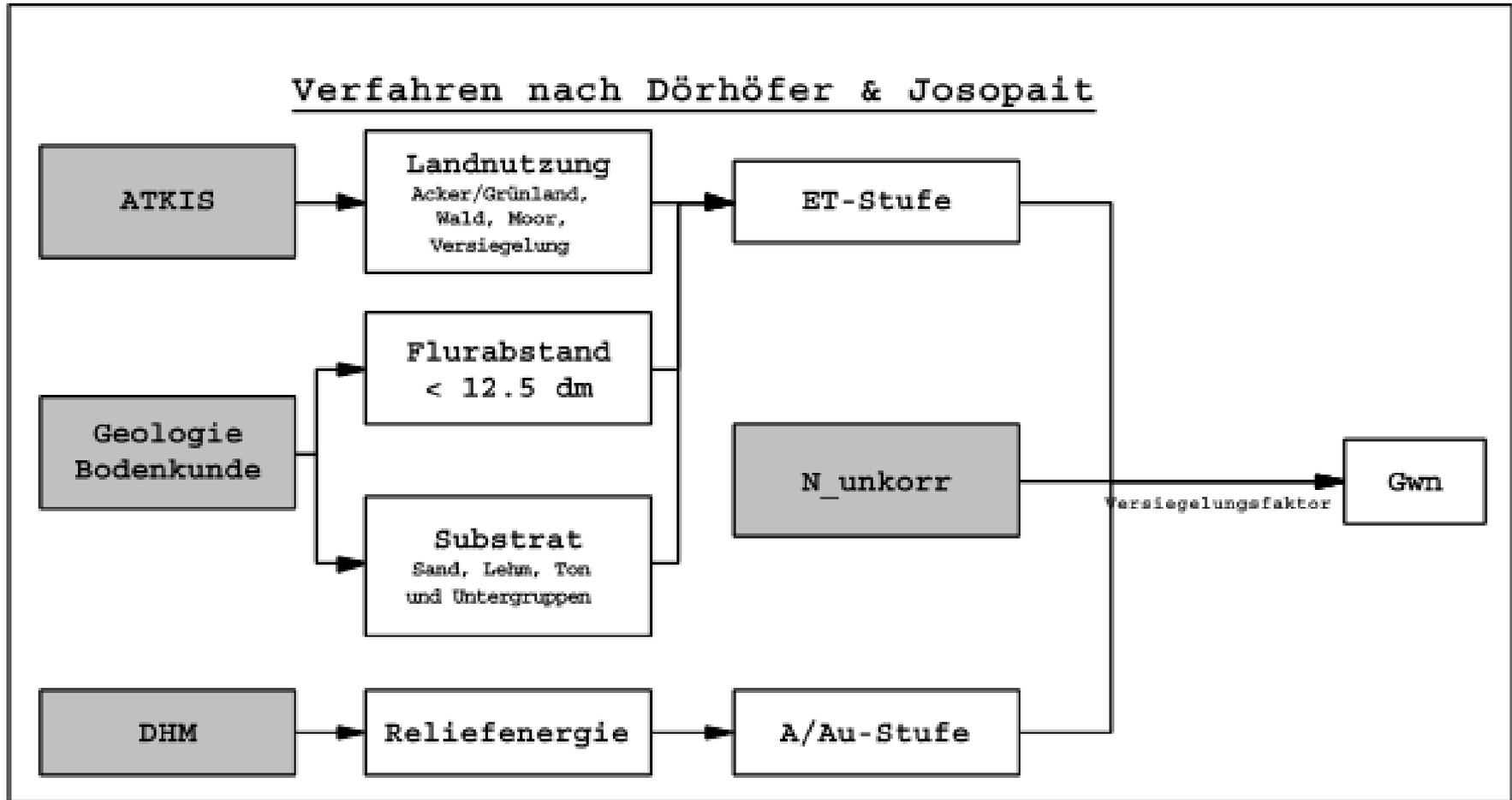


Lysimetergleichungen nach PROKSCH (1990); N = mittlere unkorrigierte Jahresniederschlagshöhe, Sw = Sickerwasser

<b>Bodenart</b>	<b>Vegetation</b>	<b>Lysimetergleichung</b>
<b>Sand</b>	unbewachsen	$Sw = - 59,20 + 0,852 N$
	Dünenvegetation	$Sw = - 167,96 + 0,840 N$
	Acker	$Sw = - 160,73 + 0,717 N$
	Gras	$Sw = - 299,02 + 0,918 N$
	Laubwald	$Sw = - 199,27 + 0,662 N$
	Nadelwald	$Sw = - 289,66 + 0,578 N$
<b>lehm. Sand</b>	unbewachsen	$Sw = - 125,36 + 0,732 N$
	Acker	$Sw = - 305,23 + 0,819 N$
	Gras	$Sw = - 250,16 + 0,688 N$
<b>Lößlehm</b>	Unbewachsen	$Sw = - 204,81 + 0,687 N$
	Acker	$Sw = - 414,86 + 1,018 N$
	Gras	$Sw = - 391,51 + 0,960 N$
<b>Lehm</b>	Acker	$Sw = - 244,82 + 0,624 N$
	Gras	$Sw = - 341,37 + 0,933 N$

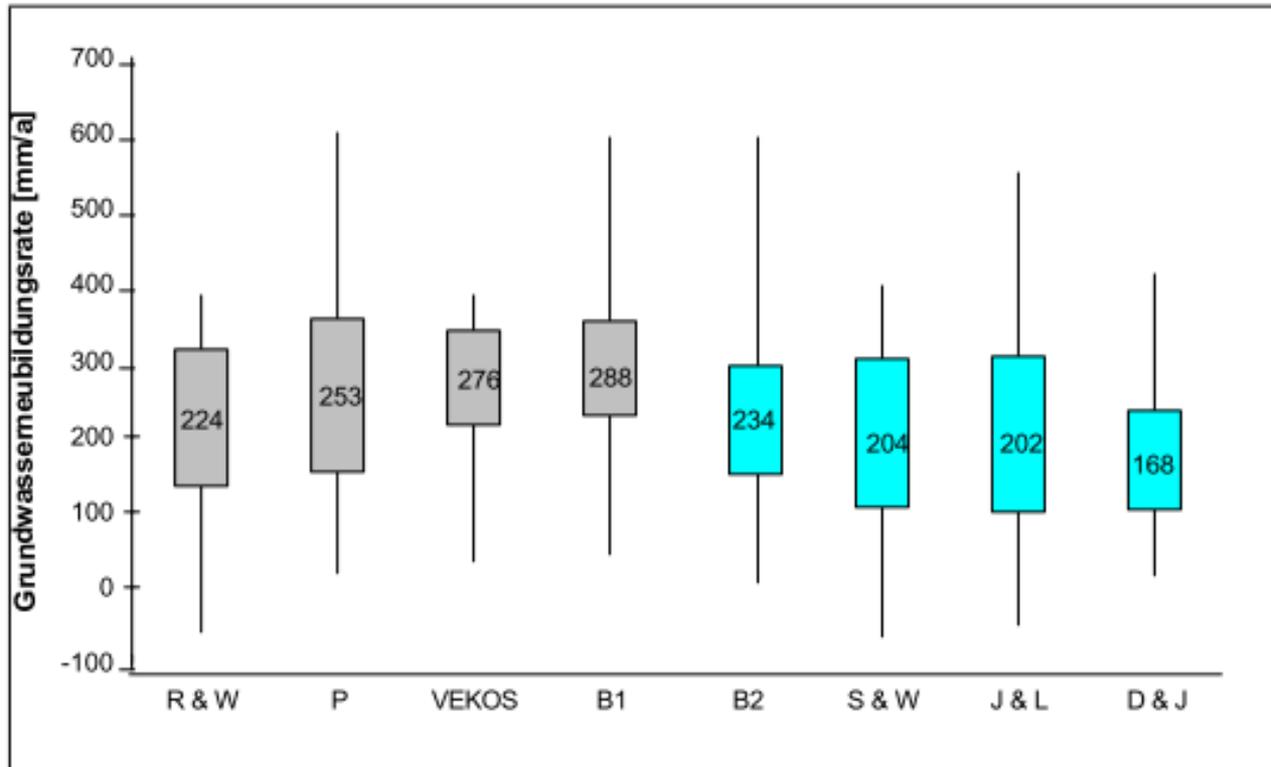
Lysimetergleichungen nach JOSOPAIT & LILLICH (1975) N = mittlere unkorrigierte Jahresniederschlagshöhe, Sw = Sickerwasser; für den Substrattyp Sandlöß wurden für den Bewuchs Wald bzw. unbewachsen Abschlüsse verteilt

Substrattyp	Bewuchs	Lysimetergleichung
Sand	Unbewachsen	$Sw = 1,1 N - 306$
	Acker- / Grünland	$Sw = 1,1 N - 433$
	Wald	$Sw = 1,1 N - 474$
Geschiebelehm	Unbewachsen	$Sw = 1,1 N - 405$
	Acker- / Grünland	$Sw = 1,1 N - 558$
	Wald	$Sw = 1,1 N - 578$
Sandlöß	Unbewachsen	$Sw = 1,1 N - 306 - 44$
	Acker- / Grünland	$Sw = 1,1 N - 497$
	Wald	$Sw = 1,1 N - 474 - 60$



Nach DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980) abgeleitete reale Evapotranspirationswerte in Abhängigkeit vom Substrat, Landnutzung und Flurabstand

<b>Substrat / Flurabstand [dm]</b>	<b>reale Verdunstungshöhe [mm/a]</b>	
	<b>Acker/Grünland</b>	<b>Wald</b>
Sand	363	463
lehmiger Sand	413	488
lehmiger Schluff	463	513
Schluff, sandiger Lehm	488	538
Lehm	538	588
Ton	563	588
> 7.5 <12.5	588	588
< 7.5	613	613

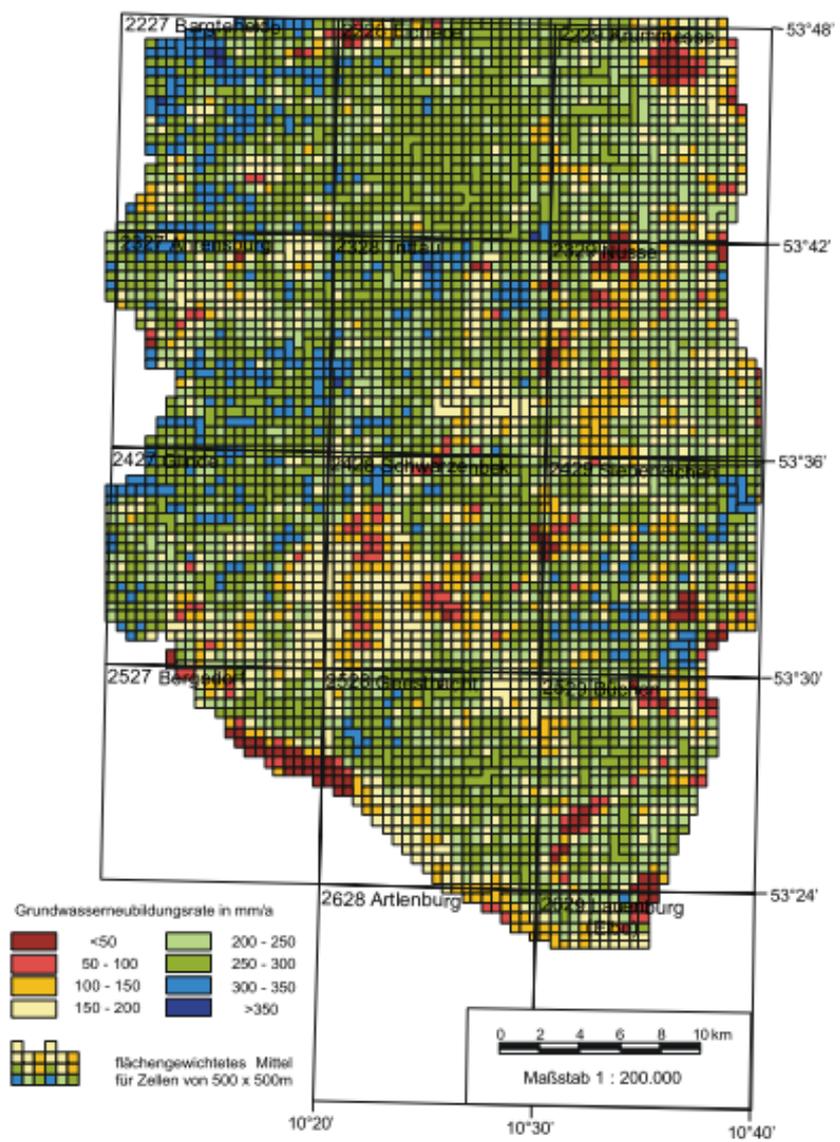
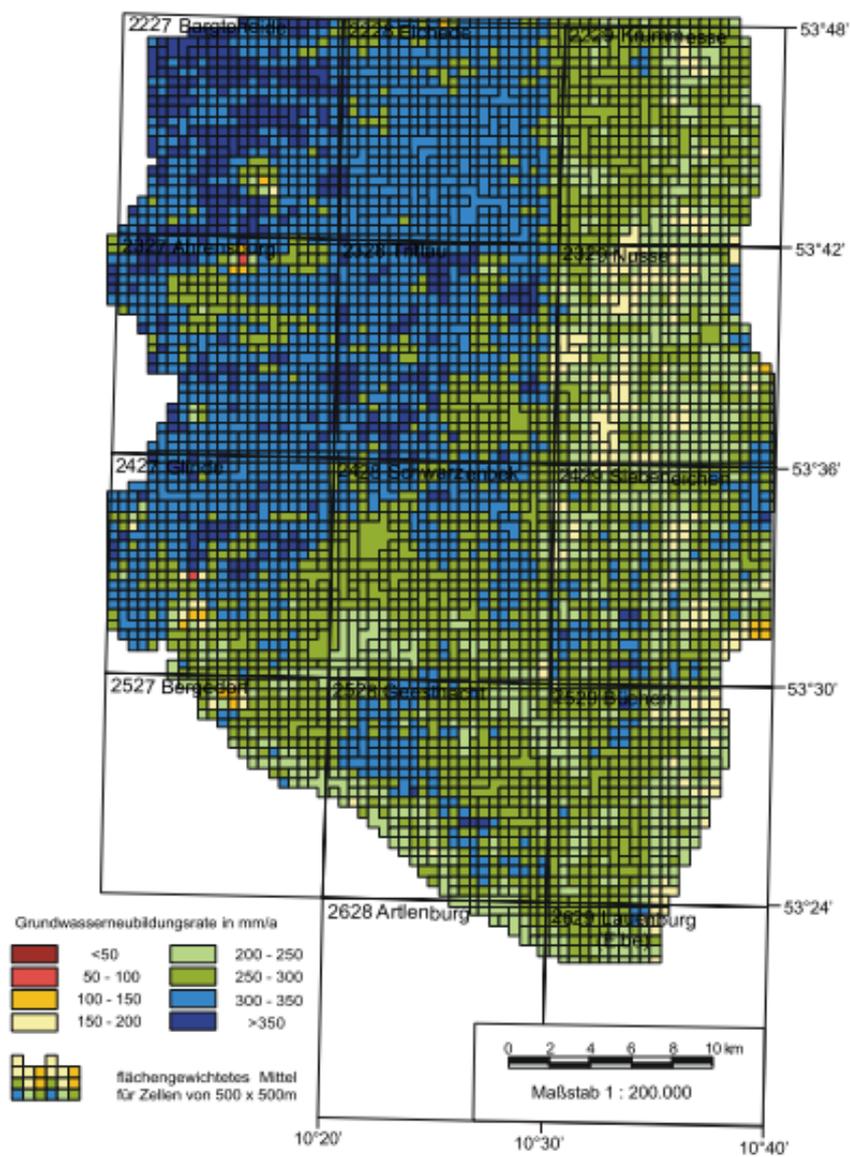


Kasten-Faden-Diagramm der flächendifferenzierten Grundwasserneubildungsrate (1961-1990); R & W = RENGER & WESSOLEK (1990), P = PROKSCH (1990); B1 = Bagrov/Glugla (in GRUNSKÉ, 1975) ohne Berücksichtigung des Direktabflusses, B2 = Bagrov/Glugla (in GRUNSKÉ, 1975) mit Berücksichtigung des Direktabflusses, S & W = SCHROEDER & WYRWICH (1990), J & L = JOSOPAIT & LILLICH (1975); D & J = DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980)

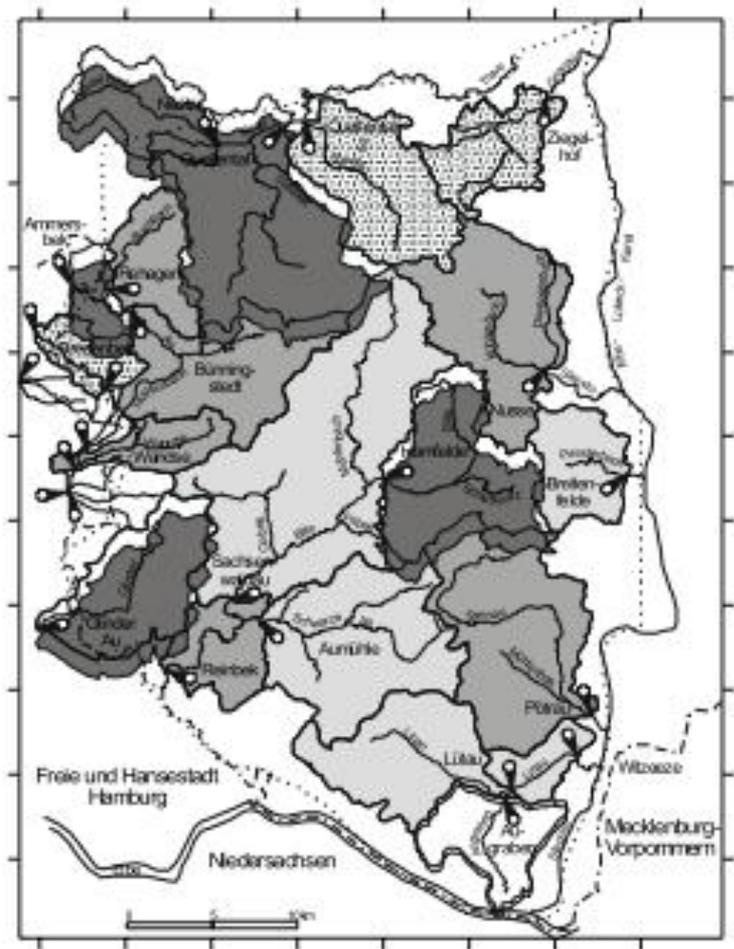
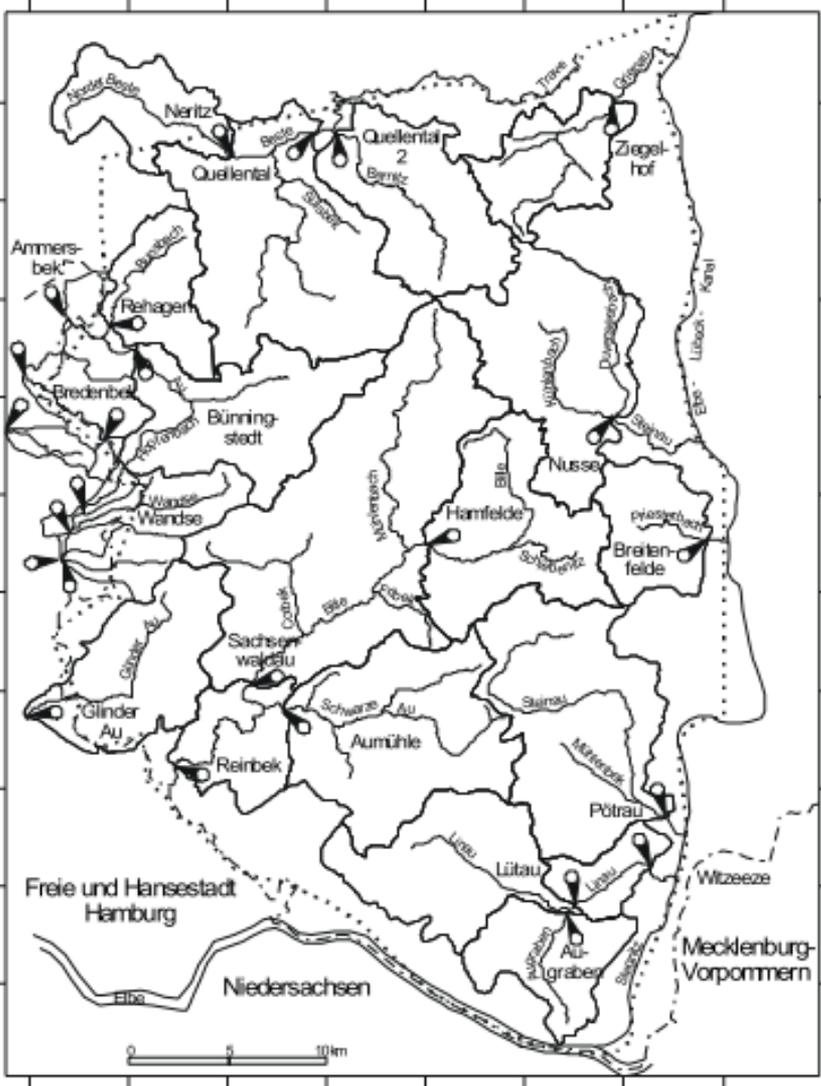
Statistische Kenngrößen der Berechnung der flächendifferenzierten Grundwasserneubildungsrate nach verschiedenen Verfahren; o. D. = ohne Berücksichtigung des Direktabflusses, m. D. = mit Berücksichtigung des Direktabflusses

<b>Verfahren</b>	<b>Mittel [mm/a]</b>	<b>Standard- abweichung [mm/a]</b>	<b>Variations- koeffizient %</b>	<b>Minimum [mm/a]</b>	<b>Maximum [mm/a]</b>	<b>Spanne [mm/a]</b>
<b>Renger &amp; Wessolek o. D.</b>	224	90	40	-60	385	445
<b>Proksch o. D.</b>	253	101	40	17	601	584
<b>Bagrov/Glugla o. D.</b>	288	62	22	44	593	549
<b>VEKOS o. D.</b>	276	62	22	33	387	354
<b>Bagrov/Glugla m. D.</b>	218	64	29	6	509	503
<b>Schroeder &amp; Wyrwich m. D.</b>	204	98	48	-65	399	464
<b>Josopait &amp; Lillich m. D.</b>	202	102	50	-50	547	597
<b>Dörhöfer &amp; Josopait m. D.</b>	168	66	39	16	415	399

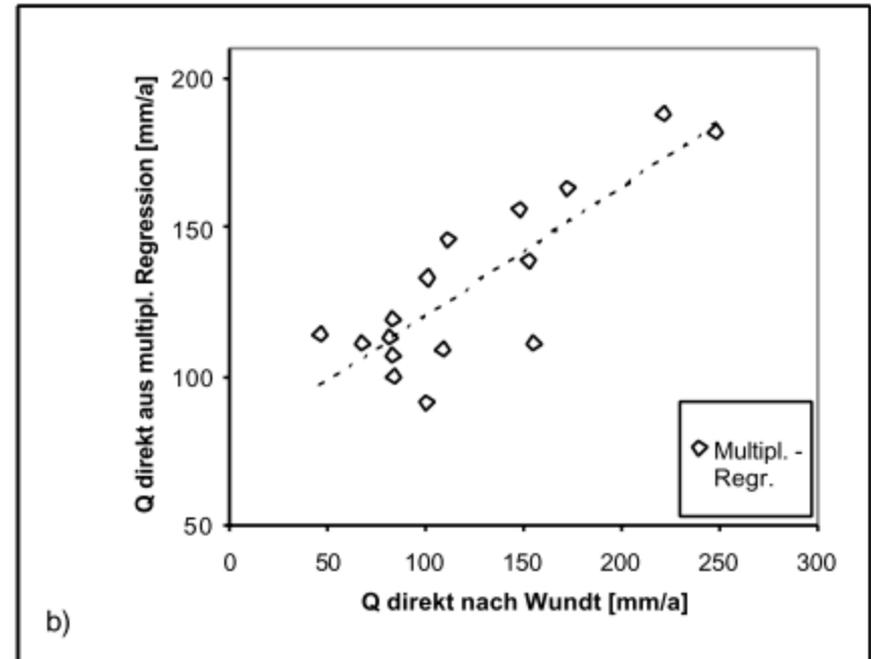
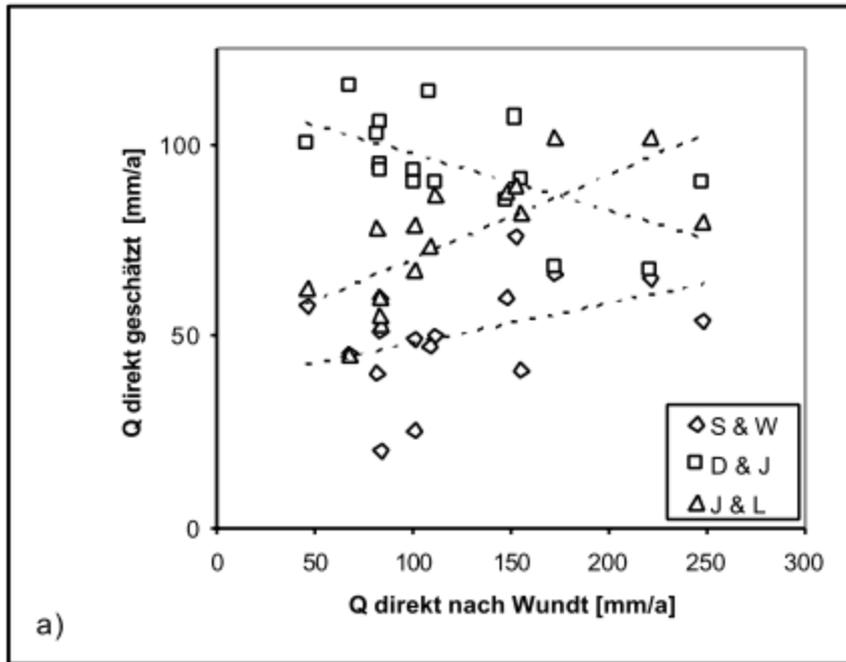
# Vergleich der Methoden: Bagrov vs. Renger



# Kontrolle über den Gerinneabfluss



- < 50 mm/a
- 50 - 100 mm/a
- ▨ 100 - 150 mm/a
- ▩ 150 - 200 mm/a
- ▧ > 200 mm/a



Vergleich zwischen geschätzten und nach WUNDT (1958) abgeleiteten Direktabflussspenden. a) geschätzt nach den Verfahren S & W = SCHROEDER & WYRWICH (1990), J & L = JOSOPAIT & LILLICH (1975); D & J = DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980); b) geschätzt nach der multiplen Regression

Verfahren	Klima		Boden und Pflanze				Hydrologie		
	Niederschlag	potentielle Evapotranspiration	nFK	Bodengruppen, Bodenart	Landnutzung	Versiegelung	Relief, Reliefenergie	Grundwasserflurabstand	Oberflächenabfluß
PROKSCH (1990)	u			+	+	+		+	
RENGER & WESSOLEK (1990)	u	H	+		+	+		+	
BAGROV & GLUGLA (in GRUNSKÉ, 1975); ohne Berücksichtigung des Oberflächenabflusses	k	T	+		+	+		+	
VEKOS (KLÄMT, 1988)	k		+		+	+		+	
BAGROV & GLUGLA (in GRUNSKÉ, 1975); mit Berücksichtigung des Oberflächenabflusses	k	T	+		+	+	+	+	+
JOSOPAIT & LILLICH (1975)	u			+	+	+	+	+	+
DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980)	u			+	+	+	+	+	+
SCHROEDER & WYRWICH (1990)	u			+	+	+	+	+	+

- 1) Lysimeter  
-
- 2) Tensiometre  
Gloeden, E. (1994) [S. Paulo State]
- 3) Soil water balance  
Camargo, A.P. (1978) [S. Paulo State with map]  
Souza, A. et al. (1979) [S. Paulo State]  
Souza, A.; Sinelli, O.; Davino, A. (1982) [[S. Paulo State - Cravinhos]  
Ometto, J.C.; Villa Nova, N.A. (1986) [S. Paulo State]  
Matos, Ivone da Silva (1987) [S. Paulo State]  
Braga, B.P.F.; Conejo, J.G.L.; Palos J.C.F. (1991) [S. Paulo State]  
**Contin Neto, D. (1996) [S. Paulo State - Riberao Preto]**  
**Pompêo, C.A. (1994) [St. Catarina State]**
- 4) Chloride method  
-
- 5) Water works data  
Pfeiffer, S.C. (1993) [S. Paulo State]
- 6) Spring discharge  
-

## 7) Baseflow

- a. Souza, A. et al. (1979) [S. Paulo State]  
**Piui, J.; Campos, H.C.N.S. (1984) [S. Paulo State, Araraquara – Base Flow estimation and water balance]**  
Corrêa, U.M.P. (1995) [S. Paulo State]  
Oliveira, J.N. (2001) [S. Paulo State, Riberao Preto]  
**Pompêo, C.A. (1994) [St. Catarina State]**
- b. -
- c. **Lopez, M.F.C. (1994) [S. Paulo State, Bauru – Baseflow estimation – operational method by DAEE]**

## 8) Water level change

-

## 9) Aquifer data

- a. Souza, A. et al. (1979) [S. Paulo State]  
Silva, R.B. (1983) [S. Paulo State]  
Fraga, C.G. (1992) [S. Paulo State]  
Corrêa, U.M.P. (1995) [S. Paulo State]  
Rosa Filho, E.F. et al. (1998/2000) [Parana]  
Zanatta, L.C. & Coitinho, J.B.L. (2002) [St. Catarina State – Aquifer data, geometry]  
Giardin, A. & Faccini U. (2002) [Rio Grande do Sul]
- b. Reboucas, Aldo (1976) [GAS] [S. Paulo State]  
Teissedre & Barner (1981) cited in Reboucas, A. (1981) [S. Paulo State]  
Teisseidre, J.M.; Sanches, J.L.; Lopes, M.F.C. (1982) [S. Paulo State - Hydraulic parameters]  
Reboucas, Aldo (1994) [S. Paulo State - GAS]  
Chang, H.K. (2001) [S. Paulo State - GAS]  
Campos, H.C.N.S. (2002) [Rio Grande do Sul, Lit. overview]
- c. Rocha, G.A. (1997) [S. Paulo State - GAS – DAEE compilation of hydraulic data]

- 10) Groundwater models  
**Montenegro, A.A.A. et al. (1988/1989/1990) [S. Paulo State, Riberaió Preto]**  
**Contin Neto, D. (1996) [S. Paulo State, Riberaió Preto]**
- 11) Oxygen-18 time series & investigations  
-
- 12) Tritium, <sup>85</sup>Kr, FHC, SF<sub>6</sub>, other tracers  
Gomes, M.A.F., Spadotto, C.A. (2001) [S. Paulo State, Rib. Preto – Agrochemical tracers]  
Gomes, M.A.F.; Filiozola, H.F., Spadotto, C.A. (2002) [S. Paulo State, Rib. Preto – Agrochemical tracers and recharge areas]
- 13) Carbon-14 dating and mixing models  
Silva, R. B.G. (1983)
- 14) Development of hydro-geological concept models  
Strugale, M. et al. (2002) [Parana – development of a structural model and concept based on water levels]

# Methoden der Neubildungsbestimmung

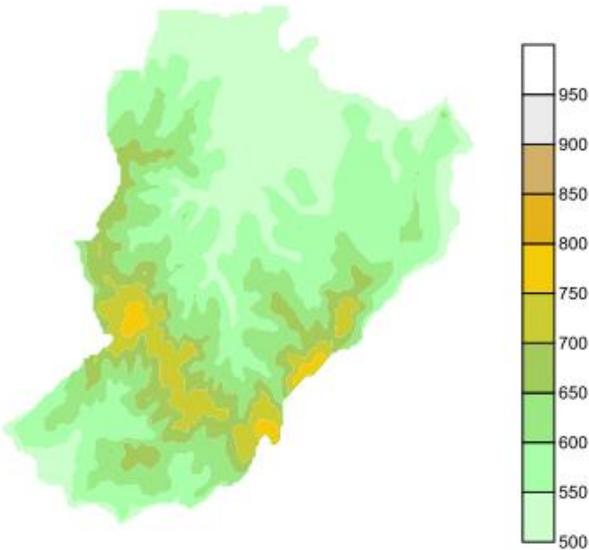
Name of method	Time scale			Spatial scale			Climatic Realm			Geo-Environments			Recharge types covered		Required field work			Required Data			Available Software		Applications in Brazil			Results													
	< 1 year	1-50 years	> 50 years	Local	Basin	Regional	Tropical	Humid	Semi-arid	Arid	Sediments	Hard-rock	Karst	Human impact	Direct	Indirect	Reconnaissance	Sampling	Measurement	Construction	Rainfall	Runoff	Water levels	Aquifer data	Landuse data	Isotopes	Chemistry	Standard (Spreadsheet)	Commercial	Scientific	a. Local application	b. General GAS study	c. Operational method	Not documented	Discrete Time Steps	Discrete Grids (Maps)	Transfer to sub-basins	Parametric method	Allows Scenarios
<b>Experimental methods</b>																																							
Lysimeter	+	-	-	+	-	-	+	+	o	-	+	-	-	o	+	-	-	o	+	+	+	-	-	+	o	o	-	-	+	1	-	-	+	+	-	-	-		
Tensiometer	+	-	-	+	-	-	o	+	o	-	+	-	-	o	+	-	-	+	+	+	+	-	-	+	o	o	-	+	+	2	-	-	-	+	-	-	-	-	
<b>Soil water balance</b>																																							
Soil water balance	+	o	-	+	+	o	+	+	o	-	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+	+	+	+	-	-	o	o	+	3	-	-	-	+	+	+	+	+		
Chloride method	o	+	o	+	o	-	-	o	+	+	+	+	+	o	+	+	+	+	+	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	4	-	-	+	+	-	-	+	-	
<b>Hydrologic water balances for different balance units</b>																																							
Water works data	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	5	-	-	-	+	-	-	-	o	
Spring discharge	+	-	-	+	+	-	+	+	o	-	+	+	+	+	+	+	+	-	+	o	o	+	-	-	-	-	+	-	-	6	-	-	-	+	-	-	-	-	
Base flow	+	+	o	o	+	o	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+	+	-	-	-	-	+	-	7a	7b	7c	-	-	-	+	-	-	+	-
<b>Aquifer parameters and storage changes</b>																																							
Water level change	+	+	-	+	+	o	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	+	8	-	-	-	+	o	-	+	-	-		
Aquifer data (Darcy)	-	+	+	-	+	o	+	+	+	o	+	o	-	+	o	+	-	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	9a	9b	-	-	-	-	o	-	-	-		
Aquifer model	o	+	+	o	+	o	+	+	+	o	+	+	-	+	+	+	-	+	-	-	+	+	+	-	-	+	+	10a	10b	-	-	-	+	+	-	o	+		
<b>Isotope and hydrochemical methods</b>																																							
<sup>18</sup> O stable isotope time series	+	-	-	o	+	o	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	o	-	-	-	+	o	-	-	+	11	-	-	-	-	-	-	-	-		
Tritium, <sup>85</sup> Kr, FHC, SF <sub>6</sub> , other tracers	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	o	o	o	-	+	o	+	+	12	-	-	-	-	+	+	-	-	o		
<sup>14</sup> C dating / mixing	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	o	o	o	-	+	o	+	+	13	-	-	-	-	-	-	-	-	o		
<b>Development of hydro-geological concept models</b>																																							
																											14a	14b	14c										

## GWN über Hydrologische Bilanzen

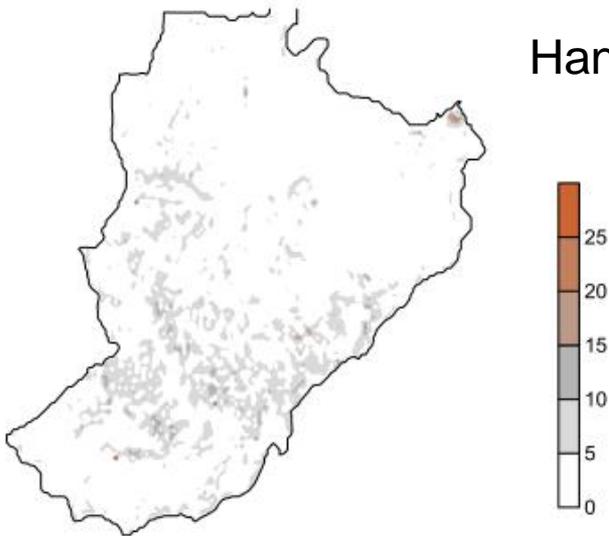
$$\text{GWN} = N - A - V \pm \Delta S$$

**Bodenwasserbilanz**

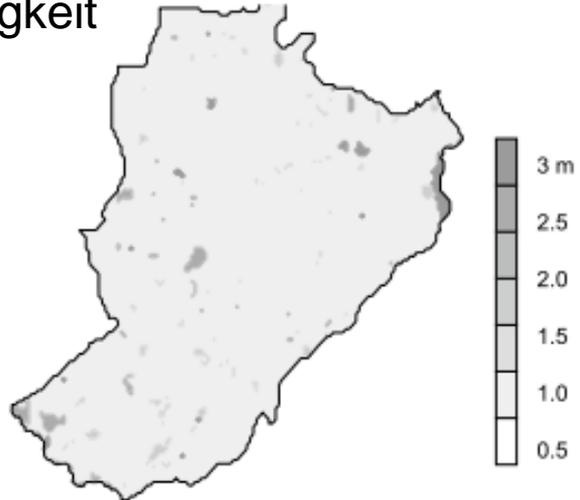
Topographie



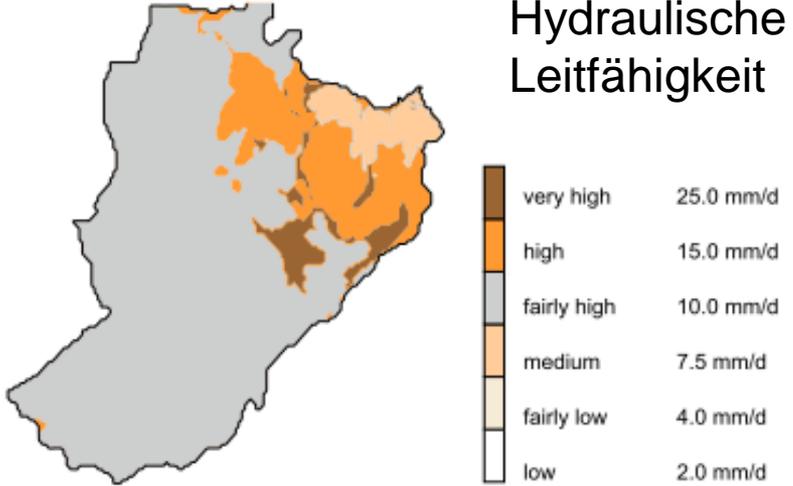
Hangneigung



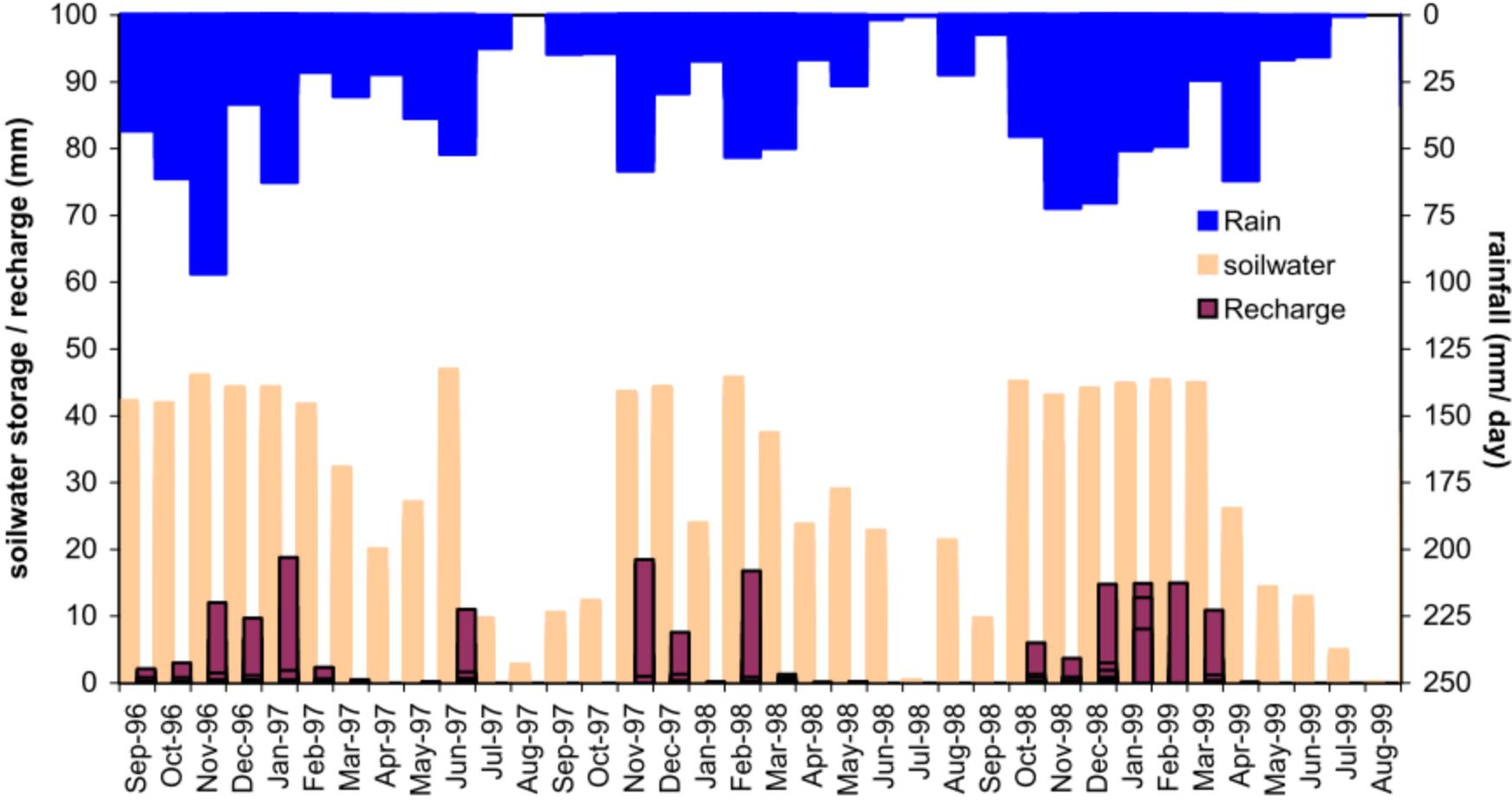
Bodenmächtigkeit

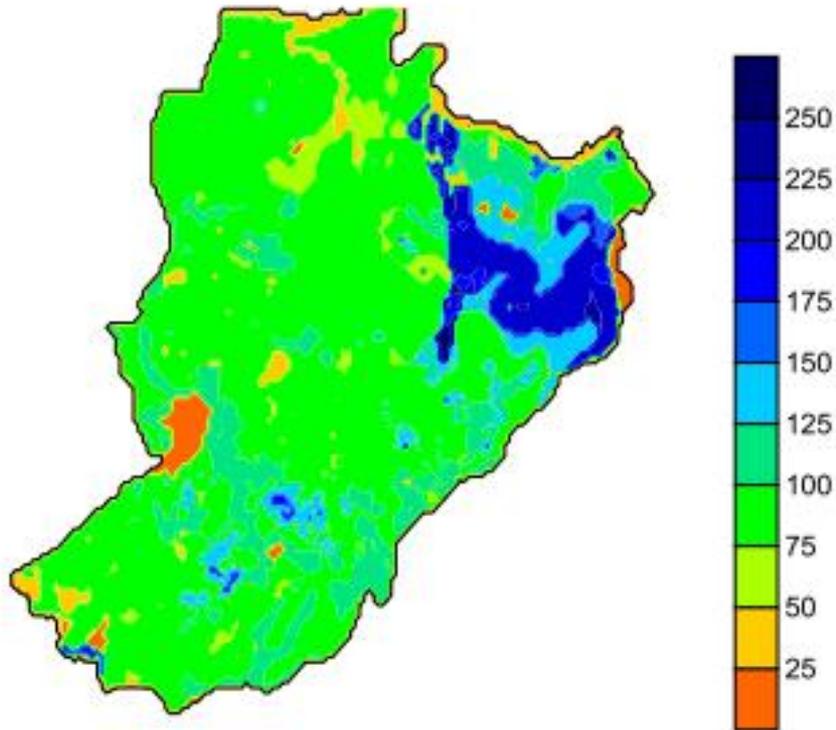


Hydraulische Leitfähigkeit



# Methoden der Neubildungsbestimmung





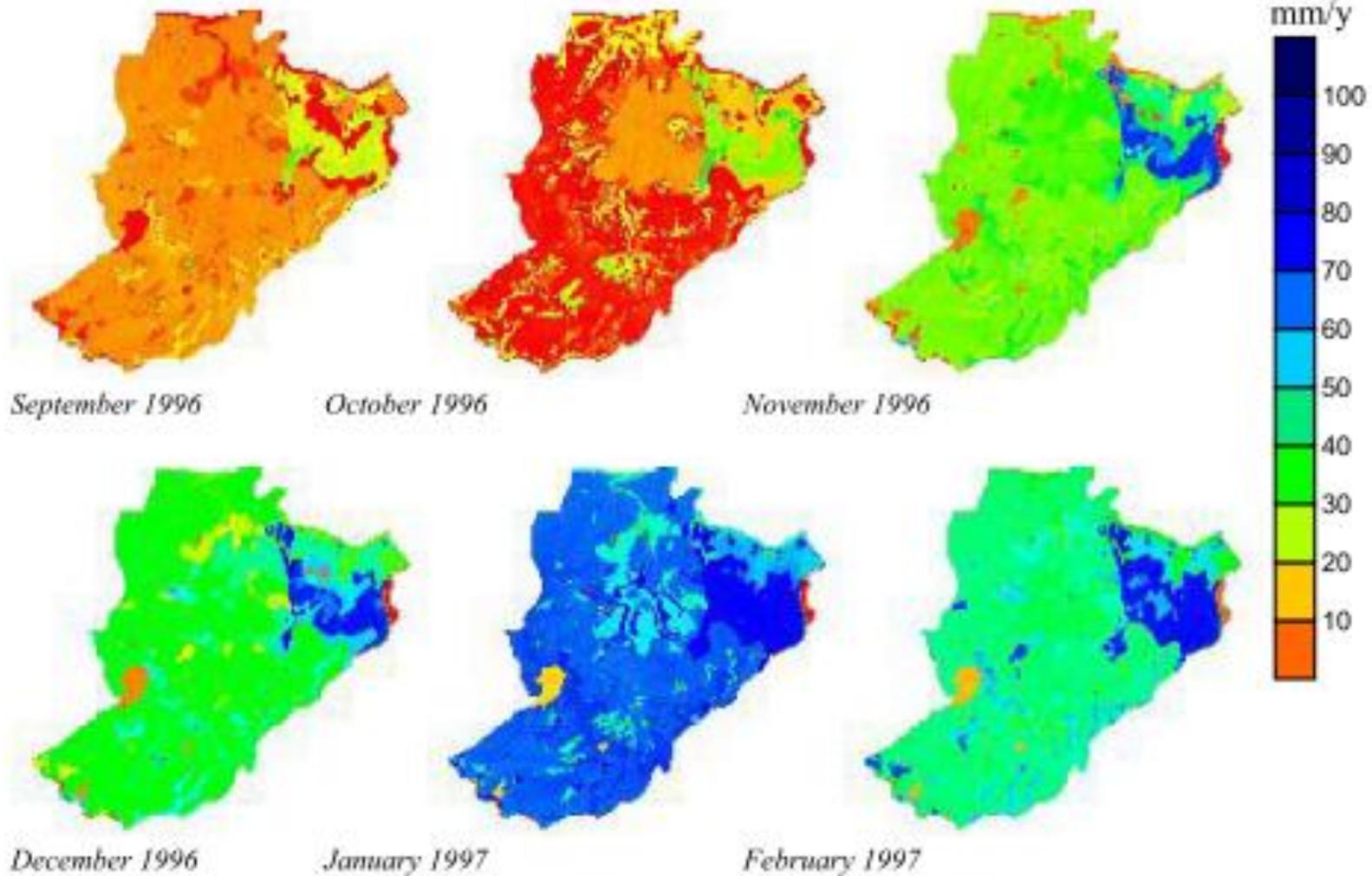
*Ansatz kann mit GIS umgesetzt werden*

---

## Annual sum of water balance element

Total Runoff	368 mm/y
Rain	1413 mm/y
Evaporation	1039 mm/y
Direct Runoff	236 mm/y
<b>Recharge</b>	<b>132 mm/y</b>
Storage Change	5 mm/y

---



## GWN über Hydrologische Bilanzen

$$\text{GWN} = \text{N} - \text{A} - \text{V} \pm \Delta S$$

**Einzugsgebietswasserbilanz**

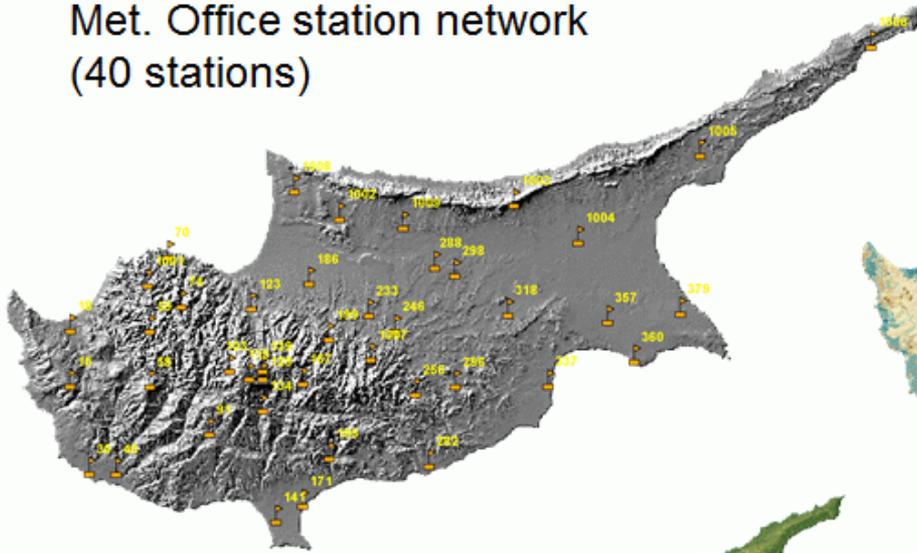
## Massenerhaltung

***Alles was hineingeht, muss wieder hinaus oder in einen Speicher.***

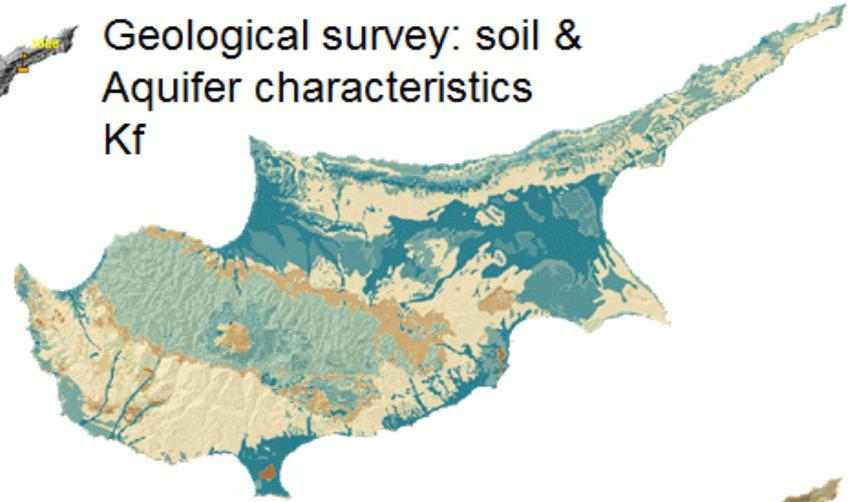
$$R = Q_{off}^{gw} - Q_{on}^{gw} + Q^{bf} + ET^{gw} + \Delta S^{gw}$$

Alles was herauskommt, muss hineingekommen sein, oder aus dem Speicher genommen werden.

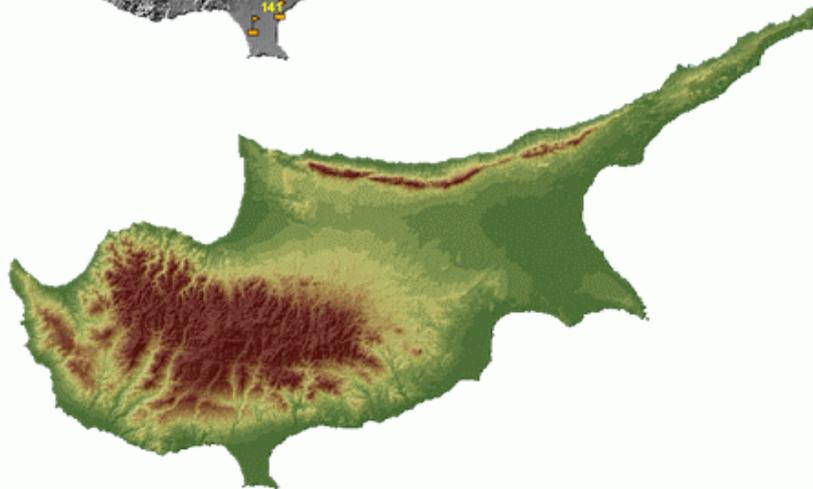
Met. Office station network  
(40 stations)

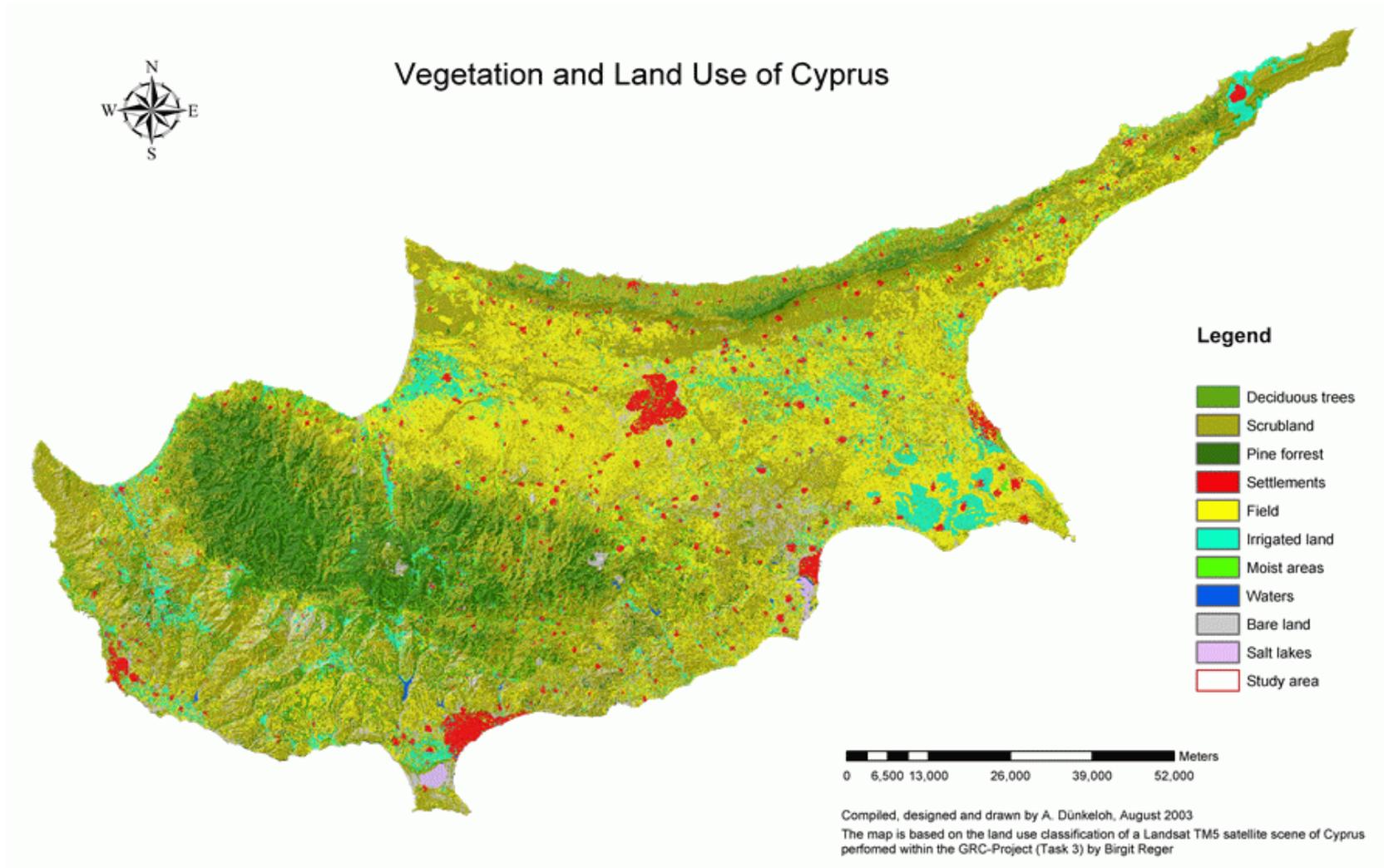


Geological survey: soil &  
Aquifer characteristics  
Kf

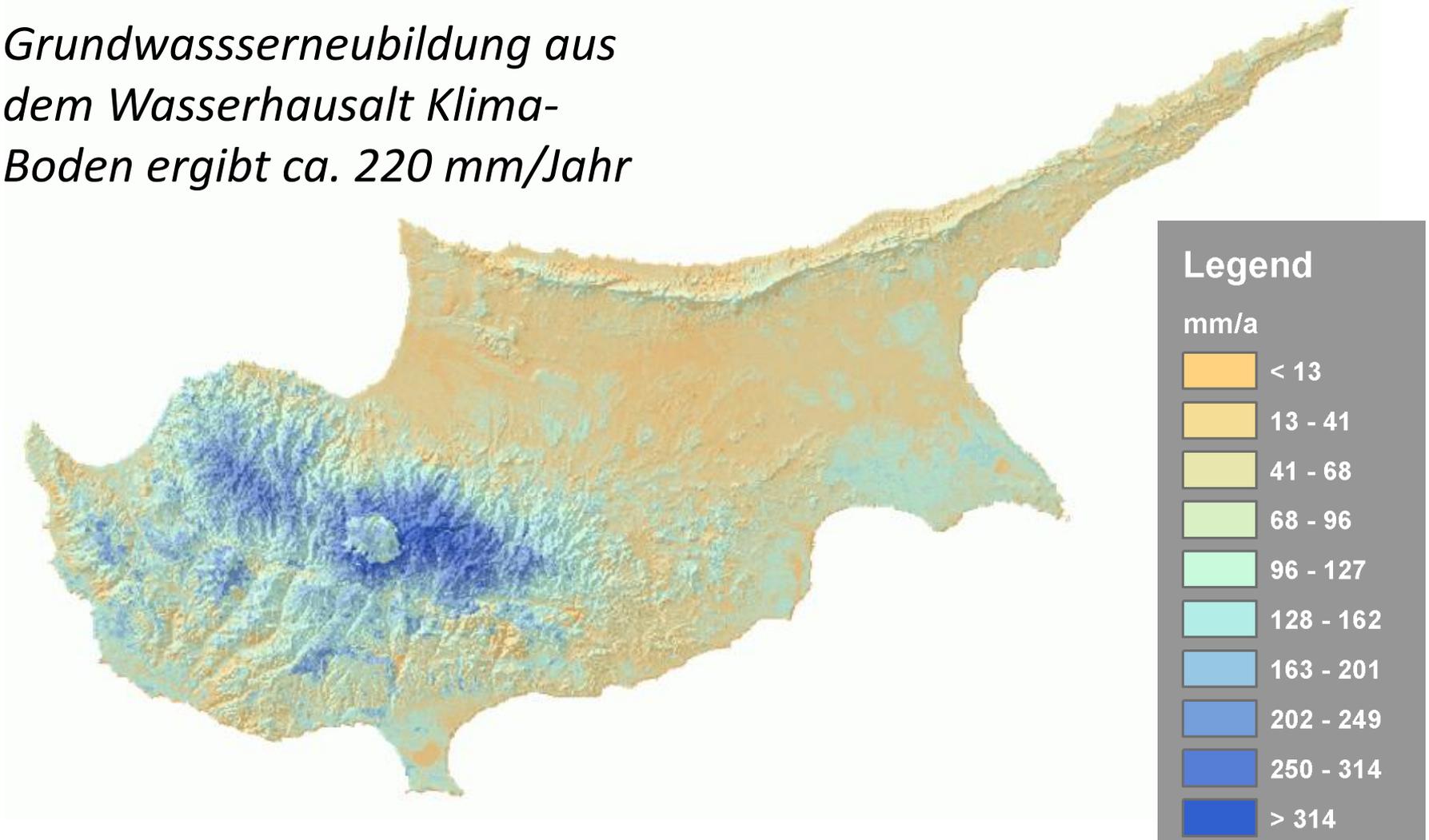


Fc

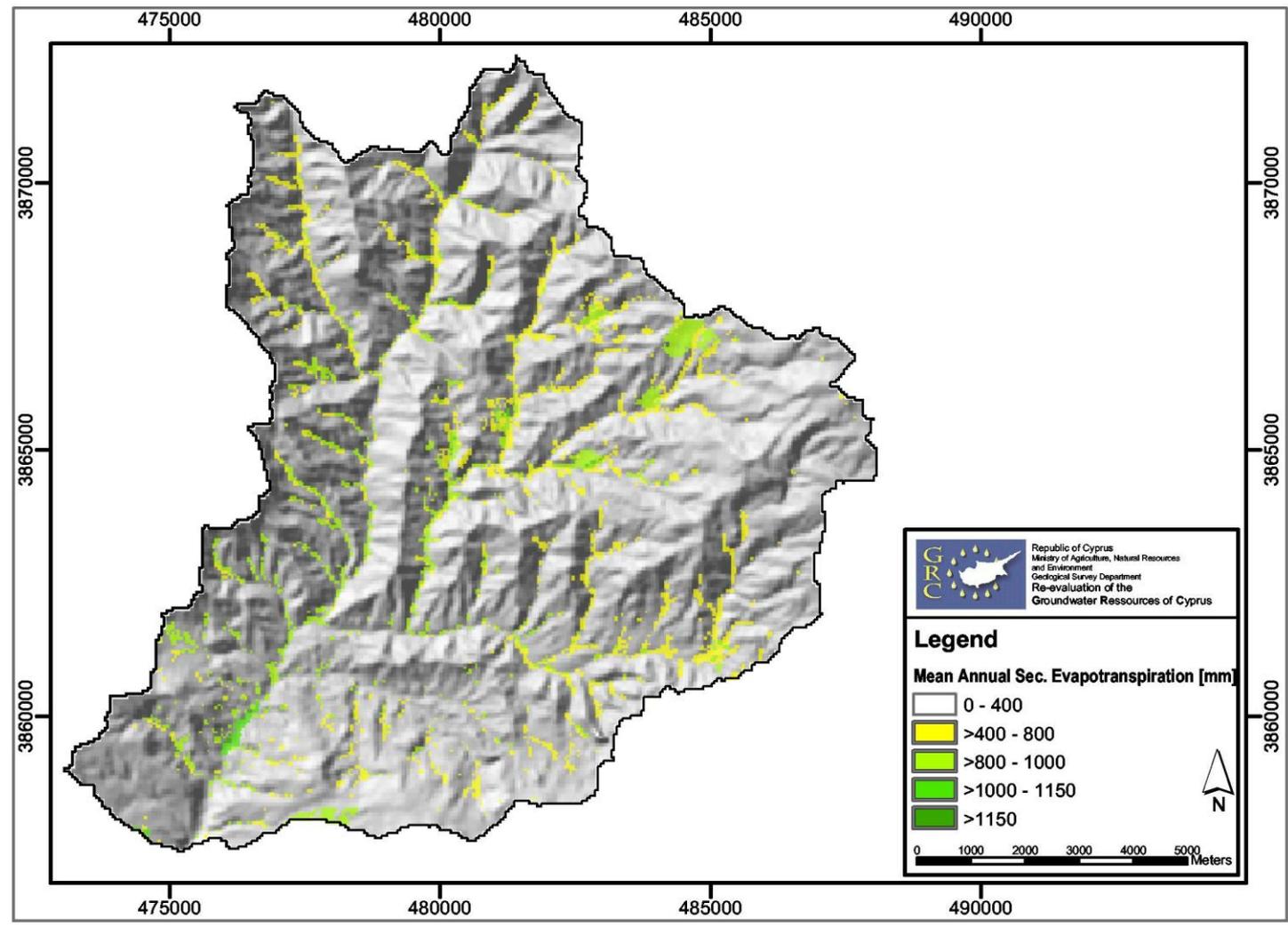




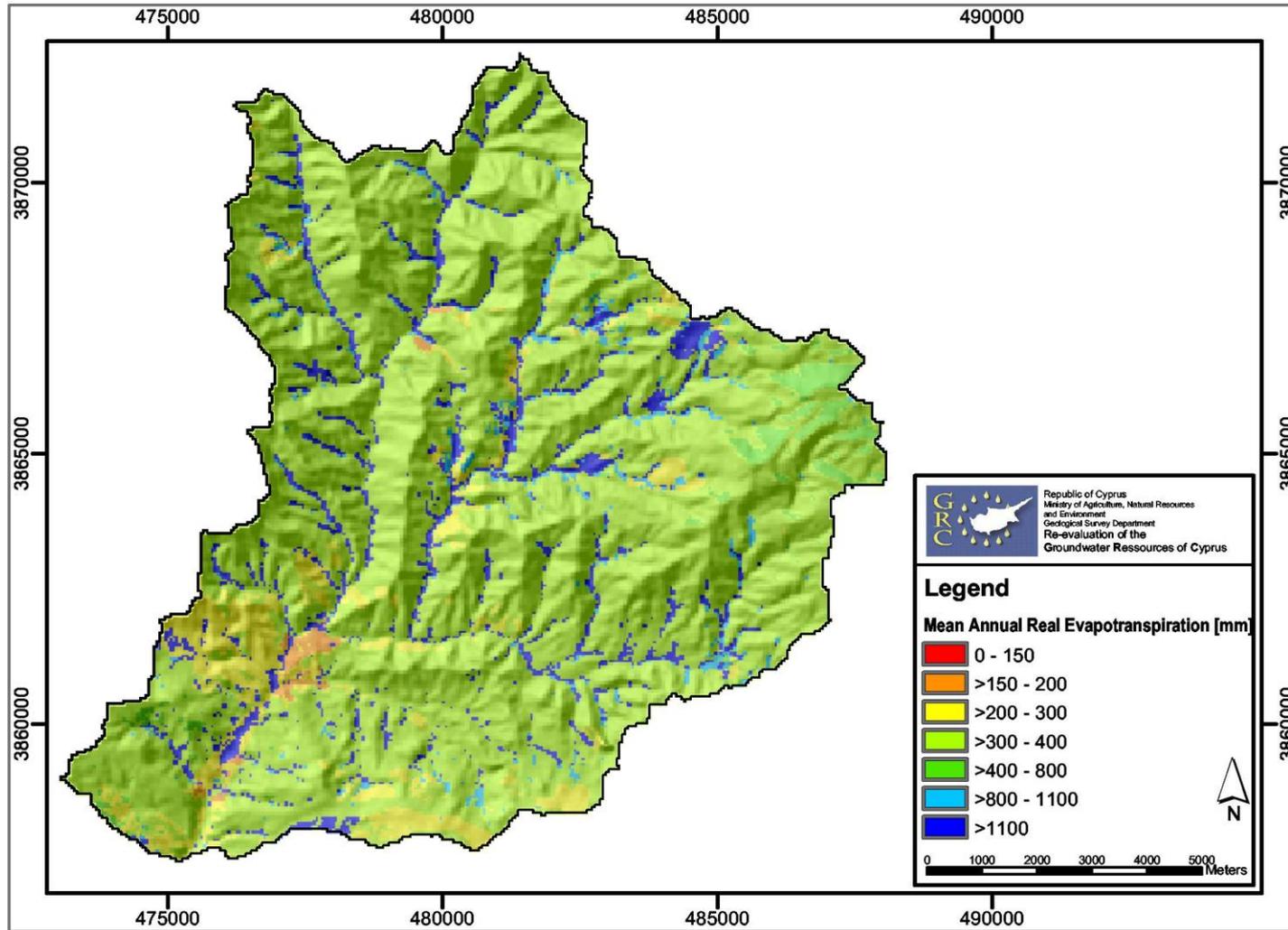
*Grundwasserneubildung aus dem Wasserhaushalt Klima-Boden ergibt ca. 220 mm/Jahr*



# Brutto und Netto: Sekundäre Verdunstung



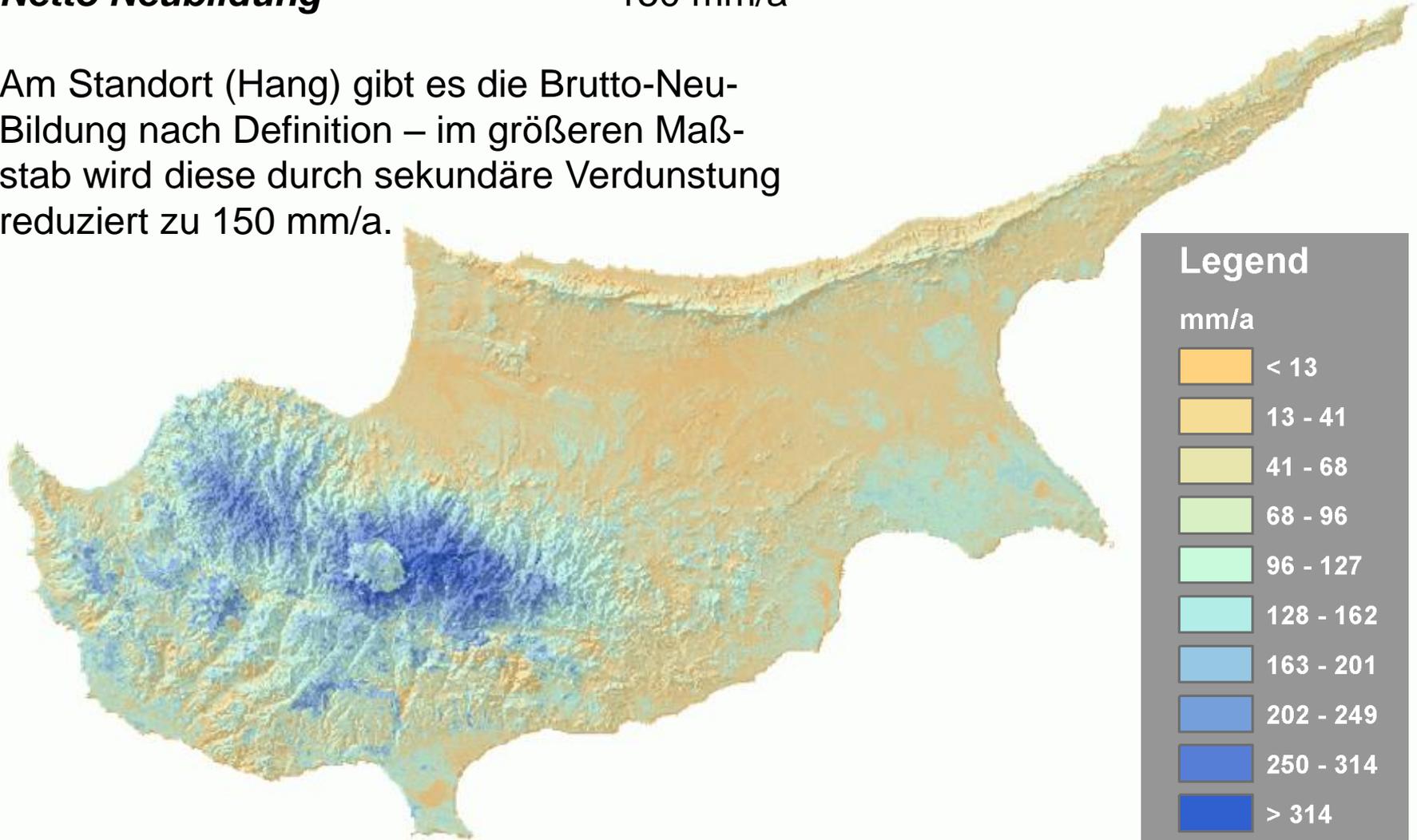
# Reale primäre und sekundäre ETa



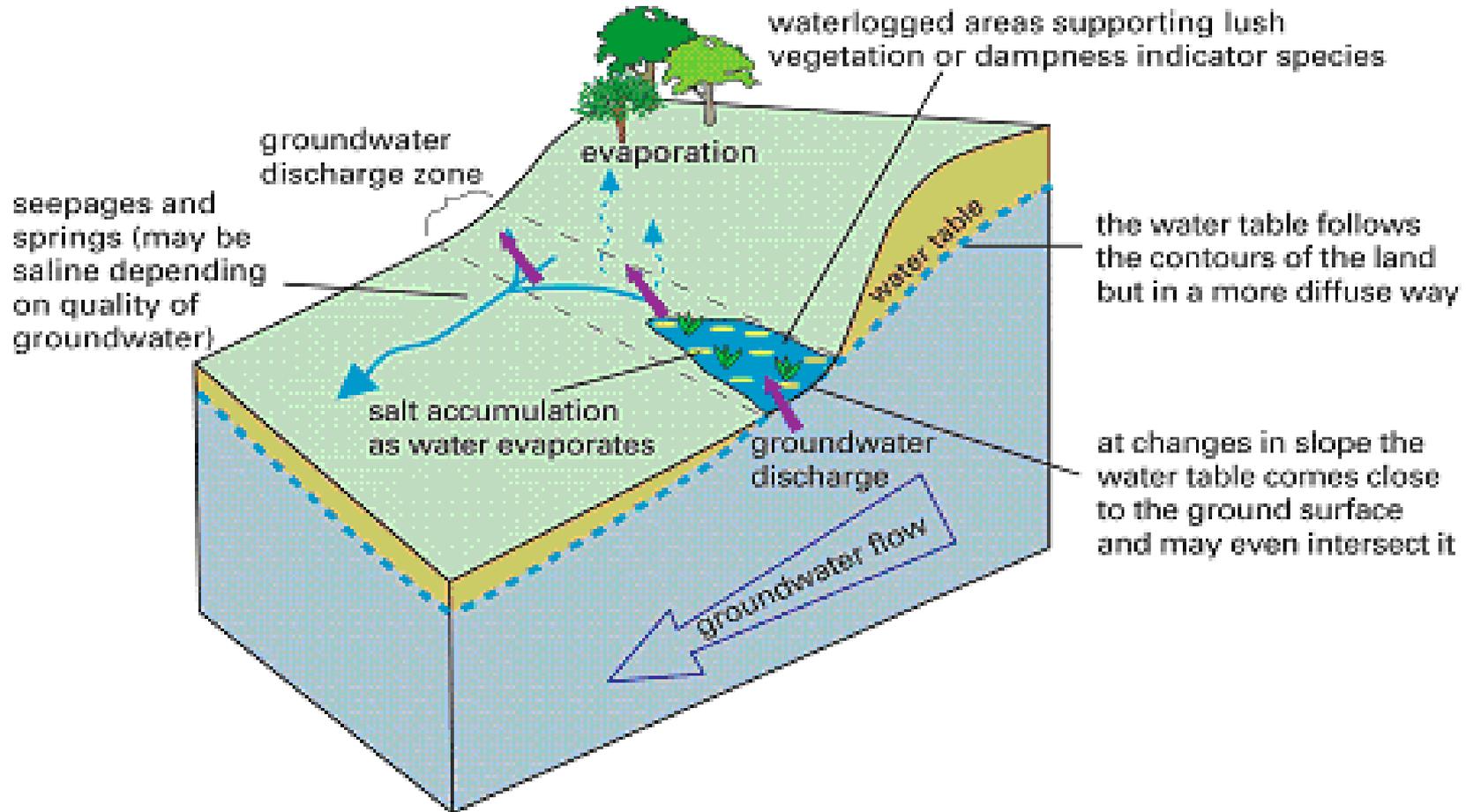
## Netto Neubildung

150 mm/a

Am Standort (Hang) gibt es die Brutto-Neubildung nach Definition – im größeren Maßstab wird diese durch sekundäre Verdunstung reduziert zu 150 mm/a.



# Fälle: ‚Abfluss‘ über Verdunstung



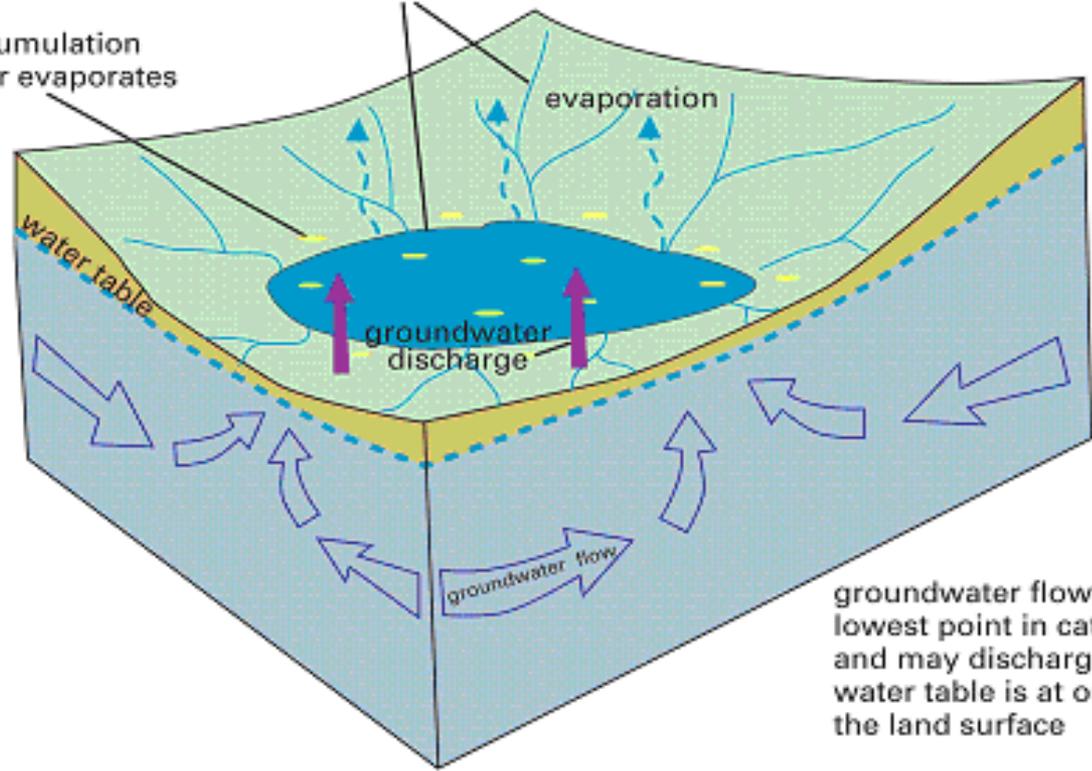
<http://www.naturalresources.nsw.gov.au>

# Sonderfall: Abflusslose Senke

all surface water drains to lowest point in catchment and may leak into the groundwater system causing water table to rise

no streams leave catchment, water can only leave by evaporation or recharge to groundwater system

salt accumulation as water evaporates



groundwater flows towards lowest point in catchment and may discharge if the water table is at or near the land surface

<http://www.naturalresources.nsw.gov.au>

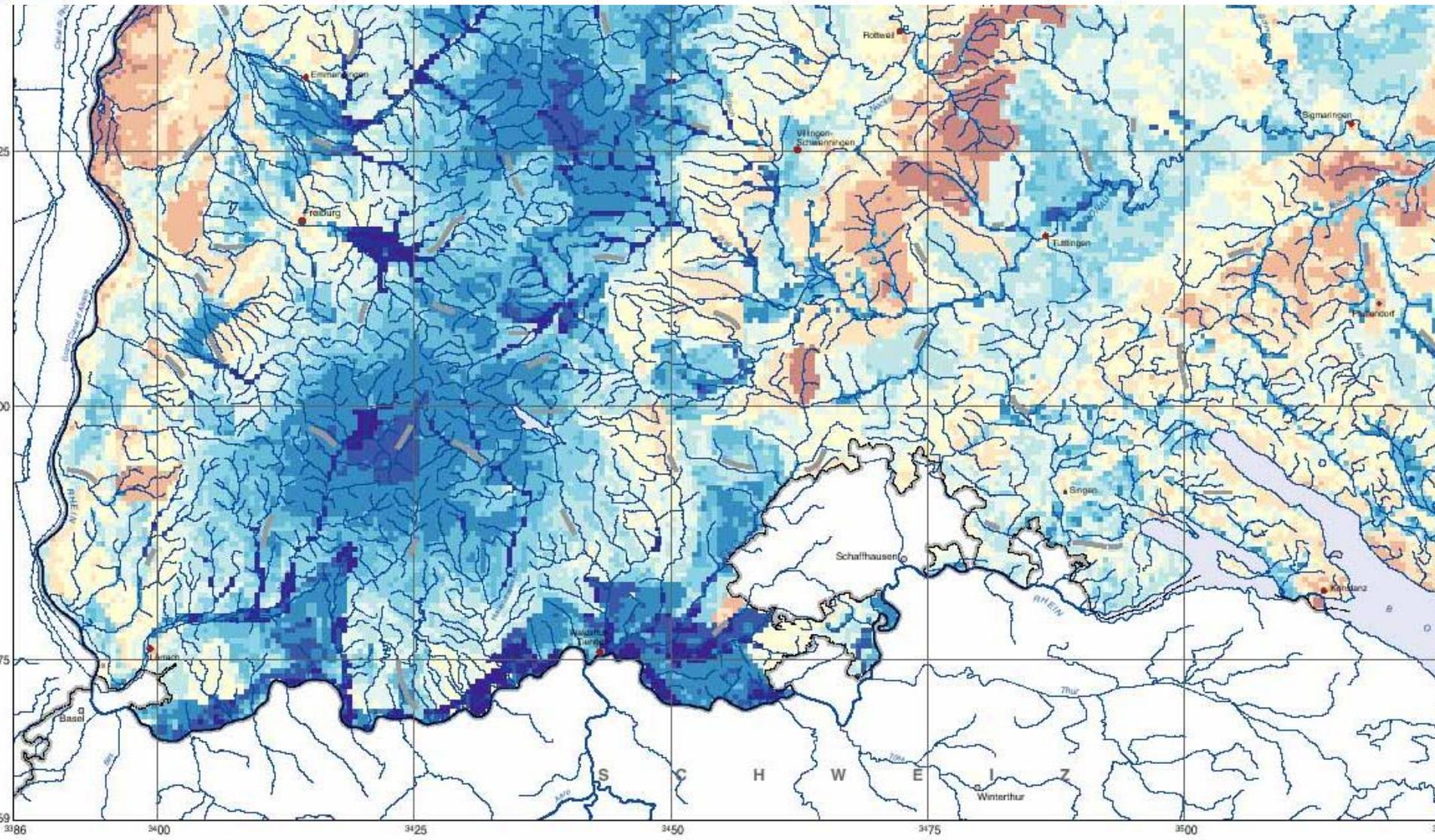
## Überprüfung mit Wasserbilanz aus den Abflüssen

$$GWN = A \pm \Delta S$$

**Überprüfung ist sehr wichtig,  
Skaleneffekte können die lokale  
Neubildung gegenüber der  
regionalen ändern:  
Abfluss  
Grundwassermodell**

Mittlere jährliche Grundwasserneubildung [mm]

# Grundwasserneubildung von Baden-Württemberg



$$\mathbf{GWN = (N - V) * (Q_{bas} / Q_{ges})}$$

*Kombination der „klimatischen Wasserbilanz (Lockergesteine) mit dem Konzept der Abflusskomponententrennung (laterale Abflüsse) für Festgesteinsflächen (indirekte GWN)*

*N = Niederschlag*

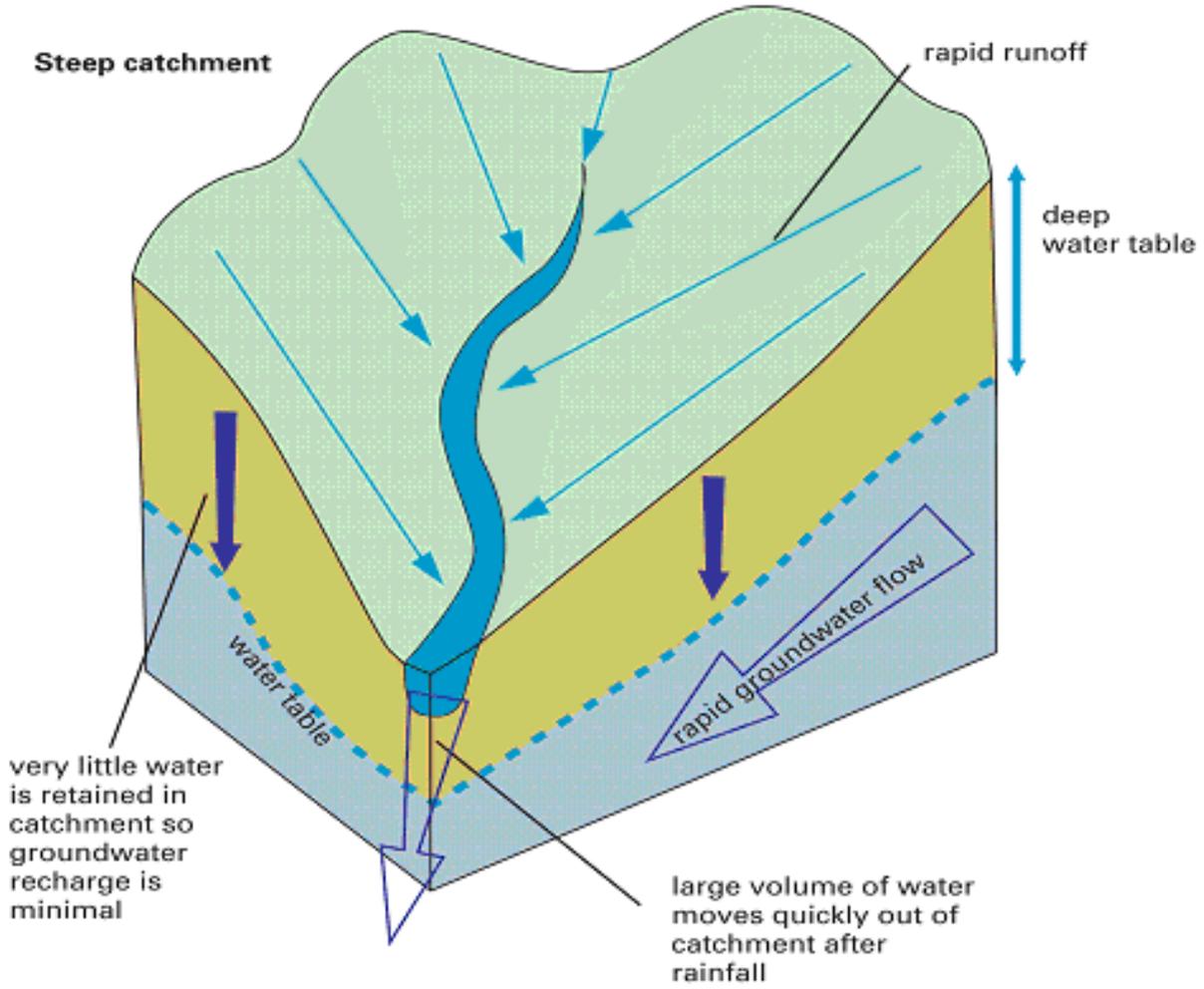
*V = aktuelle Verdunstung*

*(N-V) entspricht dem Gesamtabfluss*

*Q<sub>bas</sub> = Basisabfluss*

*Q<sub>ges</sub> = Gesamtabfluss*

# Fälle: Ober- und unterirdisches Abstrom



<http://www.naturalresources.nsw.gov.au>

$$\frac{dS}{dt} = C_1 - C_2 \cdot S(t)$$

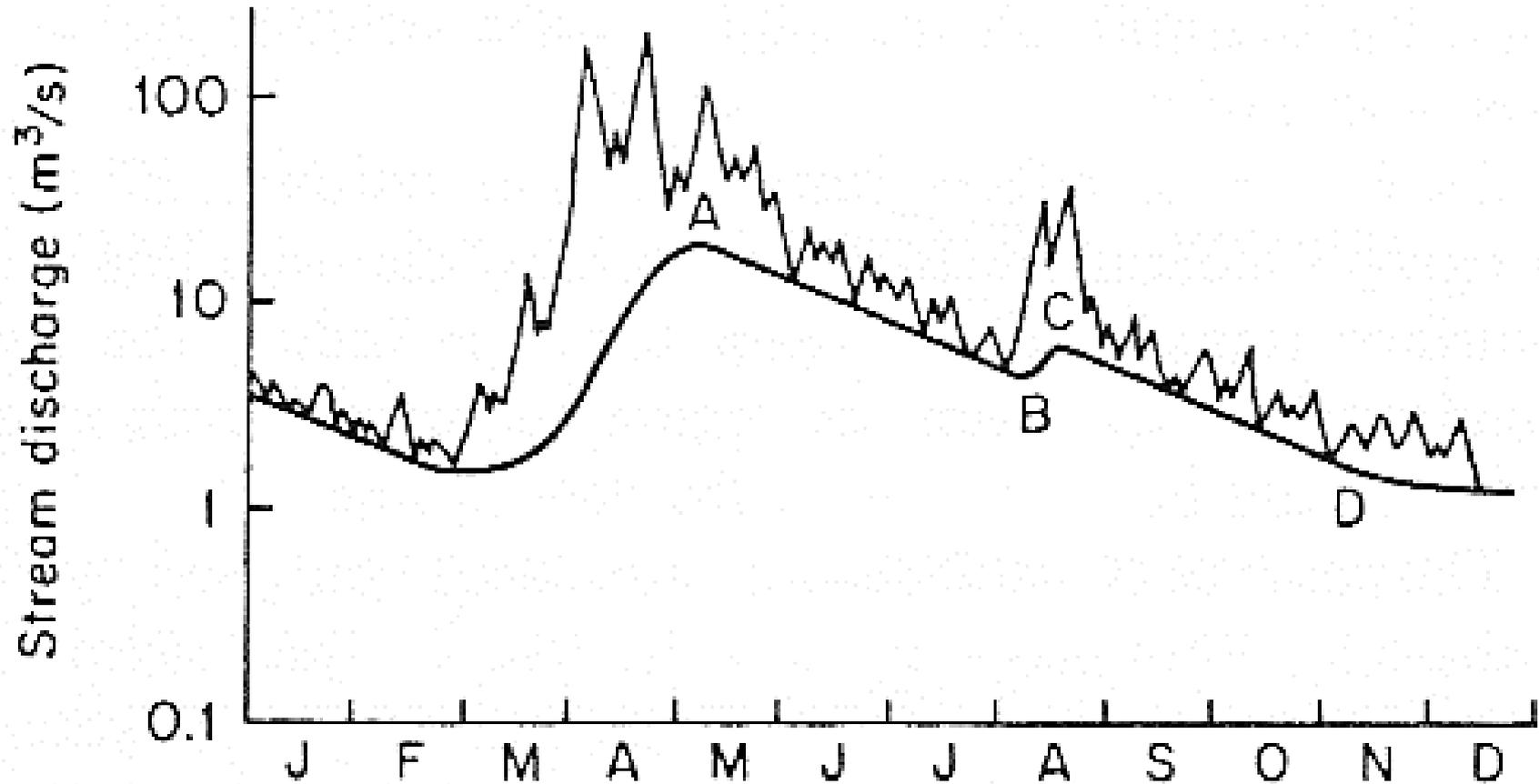
Nach MAILLET (1905) lässt sich das Leerlaufen eines Grundwasserspeichers mit der Gleichung beschreiben:

$$Q(t_0 + t) = Q_0 e^{-\alpha t}$$

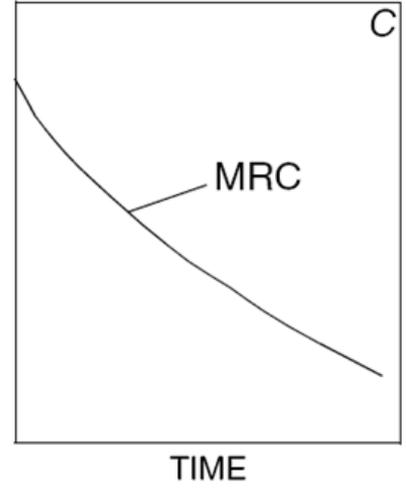
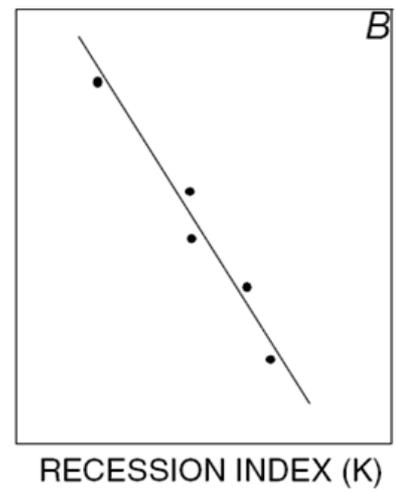
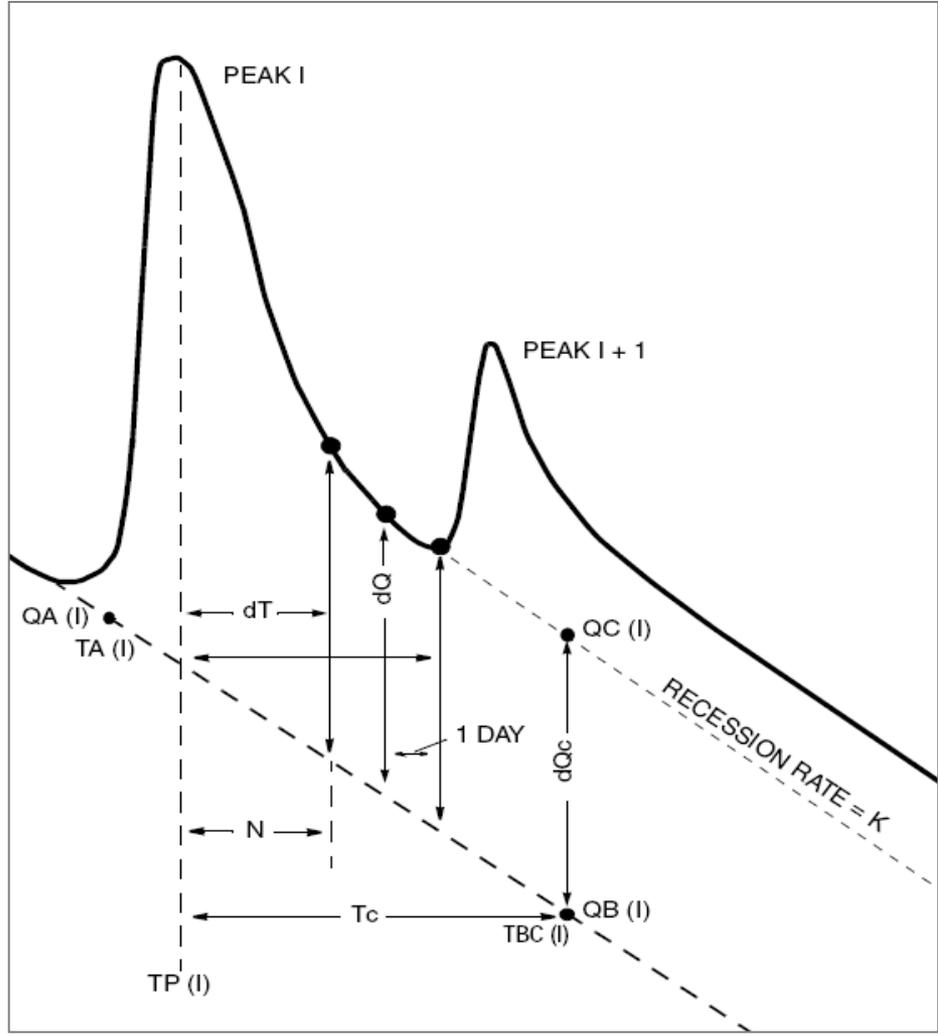
mit  $Q_0$  = Schüttung zur Zeit  $t_0$ ,  $Q(t_0 + t)$  = Schüttung zur Zeit  $t_0 + t$ , und  $e$  = Basis des Logarithmus naturalis. Der Leerlaufkoeffizient  $\alpha$  lässt Rückschlüsse auf die bei einer gegebenen Quellschüttung  $Q$  noch abflussfähige Grundwassermenge (Grundwasservorrat)  $Q_s$  zu:

$$Q_s = \frac{Q}{\alpha}$$

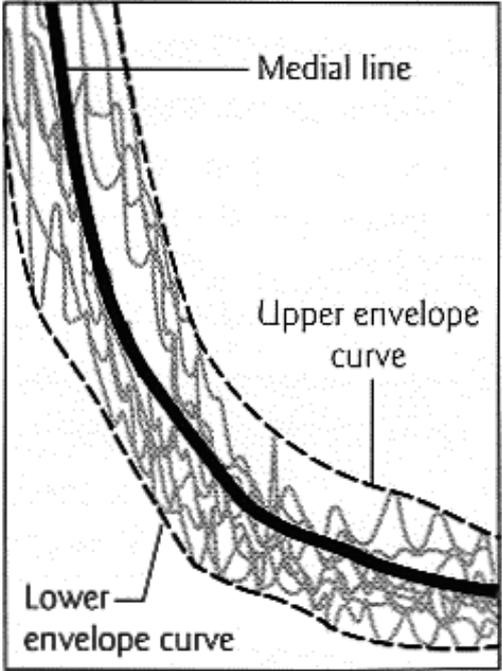
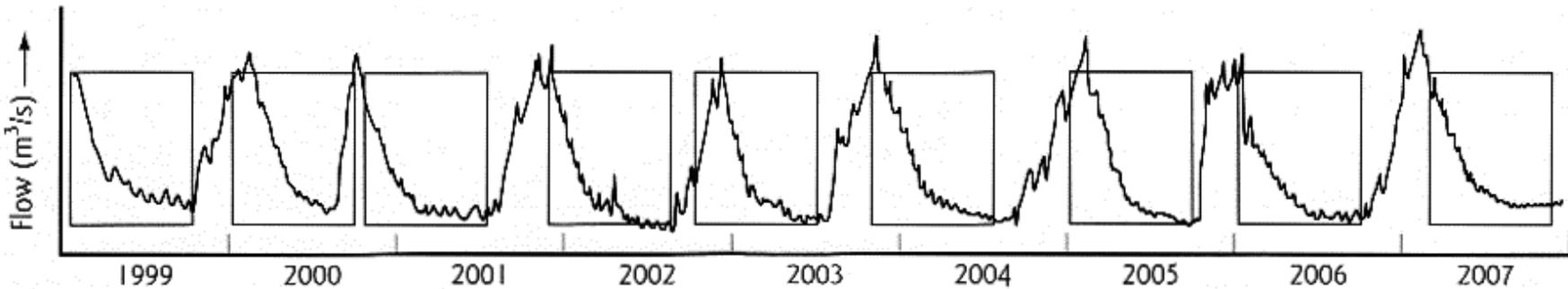
# Hypothese: Fläche ist bestimmbar



# Linearisieren der Rezession



# Linearisieren der Rezession



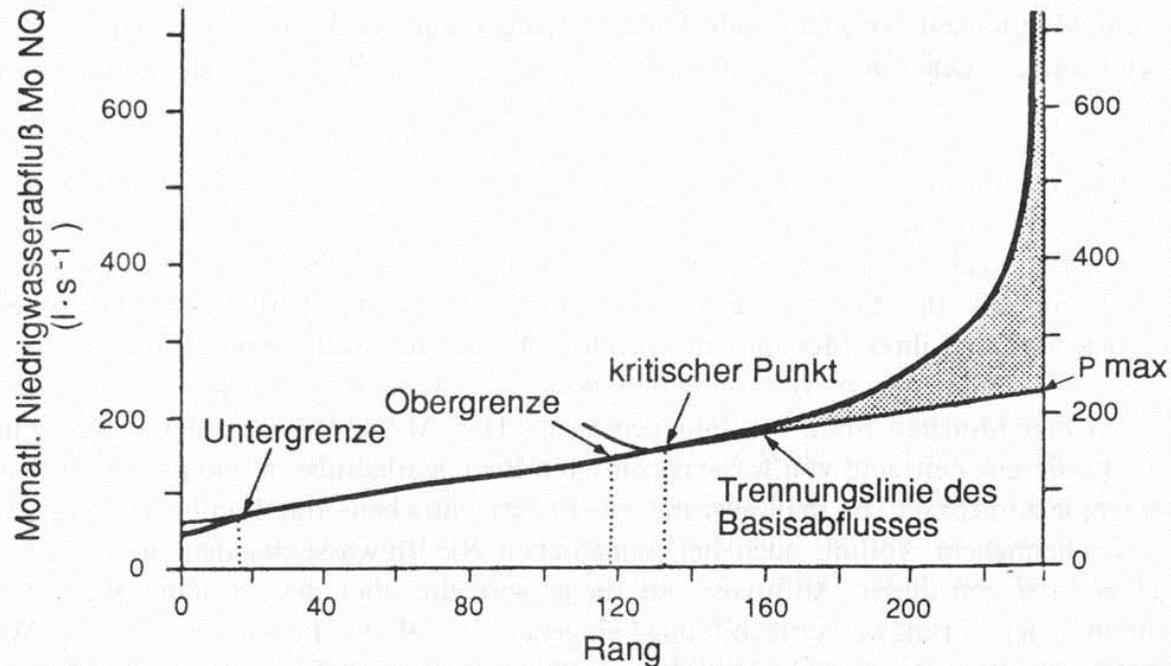
Adopt medial line as "master baseflow recession curve", and use it to separate other hydrograph periods

Fit exponential equations to the curves ( $Q = Q_0 e^{-at}$ ) and use to predict flows in dry periods

## Mittlerer jährlicher Basisabfluss / Mittleren jährlichen Abfluss

Aquifer lithology	General <i>T</i> and <i>S</i> characteristics of aquifer	BFI (typical range)
<b>i: Unconsolidated sedimentary aquifers (permeability almost wholly intergranular)</b>		
Gravel (well sorted)	<i>T</i> and <i>S</i> both very high	0.95–1.00
Sand (well sorted)	<i>T</i> moderate, <i>S</i> very high	0.85–0.95
Sands and gravels (poorly sorted)	<i>T</i> moderate, <i>S</i> moderate	0.60–0.80
Silt or mud	<i>T</i> and <i>S</i> both low/very low	0.15–0.45
<b>ii: Bedrock aquifers with fracture permeability only</b>		
Karstified rocks (limestone/gypsum)	<i>T</i> very high, <i>S</i> low	0.75–1.00
Thoroughly jointed limestones (negligible drainable intergranular porosity; not heavily karstified)	<i>T</i> high to moderate, <i>S</i> low	0.80–0.98
Basaltic volcanics containing unfilled lava tubes and open joints	<i>T</i> high, <i>S</i> low	0.60–0.90
Nonbasaltic volcanics, and cemented basaltic volcanics	<i>T</i> moderate to low, <i>S</i> low	0.40–0.70
Heavily cemented sandstones/ limestones/volcanic rocks	<i>T</i> and <i>S</i> both low	0.30–0.55
Mudstones and siltstones	<i>T</i> and <i>S</i> both very low	0.15–0.40
Plutonic and metamorphic rocks	<i>T</i> and <i>S</i> both very low	0.30–0.50
<b>iii: Bedrock aquifers with both intergranular and fracture permeability</b>		
Coarse-grained sandstones (pores not occluded by cements)	<i>T</i> moderate, <i>S</i> moderate to high	0.70–0.80
Oolitic limestones (nonkarstified) and other limestones with large primary pores	<i>T</i> moderate to high, <i>S</i> moderate	0.85–0.95

Der Niedrigwasserabfluss ist vom Speicherverhalten beeinflusst. Aus den **MoNQ-Werten**, den Minima der monatlichen Abflüsse kann das Speicherverhalten eines Einzugsgebietes ermittelt werden.



*Hierfür werden die MoNQ-Werte der Reihe nach aufsteigend geordnet.*

*Danach wird der Median bestimmt.*

*Je flacher die Kurve im mittleren Bereich verläuft, desto besser ist das Speichervermögen.*

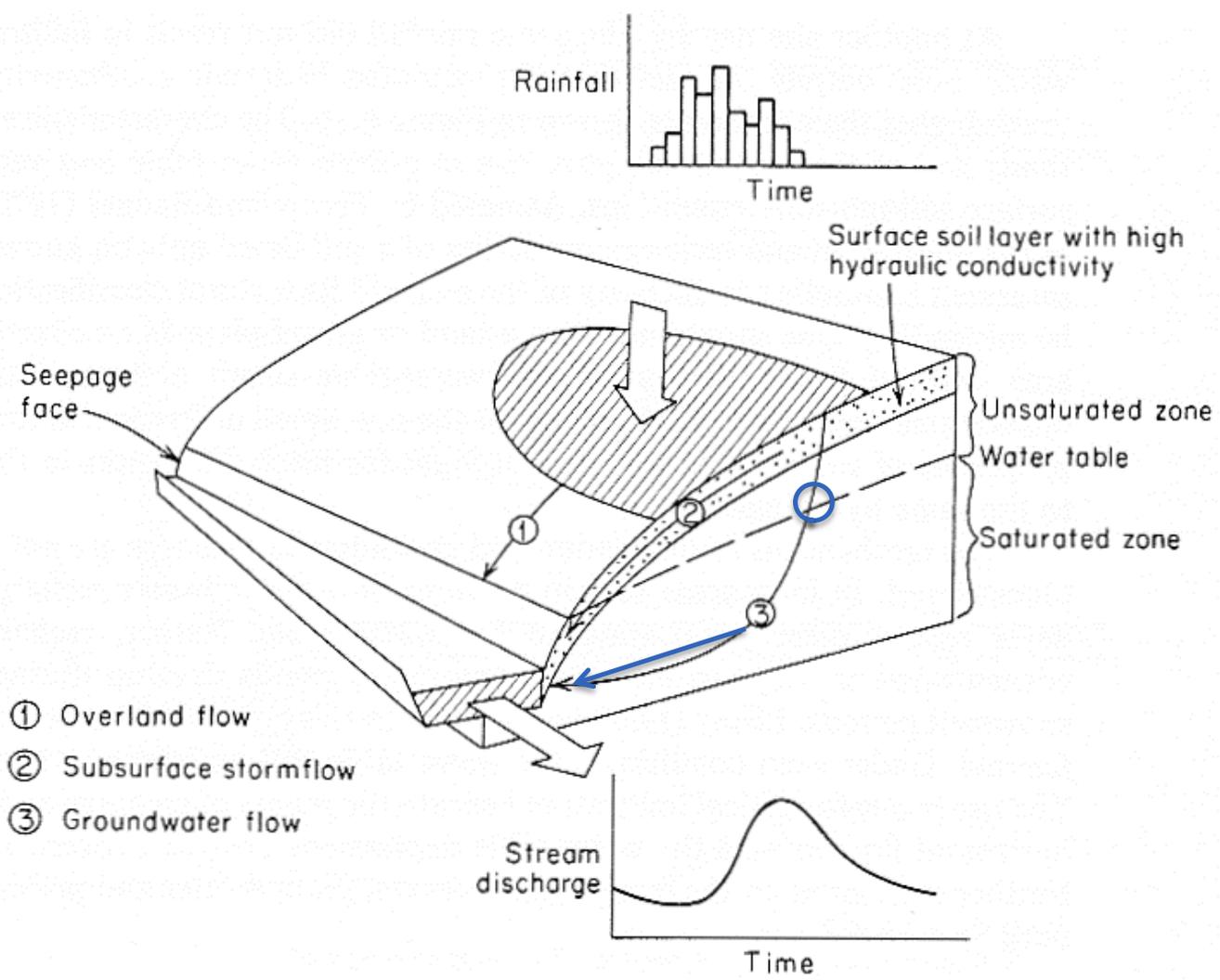
*Der Median entspricht ungefähr der mittleren Grundwasserneubildung*

$$Q = \frac{1.866 AR_i}{K} \times \int_{m=1,3,5\dots}^{\infty} e^{-0.933m^2\pi^2t/(4K)}$$

<b>R</b>	<b>Recharge</b>
K	<i>recession index, berechnet aus einer 'critical time' bei der der Recharge = ½ dem Peak</i>
A	<i>Size of the basin [km<sup>2</sup>]</i>
S	<i>Speicherkoeffizient [-]</i>
m	<i>Index</i>
t	<i>Zeit [s]</i>

Rutledge, A.T., 1997, Model-estimated ground-water recharge and hydrograph of ground-water discharge to a stream: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 97-4253, 29 p.

# Chemische Ganglinienseparation

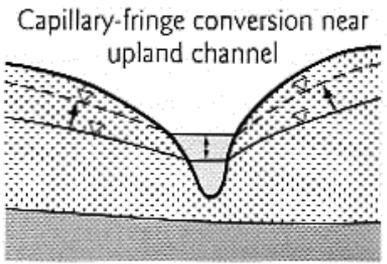
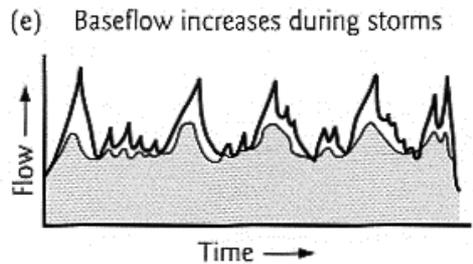
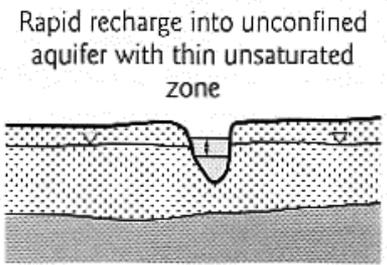
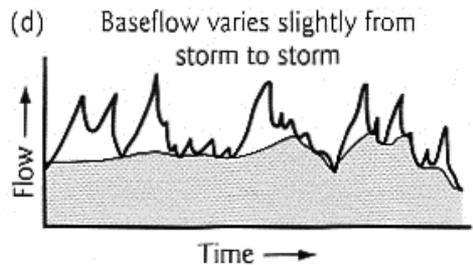
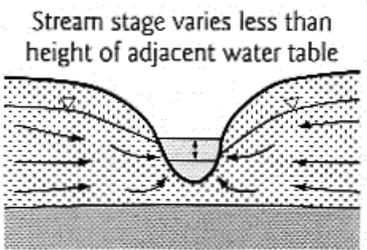
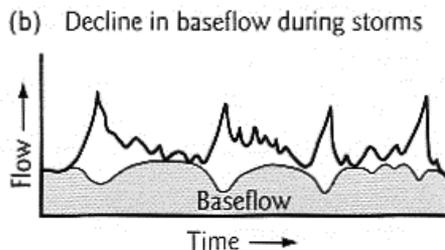
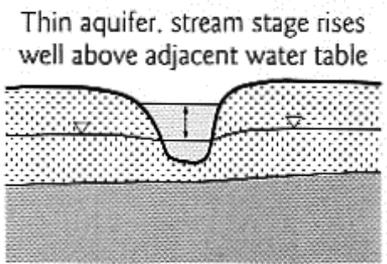
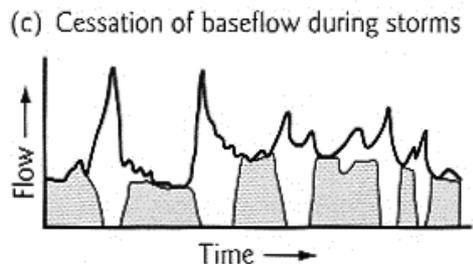
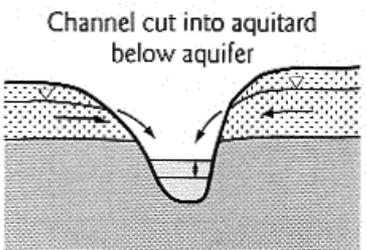
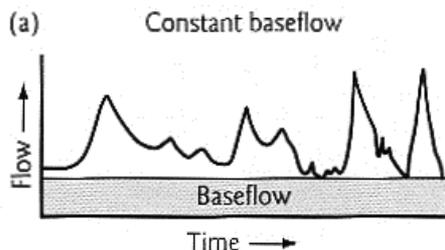


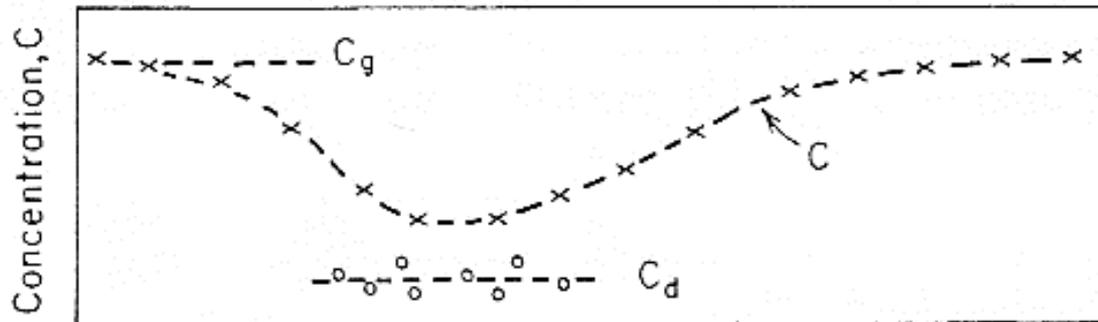
$$q = 2T \frac{h_0}{a} \int_{m=1,3,5\dots}^{\infty} e^{-m^2 \pi^2 T t / (4 a^2 S)}$$

$T$	Transmissivität [ $m^2/s$ ]
$h_0$	Anstieg des Wasserspiegels [ $m$ ]
$a$	Abstand vom Fluss zur Wasserscheide [ $m$ ]
$S$	Speicherkoeffizient [ $m^3/m^3$ ] *=[-]
$m$	Index [-]
$T$	Zeit [ $s$ ]
$q$	Abfluss pro Längeneinheit Flusslänge [ $m^3/s * 1/m$ ]

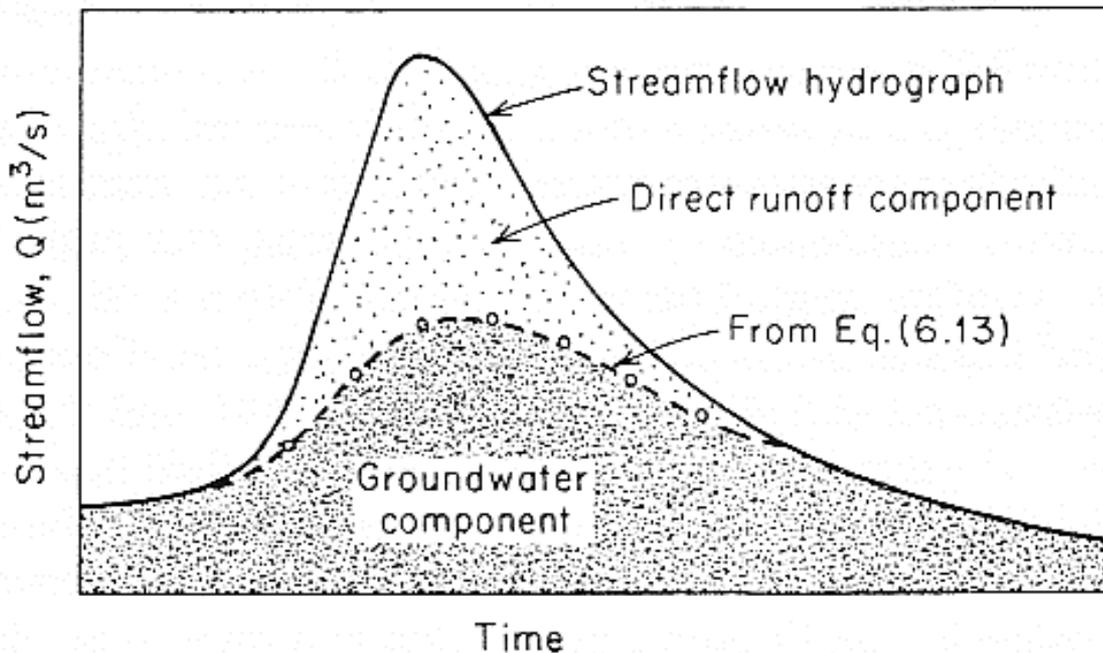
Rorabaugh, M.I., 1964, Estimating changes in bank storage and ground-water contribution to streamflow: International Association of Scientific Hydrology, Publication 63, p. 432-441.

# Prozessorientierte Sicht des Basisabflusses



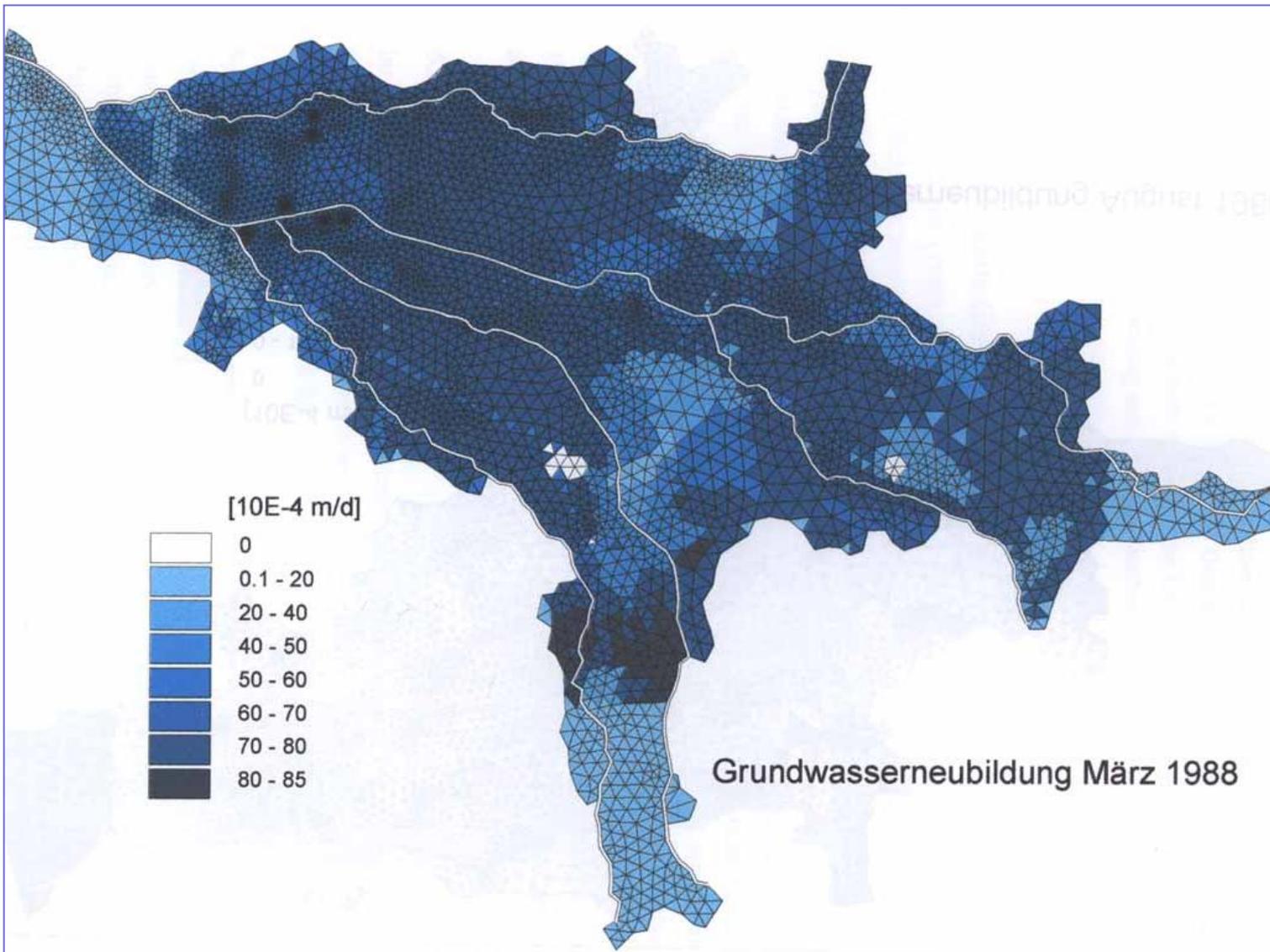


$$Q_g = Q \left( \frac{C - C_d}{C_g - C_d} \right)$$



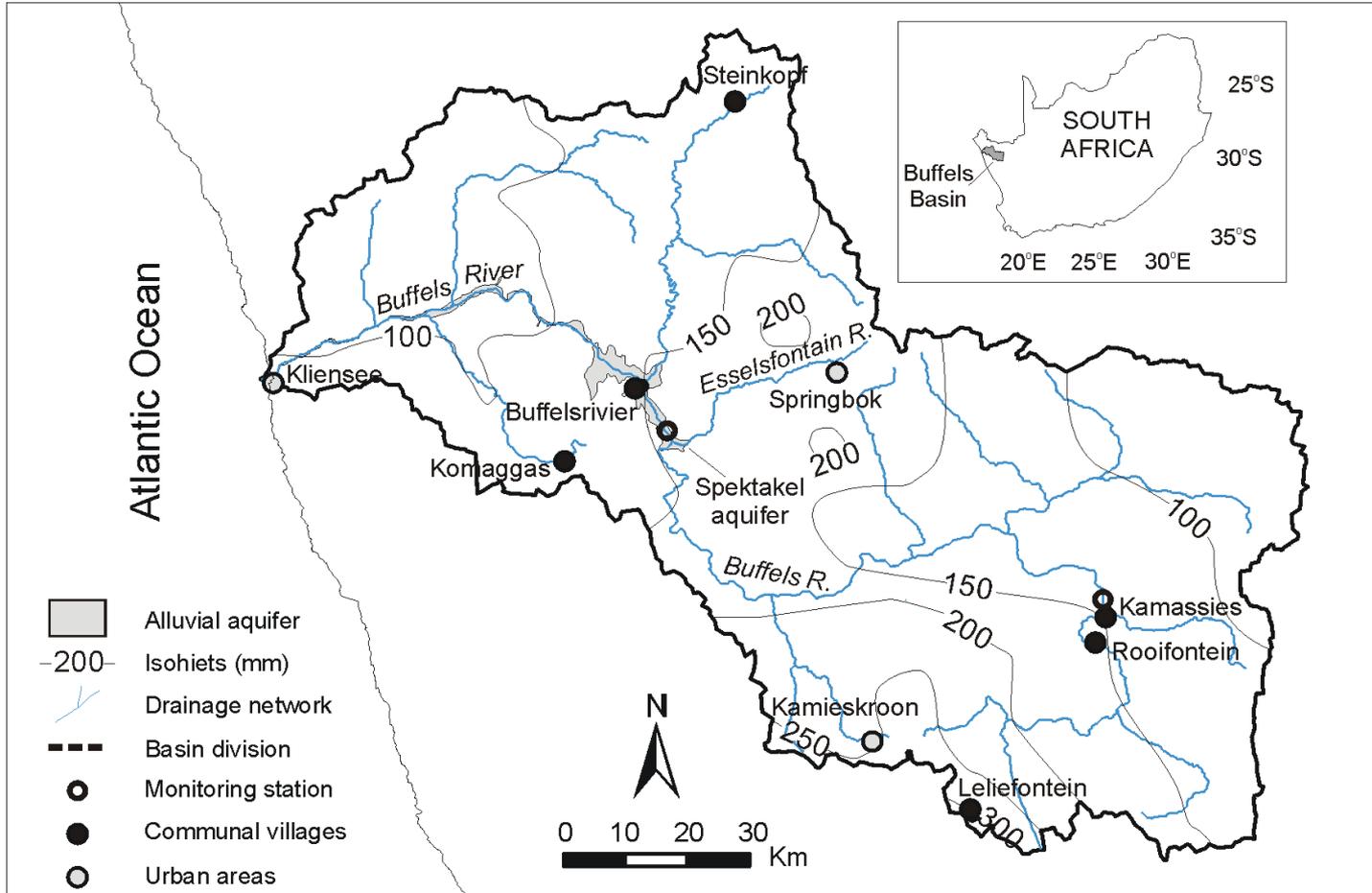
*Bestimmung des Basisabflusses durch die Veränderung einer chemischen Signatur als Mischung zweier Wassertypen.*

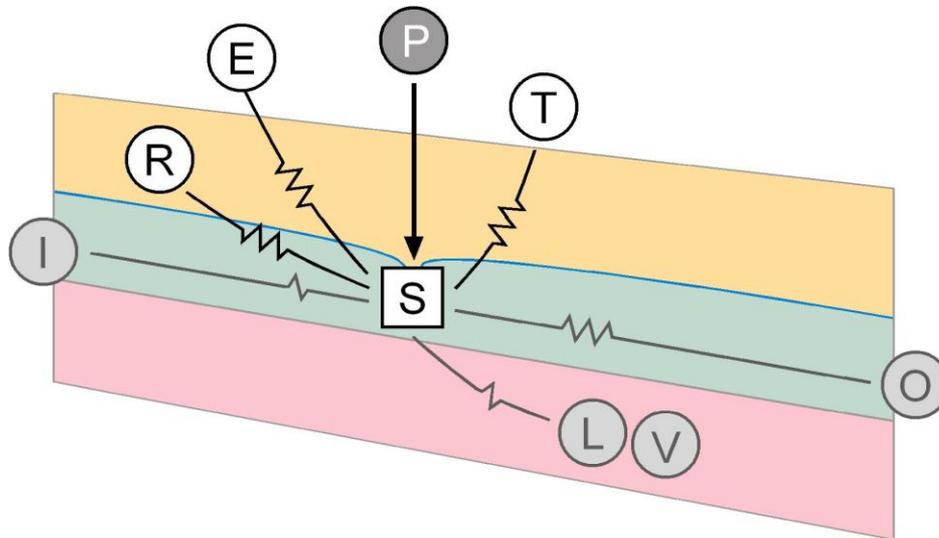
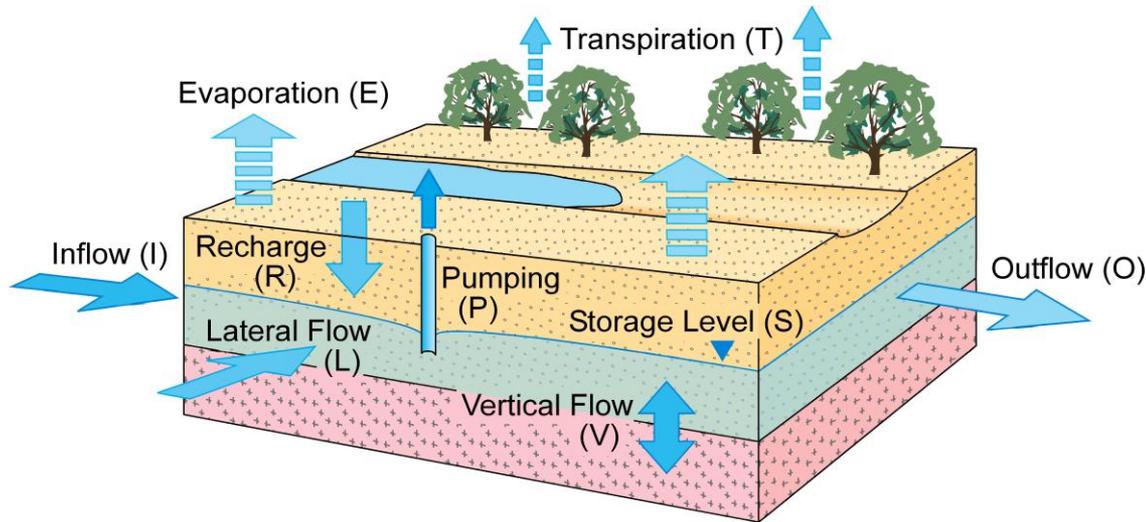
## Grundwassermodelle zur Bestimmung der Grundwasserneubildung



# Neubildung in einem semi-ariden Gebiet

*Direkte Neubildung über den Wasserhaushalt schwer zu bestimmen,  
Es bildet sich Abfluss, der in Flussbetten versickert.*



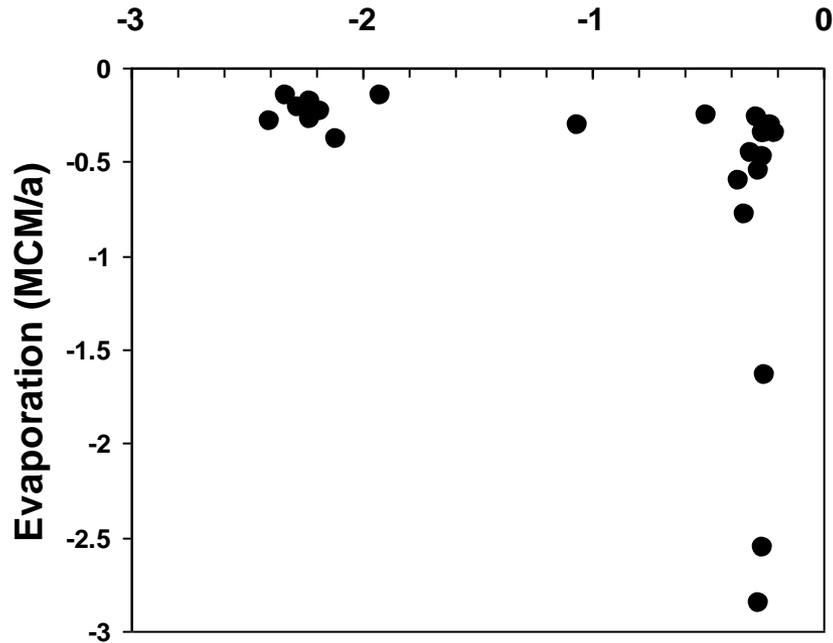


## Alluviale Aquifere und ihre Regulierung des Wasserhaushaltes

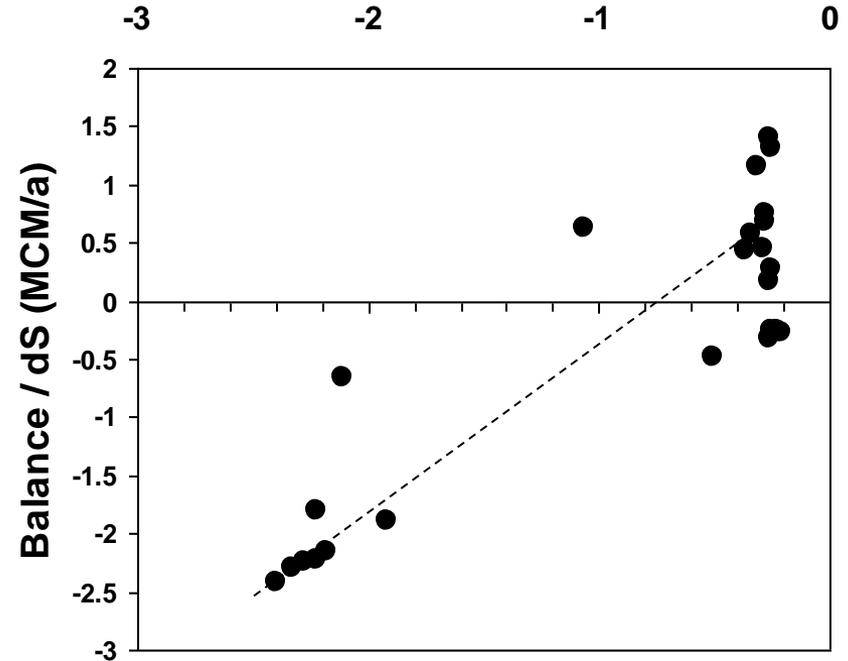
Pumpen wirkt auf die Evaporation (E), Transpiration (T), Neubildung (T), den Speicher (S), den Zu- und Abfluss und die lateralen (L) und vertikalen Flüsse (V).

Benito et al., 2008: Comparing flood recharge dynamics in two ephemeral rivers in southern Africa: Implications for Integrated Water Resource Management. *Water Research (subm.)*

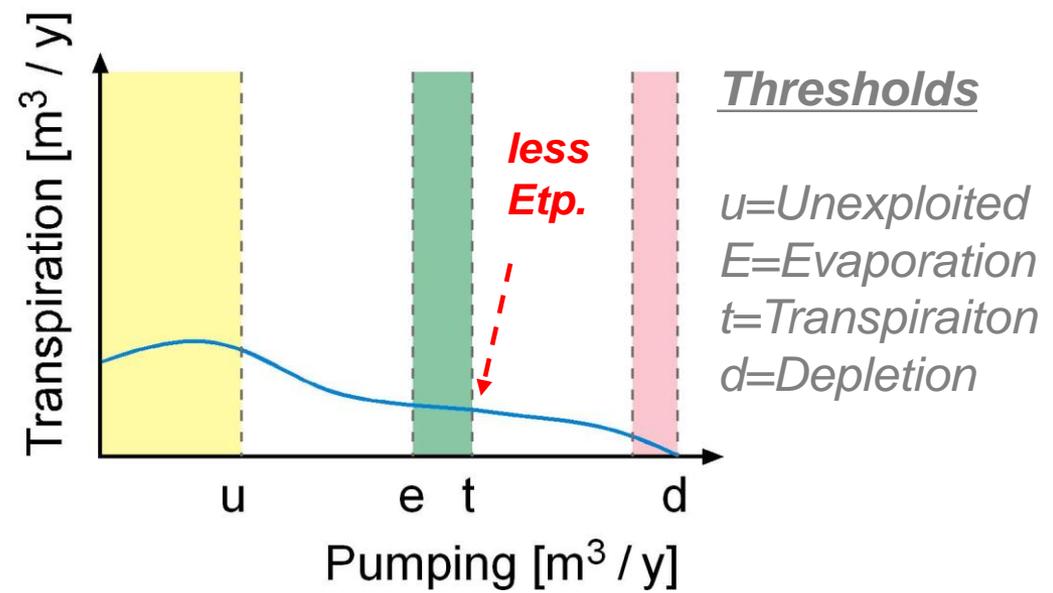
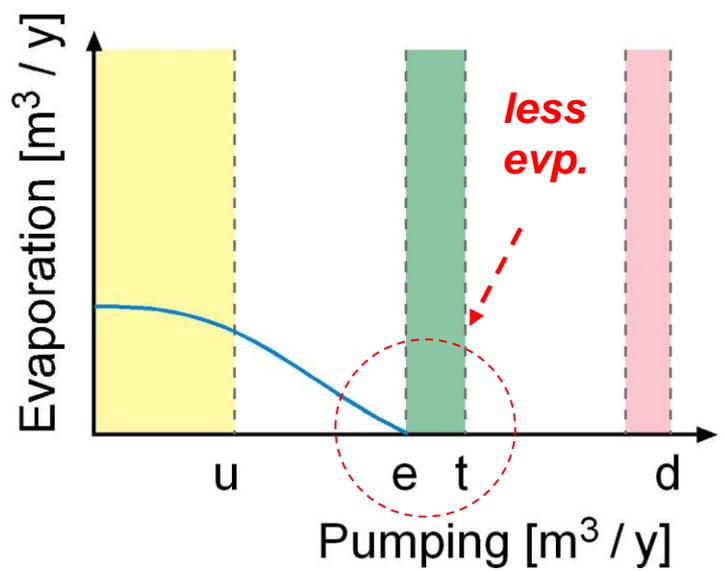
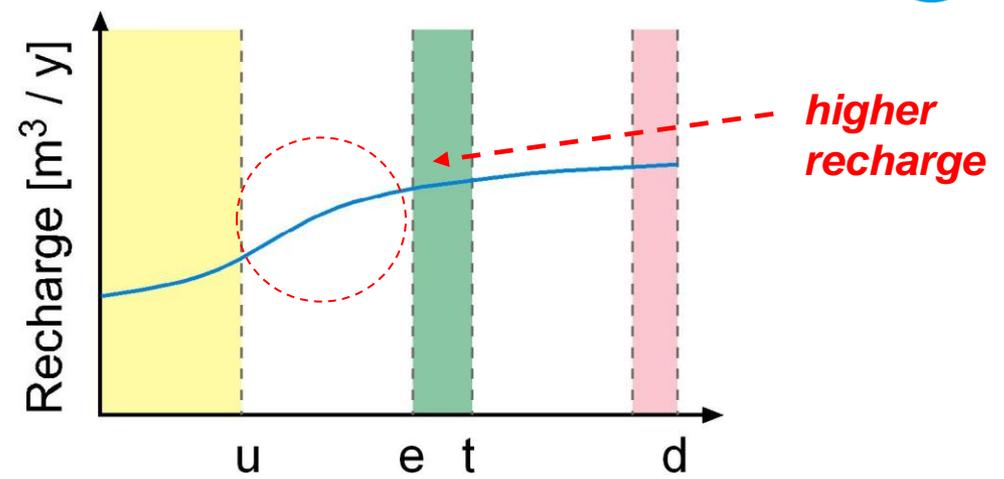
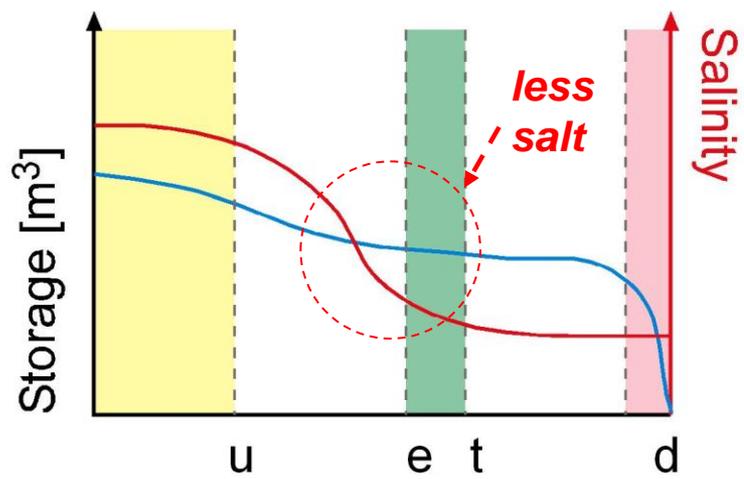
Pumping (MCM/a)



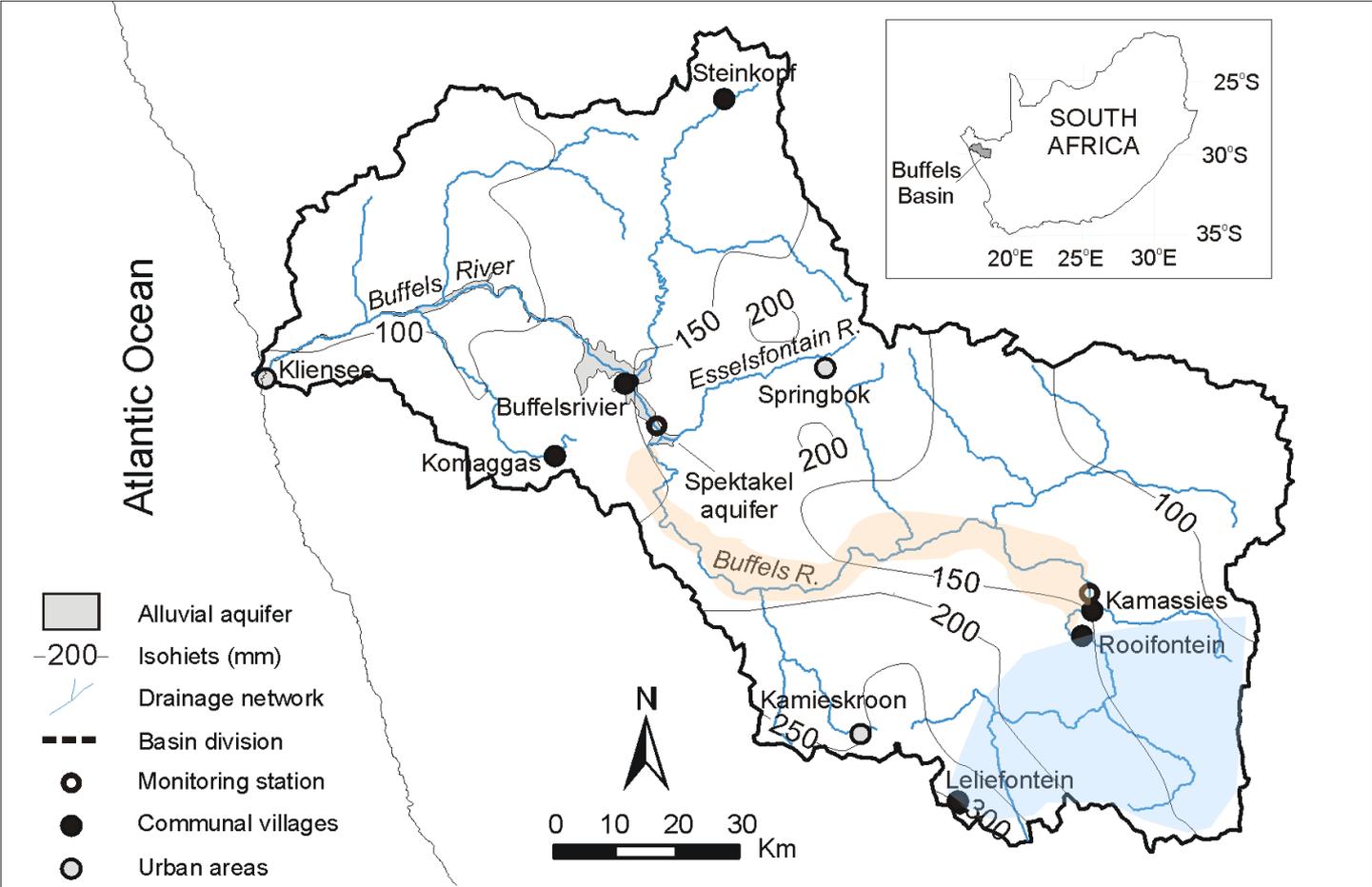
Pumping (MCM/a)



# Use it or loose it ... ! ?

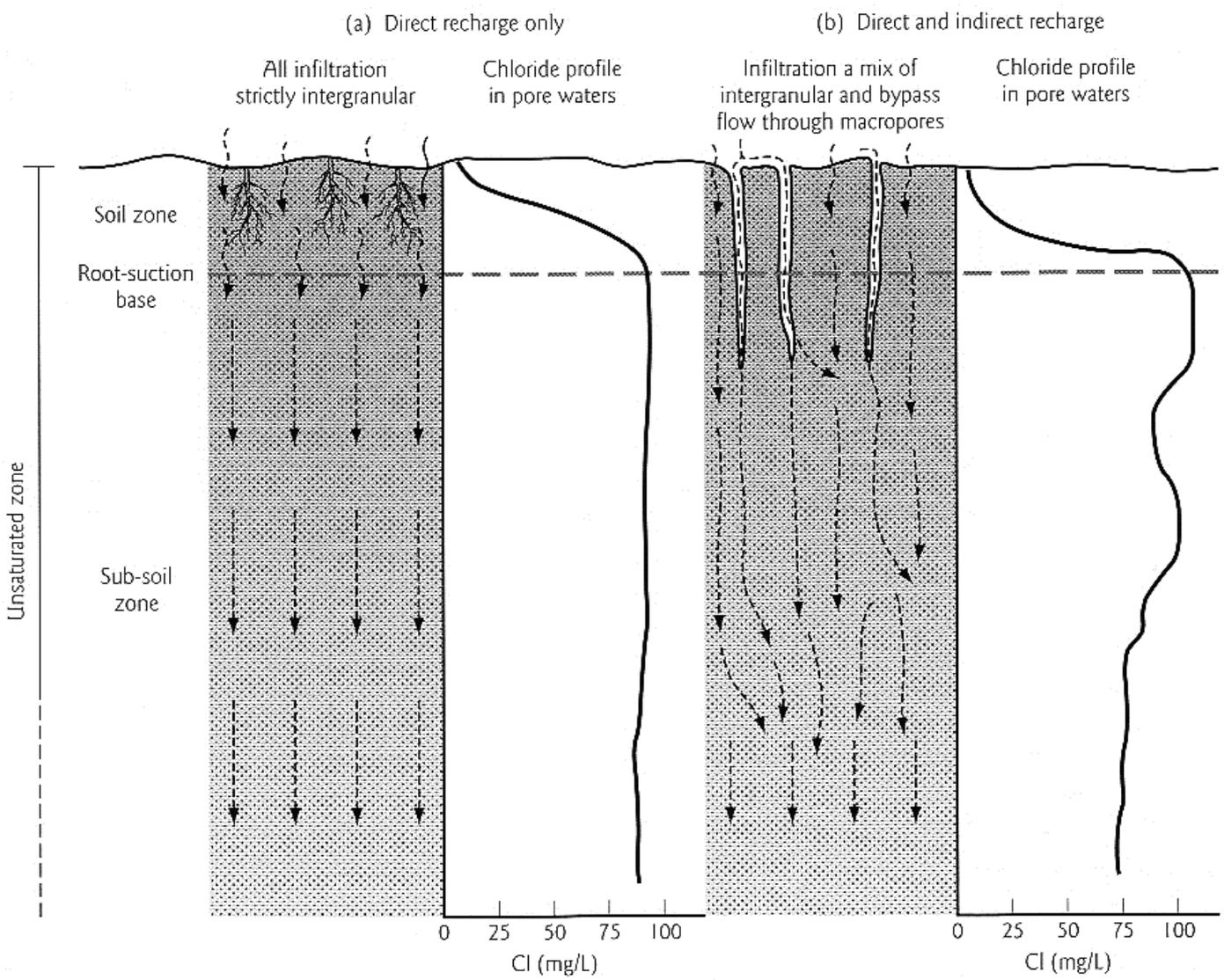


90 bis 99 % gehen durch Wiederverdunstung verloren (Wachtler, 2008)



# Grundwasserneubildung in Trockengebieten

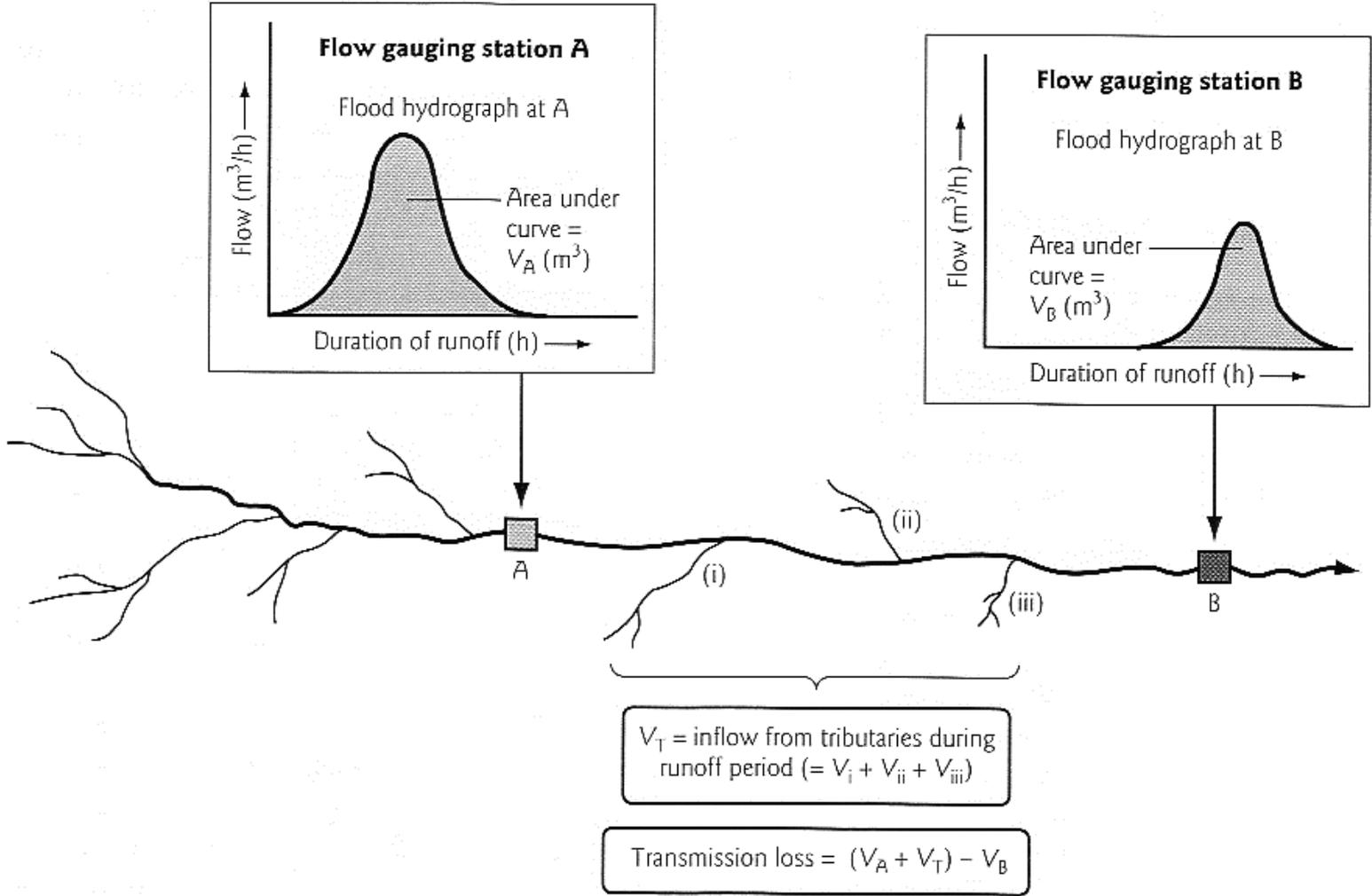
# Die Chloridmethode



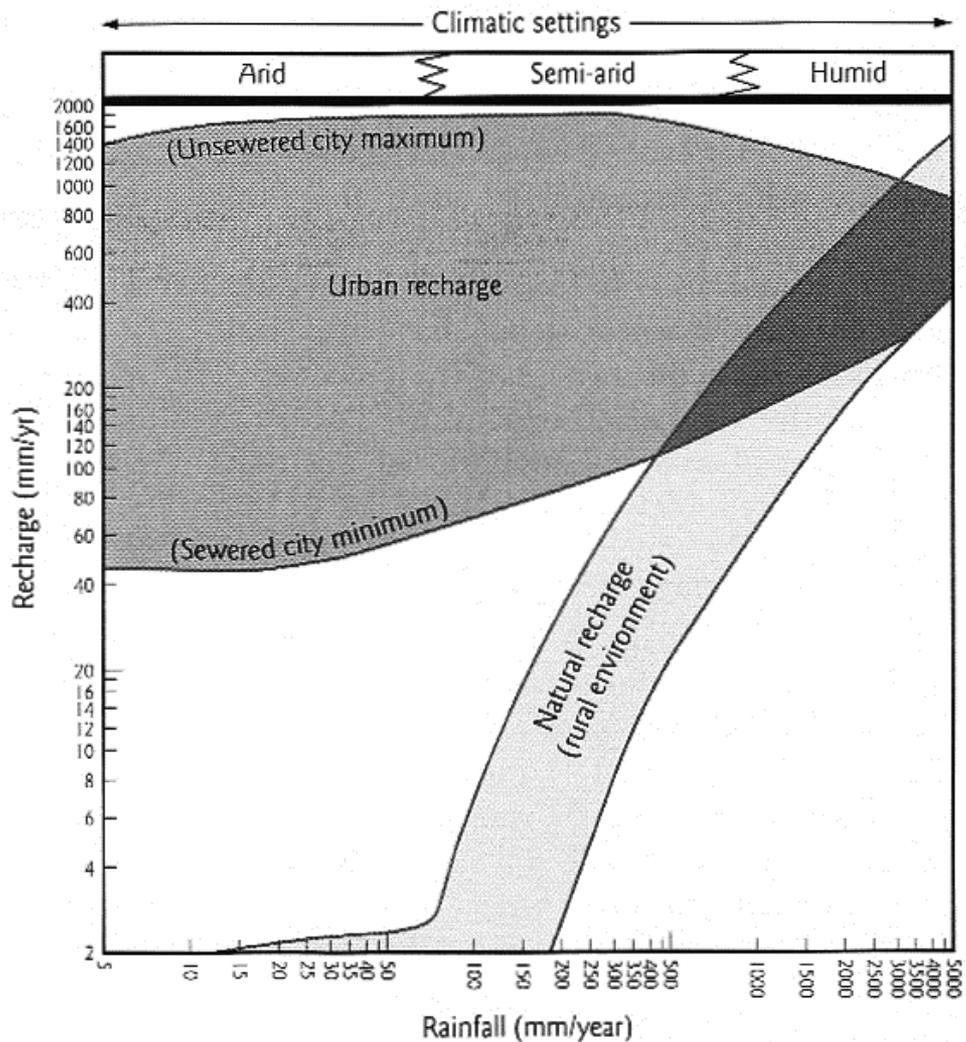
$$R = P * C_r / C_{gw}$$

- R=Recharge
- P=Niederschlag
- Cr=Chlorid im Regen
- Cgw=Chlorid im GW

# Indirekte Neubildung aus Q-Differenzen



# Urban Recharge



*In Trockengebieten kann die tatsächliche Grundwasserneubildung durch Leitungsverluste sehr hoch sein.*