



Formelsammlung

**HYDROLOGIE
UND
WASSERWIRTSCHAFT**

Prof. in Dr.-Ing. M. Flörke

Bochum, Stand: März 2022

INHALT

- 1. GEBIETSNIEDERSCHLAG**
- 2. EINZUGSGEBIET**
- 3. VERDUNSTUNG**
- 4. VERLUSTANSÄTZE**
- 5. ABFLUSSKONZENTRATIONSMODELLE**
- 6. FLOOD ROUTING**
- 7. HOCHWASSERSTATISTIK**
- 8. NIEDRIGWASSERSTATISTIK**
- 9. LINEARE REGRESSION**
- 10. SUMMENDIFFERENZENLINIE (SDL)**
- 11. HOCHWASSERRÜCKHALTERÄUME**
- 12. LINEARE PROGRAMMIERUNG**
- 13. DYNAMISCHE PROGRAMMIERUNG**
- 14. PROJEKTBEWERTUNG**
- 15. FLIEßFORMELN**
- 16. GESCHIEBETRIEB**
- 17. STANDSICHERHEIT**
- 18. WEHRBEMESSUNG**
- 19. WASSERKRAFT**
- 20. SICKERLINIE**

1. GEBIETSNIEDERSCHLAG

Die folgenden Formeln beziehen sich auf gemessene Niederschläge an verschiedenen Stationen (N_1, \dots, N_n). \bar{N} entspricht dem geschätzten Gebietsniederschlag. \tilde{N}_p entspricht dem geschätzten Niederschlag an einem Punkt P mit den Koordinaten $(x_p|y_p)$.

Arithmetische Mittelbildung:
$$\bar{N} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \cdot N_i$$
 N [mm/d]

Thiessen-Polygon-Verfahren:
$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$
 N [mm/d], A [km²]

Isohyeten-Methode:
$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$
 N [mm/d], A [km²]

Inverse-Distanzen-Verfahren:
$$\tilde{N}_p = \frac{\sum_{i=1}^n N_i / d_i^k}{\sum_{i=1}^n 1 / d_i^k}$$
 N [mm/d], d [km], $k \in \mathbb{N}$

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2}$$

2. EINZUGSGEBIET

Formfaktor: $R_F = \frac{A_E}{L_o^2}$ A_E [km²], L_o [km], R_F [-]

Kreisförmigkeitsverhältnis: $R_K = \frac{A_E}{A_K}$ A_E [km²], A_K [km²], R_K [-]

Streckungsverhältnis: $R_S = \frac{D_K}{L_o}$ L_o [km], D_K [km], R_S [-]

Wasserbilanz Einzugsgebiet: $\Delta S = N - (E + Q)$
mit: ΔS [mm/a], N [mm/a], E [mm/a], Q [mm/a]

3. VERDUNSTUNG

Dalton-Verfahren:

$$E_{\text{pot,W}} = f(v) \cdot (e_s(T_W) - e)$$

mit: $E_{\text{pot,W}}$ [mm/d], $f(v)$ [mm/(d·hPa)], $e_s(T_W)$ [hPa], e [hPa]

Penman-Verfahren:

$$E_{\text{pot}} = \frac{s}{s + \gamma} \cdot \frac{R_n - G}{L} + \frac{\gamma}{s + \gamma} \cdot f(v) \cdot (e_s(T) - e)$$

mit: E_{pot} [mm/d], s [hPa/K], R_n [J/(cm²·d)], G [J/(cm²·d)],
 L [J/(cm²·mm)], $\gamma = 0,655$ [hPa/K]

Turc-Wendling-Verfahren:
$$E_{\text{pot,G}} = \frac{(R_G + 93 \cdot f_k) \cdot (T + 22)}{162 \cdot (T + 123) \cdot (1 + 0,0003 \cdot H)}$$

mit:

- bis 200 m ist die Höhe zu vernachlässigen (d. h. $H = 0$ m);
falls $H > 600$ m ü. NN wird $H = 600$ m gesetzt
- Distanz Küste < 50 km: $f_k = 0,6$ [-] sonst: $f_k = 1,0$ [-]
- $E_{\text{pot,G}}$ [mm/d], R_G [J/(cm²·d)], T [°C], H [m]

Globalstrahlung:

$$R_G = R_0 \cdot \left(a + b \frac{S}{S_0} \right)$$

mit: R_G [J/(cm²·d)], R_0 [J/(cm²·d)], $a = 0,19$ [-], $b = 0,55$ [-],
 S [h/d], S_0 [h/d]

Langwelliger Strahlungshaushalt:

$$R_{L,\text{Wasser}} = 0,97 \cdot \sigma \cdot T_{\text{abs}}^4 \cdot \left(0,1 + 0,9 \frac{S}{S_0} \right) \cdot (0,56 - 0,08 \cdot \sqrt{e})$$

$$R_{L,\text{Land}} = 1,00 \cdot \sigma \cdot T_{\text{abs}}^4 \cdot \left(0,1 + 0,9 \frac{S}{S_0} \right) \cdot (0,34 - 0,044 \cdot \sqrt{e})$$

$$T_{\text{abs}} = T + 273,15$$

mit: R_L [J/(cm²·d)], $\sigma = 4,9 \cdot 10^{-7}$ [J/(cm²·K⁴·d)], T_{abs} [K],
 T [°C], e [hPa]

Strahlungsbilanz:

$$R_n = R_G (1 - \alpha) - R_L$$

mit: R_n [J/(cm²·d)], R_G [J/(cm²·d)], α [-], R_L [J/(cm²·d)]

Windfunktion:

$$f(v) = a + b \cdot v_2^c$$

mit: $f(v)$ [mm/(d·hPa)], $a = 0,13$ [-], $b = 0,094$ [-], $c = 1,0$ [-],
 v_2 [m/s]

Windprofil:

$$v_2 = v_z \cdot \frac{4,2}{\ln(z) + 3,5}$$

mit: v_2 [m/s], v_z [m/s], z [m]

Luftfeuchte:

$$e_s(T) = 6,112 \cdot \exp^{\frac{17,62 \cdot T}{243,12 + T}}$$

$$e = e_s(T) \cdot \frac{U}{100}$$

$$d = e_s(T) - e$$

mit: $e_s(T)$ [hPa], T [°C], e [hPa], U [%], d [hPa]

Potentielle Bestandsverdunstung:

$$E_{\text{pot,Bestand}} = E_{\text{pot,G}} \cdot k_c$$

mit: $E_{\text{pot,Bestand}}$ [mm/d], $E_{\text{pot,G}}$ [mm/d], k_c [-]

Reale Bestandsverdunstung:

$$E_r = R \cdot E_{\text{pot,Bestand}}$$

mit: E_r [mm/d], $R \in [0;1]$, $E_{\text{pot,Bestand}}$ [mm/d]

Tabelle 1: Im langjährigen Mittel bestimmte Bestandskoeffizienten k_c [-], jeweils bezogen auf die Mitte des Monats (DVWK Merkblatt 238/1996)

	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov. - Feb.
Mähweide	1.00	1.00	1.05	1.10	1.10	1.05	1.05	1.00	1.00
Winterweizen	0.90	0.95	1.15	1.35	1.30	1.00			0.65
Wintergerste	0.95	1.00	1.30	1.40	1.35				0.65
Sommergerste		0.75	1.30	1.40	1.30				
Winterroggen	0.85	0.90	1.20	1.30	1.25	0.95			0.65
Hafer		0.70	1.10	1.40	1.35	0.95			
Zuckerrüben		0.50	0.75	1.10	1.30	1.25	1.10	0.85	
Kartoffeln, mfr.*		0.50	0.90	1.10	1.40	1.20	0.90		
Winterraps	0.85	1.00	1.35	1.35	1.10	0.85			0.65

*mfr. = mittelfrühreifend

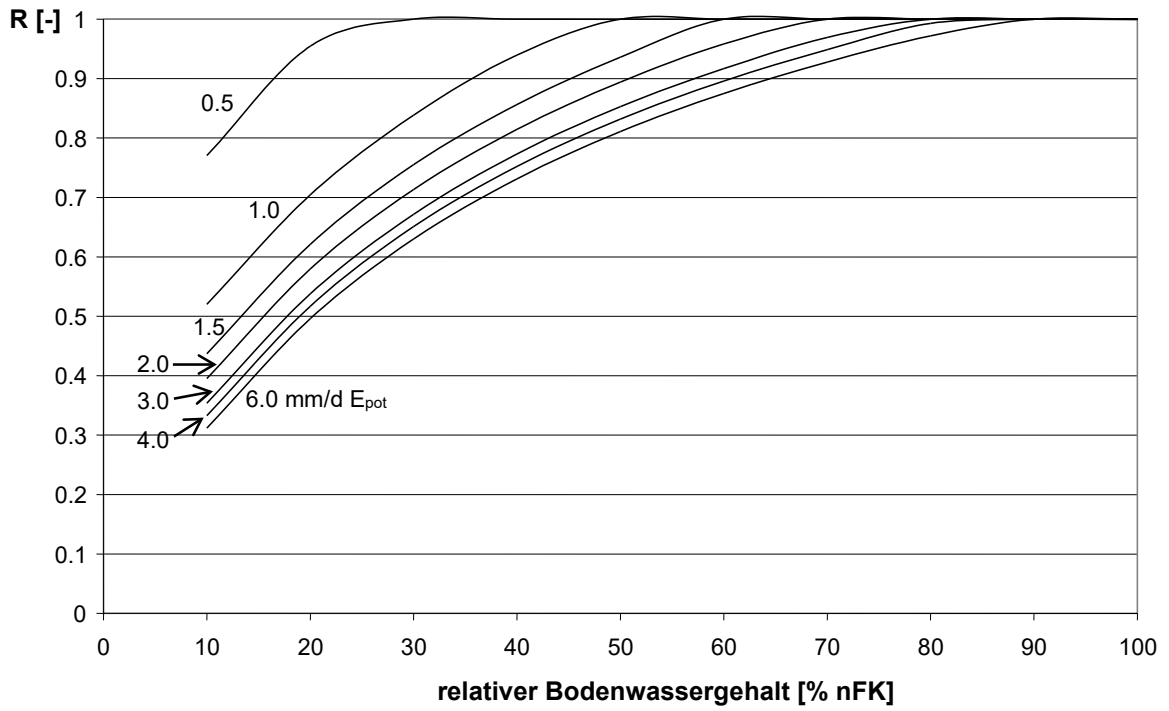


Abbildung 1: Reduktionsfaktor R in Abhängigkeit der potentiellen täglichen Verdunstungsmenge und des relativen Bodenwassergehalts

Tabelle 2: Hilfwerte Verdunstungsberechnung

T [°C]	e _s [hPa]	s [hPa/K]	s/(s+γ) [-]	L [J/(cm ² ·mm)]
-9	2.9	0.25	0.277	283
-8	3.1	0.27	0.294	283
-7	3.4	0.29	0.310	283
-6	3.7	0.32	0.327	283
-5	4.0	0.34	0.345	283
-4	4.4	0.37	0.362	283
-3	4.8	0.40	0.380	283
-2	5.2	0.43	0.398	283
-1	5.6	0.46	0.417	283
0	6.1	0.44	0.405	250
1	6.6	0.47	0.421	250
2	7.1	0.50	0.436	249
3	7.6	0.54	0.452	249
4	8.1	0.57	0.467	249
5	8.7	0.61	0.483	249
6	9.3	0.64	0.498	248
7	10.0	0.69	0.513	248
8	10.7	0.73	0.528	248
9	11.5	0.77	0.543	248
10	12.3	0.82	0.558	247
11	13.1	0.87	0.572	247
12	14.0	0.92	0.586	247
13	14.9	0.98	0.600	247
14	15.9	1.03	0.614	246
15	17.0	1.09	0.627	246
16	18.1	1.16	0.640	246
17	19.3	1.22	0.653	246
18	20.6	1.29	0.666	245
19	21.9	1.37	0.678	245
20	23.3	1.44	0.689	245
21	24.8	1.52	0.701	245
22	26.4	1.61	0.712	245
23	28.0	1.70	0.723	244
24	29.8	1.79	0.733	244
25	31.6	1.88	0.743	244
26	33.5	1.98	0.753	244
27	35.6	2.09	0.763	243
28	37.7	2.20	0.772	243
29	40.0	2.31	0.781	243
30	42.3	2.43	0.789	243
31	44.8	2.56	0.797	242
32	47.4	2.69	0.805	242
33	50.2	2.82	0.813	242
34	53.1	2.96	0.820	242
35	56.1	3.11	0.827	241

Tabelle 3: Astronomisch mögliche Sonnenscheindauer für die Nordhalbkugel als Mittelwert des jeweiligen Monats [h/d] bzw. als Jahressumme [h/a]

geogr. Breite	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
47°	8.8	10.1	11.7	13.4	14.9	15.6	15.3	14.0	12.4	10.7	9.2	8.4	4402.3
48°	8.7	10.0	11.7	13.5	15.0	15.8	15.4	14.1	12.4	10.7	9.1	8.2	4403.1
49°	8.5	10.0	11.7	13.5	15.1	15.9	15.5	14.2	12.5	10.7	9.0	8.1	4404.0
50°	8.4	9.9	11.7	13.6	15.2	16.1	15.7	14.3	12.5	10.6	8.9	7.9	4404.9
51°	8.3	9.8	11.7	13.6	15.3	16.2	15.8	14.4	12.5	10.5	8.8	7.8	4405.9
52°	8.1	9.7	11.7	13.7	15.5	16.4	16.0	14.4	12.5	10.5	8.6	7.6	4406.9
53°	8.0	9.6	11.7	13.8	15.6	16.6	16.1	14.5	12.5	10.4	8.5	7.4	4408.0
54°	7.8	9.5	11.6	13.8	15.7	16.8	16.3	14.6	12.6	10.4	8.4	7.2	4409.2
55°	7.6	9.4	11.6	13.9	15.9	17.0	16.5	14.7	12.6	10.3	8.2	7.0	4410.4

Tabelle 4: Astronomisch mögliche Sonnenscheindauer [h/d] für die Nordhalbkugel, jeweils bezogen auf die Mitte des Monats

geogr. Breite	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ
46°	8.8	10.2	11.7	13.3	14.7	15.5	15.2	14.0	12.4	10.8	9.3	8.5
47°	8.7	10.1	11.7	13.4	14.9	15.7	15.4	14.1	12.5	10.8	9.2	8.3
48°	8.6	10.0	11.7	13.4	15.0	15.8	15.5	14.2	12.5	10.7	9.1	8.2
49°	8.5	10.0	11.6	13.5	15.1	16.0	15.6	14.3	12.5	10.7	9.0	8.0
50°	8.3	9.9	11.6	13.6	15.2	16.1	15.8	14.3	12.5	10.7	8.9	7.9
51°	8.2	9.8	11.6	13.6	15.3	16.3	15.9	14.4	12.5	10.6	8.8	7.7
52°	8.0	9.7	11.6	13.7	15.4	16.5	16.1	14.5	12.5	10.6	8.6	7.6
53°	7.9	9.6	11.6	13.7	15.6	16.7	16.2	14.6	12.6	10.5	8.5	7.4
54°	7.7	9.6	11.6	13.8	15.7	16.9	16.4	14.7	12.6	10.4	8.4	7.2
55°	7.5	9.5	11.6	13.9	15.9	17.1	16.6	14.8	12.6	10.4	8.2	7.0

Tabelle 5: Extraterrestrische Strahlung [J/(cm²·d)], jeweils bezogen auf die Mitte des Monats

geogr. Breite	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ
Nordhalbkugel												
0°	3624.4	3758.9	3799.2	3681.6	3481.0	3343.0	3379.6	3550.8	3710.8	3741.7	3648.3	3568.2
5°	3419.8	3627.9	3763.7	3753.4	3631.3	3530.0	3552.3	3661.3	3725.2	3652.6	3469.8	3347.2
10°	3193.4	3470.7	3699.7	3797.4	3757.0	3694.9	3702.1	3745.6	3711.5	3536.4	3268.0	3105.8
15°	2947.1	3288.7	3607.6	3813.3	3857.4	3836.7	3827.9	3803.3	3669.5	3393.8	3044.6	2846.0
20°	2683.1	3083.4	3488.1	3801.1	3931.8	3954.6	3929.2	3833.9	3599.7	3226.1	2801.4	2570.2
25°	2403.7	2856.4	3342.0	3760.9	3980.0	4048.2	4005.4	3837.5	3502.7	3034.7	2540.7	2281.0
30°	2111.7	2609.6	3170.7	3693.2	4002.1	4117.5	4056.8	3814.2	3379.1	2820.9	2264.8	1981.3
35°	1810.3	2345.4	2975.2	3598.7	3998.6	4163.0	4083.7	3764.6	3229.9	2586.6	1976.6	1674.6
40°	1503.0	2066.0	2757.2	3478.2	3970.4	4185.9	4087.2	3689.6	3056.3	2333.8	1679.0	1364.7
45°	1194.2	1774.4	2518.3	3333.1	3919.2	4188.3	4069.3	3590.5	2859.6	2064.6	1375.9	1056.6
46°	1132.7	1714.8	2468.2	3301.3	3906.4	4186.6	4063.4	3567.9	2817.7	2009.0	1315.0	995.6
47°	1071.4	1655.0	2417.3	3268.5	3892.7	4184.3	4056.8	3544.5	2774.9	1952.8	1254.0	935.1
48°	1010.4	1594.8	2365.7	3234.9	3878.4	4181.4	4049.5	3520.2	2731.2	1896.2	1193.1	875.0
49°	949.6	1534.3	2313.4	3200.3	3863.2	4177.9	4041.5	3495.1	2686.8	1839.0	1132.3	815.3
50°	889.3	1473.6	2260.4	3165.0	3847.4	4173.9	4033.0	3469.2	2641.5	1781.4	1071.6	756.3
51°	829.3	1412.7	2206.7	3128.7	3830.9	4169.5	4024.0	3442.4	2595.4	1723.3	1011.1	697.9
52°	769.9	1351.5	2152.4	3091.7	3813.8	4164.7	4014.4	3415.0	2548.6	1664.8	950.8	640.2
53°	711.1	1290.3	2097.3	3053.9	3796.1	4159.6	4004.5	3386.8	2501.0	1605.9	890.8	583.4
54°	652.9	1228.9	2041.7	3015.2	3777.9	4154.3	3994.2	3357.9	2452.6	1546.7	831.2	527.5
55°	595.6	1167.5	1985.5	2975.9	3759.2	4148.9	3983.6	3328.4	2403.6	1487.1	772.0	472.7
60°	324.6	861.0	1695.7	2768.6	3661.4	4125.2	3930.7	3172.3	2147.8	1184.8	485.4	220.2
65°	98.9	561.4	1393.4	2547.1	3567.2	4131.9	3895.2	3008.0	1876.5	878.7	226.5	31.3
70°	0	281.4	1081.1	2318.2	3511.9	0	0	2849.7	1592.1	574.9	29.8	0
Südhalbkugel												
5°	3805.5	3862.8	3805.7	3582.7	3307.3	3135.3	3185.3	3415.1	3668.2	3803.0	3802.1	3767.1
10°	3962.0	3938.8	3783.4	3457.3	3111.6	2908.6	2970.8	3255.1	3597.7	3835.9	3930.1	3942.4
15°	4092.6	3986.5	3732.2	3306.4	2895.4	2664.7	2737.9	3072.2	3500.0	3840.2	4031.4	4093.0
20°	4196.8	4005.4	3652.8	3131.3	2660.5	2405.8	2488.8	2867.8	3375.7	3816.0	4105.4	4218.1
25°	4274.1	3995.7	3545.6	2933.3	2409.2	2134.3	2225.6	2643.7	3225.8	3763.5	4151.9	4317.1
30°	4324.6	3957.6	3411.5	2714.1	2143.7	1853.2	1951.1	2401.8	3051.6	3683.2	4171.1	4390.3
35°	4348.9	3891.7	3251.5	2475.4	1866.7	1565.5	1668.1	2144.4	2854.2	3575.8	4163.3	4438.0
40°	4347.9	3798.9	3066.8	2219.4	1581.2	1275.0	1380.2	1873.8	2635.3	3442.4	4129.6	4461.6
45°	4323.8	3680.6	2858.9	1948.3	1290.9	986.2	1091.4	1593.0	2396.5	3284.1	4071.7	4463.3
50°	4279.7	3538.7	2629.4	1664.8	1000.1	704.8	806.9	1305.2	2139.7	3102.6	3992.1	4447.0
55°	4221.0	3375.8	2380.0	1371.6	714.5	439.3	533.9	1014.4	1867.0	2899.8	3895.0	4419.3
60°	4157.5	3195.7	2112.8	1072.6	442.4	203.4	283.6	725.9	1580.5	2678.4	3787.1	4392.7

4. VERLUSTANSÄTZE

Abflussbeiwert:
$$\psi = \frac{\sum N_{\text{eff}}}{\sum N} = \frac{\sum Q_d \cdot \Delta t}{\sum N \cdot A_E} \quad [-]$$

mit: N [m], N_{eff} [m], Q_d [m³/s], Δt [s], A_E [m²]

Horton-Ansatz:
$$f_{p,j} = (f_0 - f_c) \cdot e^{-k \cdot t} + f_c$$

$$N_{\text{eff},j} = 0,5 \cdot ((N_j - f_{p,j-1}) + (N_j - f_{p,j}))$$

mit: N_{eff} [mm/h], f_p [mm/h], f_0 [mm/h], f_c [mm/h], k [1/h]
 t [h] = $j \cdot \Delta t$ mit $j \in \mathbb{N}_0$ und Δt [h]

SCS-Verfahren
$$N_{\text{eff}} = \frac{(N - I_a)^2}{(N - I_a) + S}$$

$$I_a = 0,05 \cdot S \quad (\text{g\u00fcltig f\u00fcr deutsche Verh\u00e4ltnisse})$$

$$S = 25,4 \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2,334 - 0,01334 \cdot CN_{II}} \quad (\text{geringe Vorf\u00e4hcte})$$

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0,4036 + 0,0059 \cdot CN_{II}} \quad (\text{hohe Vorf\u00e4hcte})$$

$$F_j = \frac{S(N_{\text{cum},j} - I_a)}{N_{\text{cum},j} - I_a + S} \quad \text{mit } N_{\text{cum},j} = \sum_{i=1}^j N_i, \text{ f\u00fcr } N_{\text{cum},j} \geq I_a, \text{ sonst } F_j = 0$$

$$N_{\text{eff,cum},j} = N_{\text{cum},j} - I_a - F_j, \text{ f\u00fcr } N_{\text{cum},j} \geq I_a, \text{ sonst } N_{\text{eff,cum},j} = 0$$

$$N_{\text{eff},j+1} = N_{\text{eff,cum},j+1} - N_{\text{eff,cum},j}$$

mit: N [mm], I_a [mm], S [mm], CN [-], N_{cum} [mm], F [mm],
 N_{eff} [mm], $N_{\text{eff,cum}}$ [mm], $j \in \mathbb{N}_0$

Tabelle 6: Abflussbeiwerte nach Imhoff (1993)

Bebauungsart	Abflussbeiwerte
dichte Bebauung	0,7 bis 0,9
geschlossene Bebauung	0,5 bis 0,7
offene Bebauung	0,3 bis 0,5
gartenreiche Au\u00dfenviertel	0,2 bis 0,3
unbebautes Gel\u00e4nde	0,1 bis 0,2
Parkanlagen	0,0 bis 0,1

Tabelle 7: Definition der Bodenfeuchteklassen

Klasse	Niederschlagssumme der letzten 5 Tage	
	Brachephase	Vegetationsphase
I	< 12 mm	< 36 mm
II	12-28 mm	36-53 mm
III	> 28 mm	> 53 mm

Tabelle 8: CN-Werte für Bodenfeuchtekategorie II nach U.S. Soil Conservation Service (1972)

Art der Landnutzung		hydrologische Bodenklasse				
		A	B	C	D	
Landwirtschaftlich genutzte Ackerfläche¹⁾	mit Erosionsschutzmaßnahmen	72	81	88	91	
	ohne Erosionsschutzmaßnahmen	62	71	78	81	
Weideland	in schlechtem Zustand	68	79	86	89	
	in gutem Zustand	39	61	74	80	
Wiese	in gutem Zustand	30	58	71	78	
Wald	lichter Bestand, schlechte Bodenbedeckung	45	66	77	83	
	kein Mulch, gute Bodenbedeckung ²⁾	25	55	70	77	
Innerstädtische Freifläche: Rasen, Parks, Golfplätze, Friedhöfe etc.	guter Zustand, Grasbewuchs auf mind. 75 % der Fläche	39	61	74	80	
	mäßiger Zustand, Grasbewuchs auf 50-75 % der Fläche	49	69	79	84	
Städt. Wohn- und Geschäftsviertel (85 % Versiegelungsgrad)		89	92	94	95	
Industriegebiete (72 % Versiegelungsgrad)		81	88	91	93	
Wohngebiete³⁾						
Durchschnittliche Grundstücksgröße in m ² bis		Versiegelungsgrad ⁴⁾ in %				
	500	65	77	85	90	92
	1000	38	61	75	83	87
	1500	30	57	72	81	86
	2000	25	54	70	80	85
	4000	20	51	68	79	84
asphaltierte Flächen, Parkplätze, Einfahrten, Dächer⁵⁾		98	98	98	98	
Straßen:						
Asphaltiert mit Randstein und Abwasserkanalisation ⁵⁾		98	98	98	98	
Schotterstraßen		76	85	89	91	
Erdstraßen		72	82	87	89	
<p>1) Genaue Beschreibung der CN-Werte bei landwirtschaftlicher Nutzung finden sich im National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, Kapitel 9, August 1972</p> <p>2) Gute Bodenbedeckung muss vor Beweidung und Unratsablagerung geschützt sein</p> <p>3) Diese CN-Werte wurden unter der Voraussetzung ermittelt, dass der Abfluss von Gebäuden und Erschließungsflächen auf die Straße fließt und nur ein minimaler Anteil (des von den Dächern abfließenden Wassers) auf Rasen- und Gartenflächen geleitet wird, wo zusätzliche Versickerung auftreten könnte</p> <p>4) Die unbebauten, d.h. wasserdurchlässigen Gartenflächen wurden für diese Berechnungen gutem Weideland gleichgestellt.</p> <p>5) In heißeren Klimazonen sollte hier der CN-Wert 95 angenommen werden.</p>						

5. ABFLUSSKONZENTRATIONSMODELLE

Einzellinearspeicher $q_{m,\Delta t} = q_{(m-1)\Delta t} \cdot e^{-\frac{\Delta t}{k}} + p_m \cdot (1 - e^{-\frac{\Delta t}{k}})$

mit: p [mm/h], q [mm/h] oder p [m³/s], q [m³/s],
 k [h], Δt [h]

Unit Hydrograph $n = r - m + 1$

$$Q_{dk} = \sum_{i=1}^n (P_{k-i+1} \cdot U_i)$$

$$F = \sum_{k=1}^r (Q_k^g - Q_k^b)^2, \text{ wobei } Q_k^b = f(P, U)$$

$$\frac{\partial F}{\partial U_k} = 2 \cdot \sum_{i=k}^{k+m-1} [(Q_i^g - Q_i^b) \cdot (-P_{i-(k-1)})] = 0, \forall k$$

$$U_i' = U_i \cdot \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{1}{\sum U_i}$$

mit:

P [mm/h], Q [mm/h] oder P [m³/s], Q [m³/s]

U_i [-], U_i' [1/h], Δt [h], n [-], m [-], r [-]

Momentenmethode $m_{1,x} = \frac{\sum x_i \cdot t_i}{\sum x_i} = \bar{t}_{p,x}$ [h]

$$M_{2,x} = \frac{\sum x_i \cdot (t_i - \bar{t}_{p,x})^2}{\sum x_i}$$
 [h²]

$$m_{1,h} = m_{1,Q} - m_{1,P}$$
 [h]

$$M_{2,h} = M_{2,Q} - M_{2,P}$$
 [h²]

$$n = \frac{m_{1,h}^2}{M_{2,h}}$$
 [-]

$$k = \frac{M_{2,h}}{m_{1,h}}$$
 [h]

Lineare Speicherkaskade

$$h(\Delta t, t = i \cdot \Delta t) = \Delta t \cdot \frac{1}{k \cdot \Gamma(n)} \cdot \left(\frac{(i-0,5) \cdot \Delta t}{k} \right)^{n-1} \cdot e^{-\frac{(i-0,5) \cdot \Delta t}{k}}$$

mit: Δt [h], k [h], i [-], n [-]

Tabelle 9: Werte der Gammafunktion $\Gamma(\alpha)$ im Intervall [1,01; 1,99]

α	$\Gamma(\alpha)$	α	$\Gamma(\alpha)$	α	$\Gamma(\alpha)$	α	$\Gamma(\alpha)$
1.01	0.994	1.26	0.904	1.51	0.887	1.76	0.921
1.02	0.989	1.27	0.903	1.52	0.887	1.77	0.924
1.03	0.984	1.28	0.901	1.53	0.888	1.78	0.926
1.04	0.978	1.29	0.899	1.54	0.888	1.79	0.929
1.05	0.974	1.30	0.897	1.55	0.889	1.80	0.931
1.06	0.969	1.31	0.896	1.56	0.890	1.81	0.934
1.07	0.964	1.32	0.895	1.57	0.890	1.82	0.937
1.08	0.960	1.33	0.893	1.58	0.891	1.83	0.940
1.09	0.955	1.34	0.892	1.59	0.892	1.84	0.943
1.10	0.951	1.35	0.891	1.60	0.894	1.85	0.946
1.11	0.947	1.36	0.890	1.61	0.895	1.86	0.949
1.12	0.944	1.37	0.889	1.62	0.896	1.87	0.952
1.13	0.940	1.38	0.889	1.63	0.897	1.88	0.955
1.14	0.936	1.39	0.888	1.64	0.899	1.89	0.958
1.15	0.933	1.40	0.887	1.65	0.900	1.90	0.962
1.16	0.930	1.41	0.887	1.66	0.902	1.91	0.965
1.17	0.927	1.42	0.886	1.67	0.903	1.92	0.969
1.18	0.924	1.43	0.886	1.68	0.905	1.93	0.972
1.19	0.921	1.44	0.886	1.69	0.907	1.94	0.976
1.20	0.918	1.45	0.886	1.70	0.909	1.95	0.980
1.21	0.916	1.46	0.886	1.71	0.911	1.96	0.984
1.22	0.913	1.47	0.886	1.72	0.913	1.97	0.988
1.23	0.911	1.48	0.886	1.73	0.915	1.98	0.992
1.24	0.909	1.49	0.886	1.74	0.917	1.99	0.996
1.25	0.906	1.50	0.886	1.75	0.919		

Für die Berechnung von Werten außerhalb des Intervalls von 1 bis 2 gilt:

$$\Gamma(1)=\Gamma(2)=1$$

$$\Gamma(\alpha+1)=\alpha \cdot \Gamma(\alpha) \quad \rightarrow \quad \text{für } \alpha = \text{Dezimalzahl}$$

$$\Gamma(\alpha)=(\alpha-1)! \quad \rightarrow \quad \text{für } \alpha = \text{ganze Zahl}$$

6. FLOOD ROUTING

Muskingum
$$K = \frac{0,5 \cdot \Delta t \cdot [(I_{t+1} + I_t) - (Q_{t+1} + Q_t)]}{x \cdot (I_{t+1} - I_t) + (1-x) \cdot (Q_{t+1} - Q_t)}$$

mit: I = Zustrom [m^3/s] und Q = Abstrom [m^3/s]

Δt [s], K [s], x [-]

Restriktionen:

- $K \geq \Delta t$
- $x < \Delta t / (2 \cdot K)$
- $0 \leq x \leq 0,5$

Koeffizienten:

$$c_1 = \frac{-K \cdot x + 0,5 \cdot \Delta t}{K \cdot (1-x) + 0,5 \cdot \Delta t} \quad [-]$$

$$c_2 = \frac{K \cdot x + 0,5 \cdot \Delta t}{K \cdot (1-x) + 0,5 \cdot \Delta t} \quad [-]$$

$$c_3 = \frac{K - K \cdot x - 0,5 \cdot \Delta t}{K \cdot (1-x) + 0,5 \cdot \Delta t} \quad [-]$$

Anwendung Arbeitsgleichung:

$$Q_{t+1} = c_1 \cdot I_{t+1} + c_2 \cdot I_t + c_3 \cdot Q_t$$

Lineare Speicherkaskade

$$h(\Delta t, t = i \cdot \Delta t) = \Delta t \cdot \frac{1}{k \cdot \Gamma(n)} \cdot \left(\frac{i \cdot \Delta t}{k} \right)^{n-1} \cdot e^{-\frac{i \cdot \Delta t}{k}}$$

mit: Δt [h], k [h], i [-], n [-]

7. HOCHWASSERSTATISTIK

Die folgenden Formeln beziehen sich auf eine Stichprobe (x_1, \dots, x_n) .

Schätzer statistischer Kennwerte

Mittelwert:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Varianz:

$$s^2(x) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Variationskoeffizient:

$$C_V(x) = \frac{s(x)}{\bar{x}}$$

Schiefe:

$$C_s(x) = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(n-1)(n-2) \cdot s^3(x)}$$

Standardvariable:

$$k(x) = \frac{x - \bar{x}}{s(x)}$$

Emp. Unterschreitungswahrscheinlichkeit:

$$P_{u,i} = \frac{m_i}{n+1} \quad \text{mit } m_i = \text{Rang von } x_i.$$

Wiederkehrintervall:

$$T = \frac{1}{1 - P_u}$$

Gumbel-Verteilung

Verteilungsfunktion:

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-c}{d}\right)\right]$$

Parameterschätzer:

$$d = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot s(x)$$

$$c = \bar{x} - \gamma \cdot d \quad \text{mit } \gamma = 0,5772$$

$$k(T) = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left(\gamma + \ln \ln \frac{T}{T-1} \right)$$

Pearson-3-Verteilung

Verteilungsfunktion:

$$F(x) = \frac{b^{a+1}}{\Gamma(a+1)} \int_0^{b(x-d)} y^a \cdot e^{-y} dy$$

mit Γ definiert als Gammafunktion.

Parameterschätzer:

$$d = \bar{x} \cdot \left(1 - \frac{2c_v}{c_s} \right)$$

$$a = \frac{4}{c_s^2} - 1$$

$$b = \frac{2}{\bar{x} \cdot c_v \cdot c_s}$$

Korrigierte Schiefe:

$$c_{s, \text{kor}}(x) = 2 \cdot c_v(x)$$

Tabelle 10: Häufigkeitsfaktor k für die Pearson-III-Verteilung

Schiefekoeffizient C_{sx} bzw. C_{sv}	Wiederholungszeitspanne T in Jahren													
	1,01	2	2,5	3	5	10	20	25	40	50	100	200	500	1000
0	-2,326	0,000	0,253	0,440	0,842	1,282	1,645	1,751	1,960	2,054	2,326	2,576	2,878	3,090
0,1	-2,252	-0,017	0,238	0,417	0,836	1,292	1,637	1,785	2,007	2,107	2,400	2,670	3,004	3,233
0,2	-2,178	-0,033	0,222	0,403	0,830	1,301	1,700	1,818	2,053	2,159	2,473	2,763	3,118	3,377
0,3	-2,104	-0,050	0,205	0,388	0,824	1,309	1,726	1,849	2,098	2,211	2,544	2,856	3,244	3,521
0,4	-2,029	-0,066	0,189	0,373	0,816	1,317	1,750	1,830	2,142	2,261	2,615	2,949	3,366	3,666
0,5	-1,955	-0,083	0,173	0,358	0,808	1,323	1,774	1,910	2,185	2,311	2,686	3,041	3,488	3,811
0,6	-1,880	-0,099	0,156	0,342	0,800	1,328	1,797	1,939	2,227	2,359	2,755	3,132	3,609	3,956
0,7	-1,806	-0,116	0,139	0,327	0,790	1,333	1,819	1,967	2,268	2,407	2,824	3,223	3,730	4,100
0,8	-1,733	-0,132	0,122	0,310	0,780	1,336	1,839	1,993	2,308	2,453	2,891	3,312	3,850	4,244
0,9	-1,660	-0,148	0,105	0,294	0,769	1,339	1,859	2,018	2,346	2,498	2,957	3,401	3,969	4,388
1,0	-1,588	-0,164	0,088	0,277	0,758	1,340	1,877	2,043	2,384	2,542	3,022	3,489	4,088	4,531
1,1	-1,518	-0,180	0,070	0,270	0,745	1,341	1,894	2,066	2,420	2,585	3,087	3,575	4,206	4,673
1,2	-1,449	-0,195	0,053	0,242	0,732	1,340	1,910	2,087	2,455	2,626	3,149	3,661	4,323	4,815
1,3	-1,383	-0,210	0,036	0,225	0,719	1,339	1,925	2,108	2,489	2,666	3,122	3,745	4,438	4,955
1,4	-1,318	-0,225	0,018	0,207	0,705	1,337	1,938	2,128	2,521	2,706	3,271	3,828	4,553	5,095
1,5	-1,256	-0,240	0,001	0,189	0,690	1,333	1,951	2,146	2,552	2,743	3,330	3,910	4,667	5,234
1,6	-1,197	-0,254	-0,016	0,171	0,675	1,329	1,962	2,163	2,582	2,780	3,388	3,990	4,779	5,371
1,7	-1,140	-0,268	-0,033	0,153	0,660	1,324	1,972	2,179	2,611	2,815	3,444	4,069	4,890	5,507
1,8	-1,087	-0,282	-0,050	0,135	0,643	1,318	1,981	2,193	2,638	2,848	3,499	4,147	5,000	5,642
1,9	-1,037	-0,294	-0,067	0,117	0,627	1,310	1,989	2,207	2,664	2,881	3,553	4,223	5,108	5,775
2,0	-0,990	-0,307	-0,084	0,099	0,609	1,302	1,996	2,219	2,689	2,912	3,605	4,298	5,215	5,908
2,1	-0,946	-0,319	-0,100	0,081	0,592	1,293	2,001	2,230	2,712	2,942	3,656	4,372	5,320	6,039
2,2	-0,905	-0,330	-0,116	0,063	0,574	1,284	2,006	2,240	2,735	2,970	3,705	4,444	5,424	6,168
2,3	-0,867	-0,341	-0,131	0,045	0,555	1,273	2,009	2,248	2,755	2,997	3,753	4,515	5,527	6,296
2,4	-0,832	-0,351	-0,147	0,027	0,537	1,262	2,011	2,256	2,775	3,023	3,800	4,584	5,628	6,423
2,5	-0,799	-0,360	-0,161	0,010	0,518	1,250	2,012	2,262	2,793	3,048	3,845	4,652	5,728	6,548
2,6	-0,769	-0,369	-0,176	-0,007	0,499	1,238	2,013	2,267	2,811	3,071	3,889	4,718	5,827	6,672
2,7	-0,740	-0,377	-0,189	-0,024	0,480	1,224	2,012	2,272	2,827	3,093	3,932	4,783	5,923	6,794
2,8	-0,714	-0,384	-0,203	-0,041	0,460	1,210	2,010	2,275	2,841	3,114	3,973	4,847	6,019	6,915
2,9	-0,690	-0,390	-0,215	-0,057	0,440	1,195	2,007	2,277	2,855	3,134	4,013	4,909	6,113	7,034
3,0	-0,667	-0,396	-0,227	-0,073	0,420	1,180	2,003	2,278	2,867	3,152	4,051	4,970	6,205	7,152

8. NIEDRIGWASSERSTATISTIK

Für eine Zeitreihe von Tagesabflüssen in einem Jahr (Q_1, \dots, Q_n):

$$NM_d Q = \frac{1}{d} \min_{1 \leq k \leq n-d+1} \sum_{i=k}^{d+k-1} Q_i$$

Schätzer statistischer Kennwerte:

Die folgenden Formeln beziehen sich auf eine Stichprobe (x_1, \dots, x_n).

Emp. Unterschreitungswahrscheinlichkeit: $P_{u,i} = \frac{m_i}{n+1}$ mit $m_i = \text{Rang von } x_i$.

Wiederkehrintervall: $T = \frac{1}{P_u(x)}$

siehe auch Abschnitt Hochwasserstatistik

Dichtefunktionen:

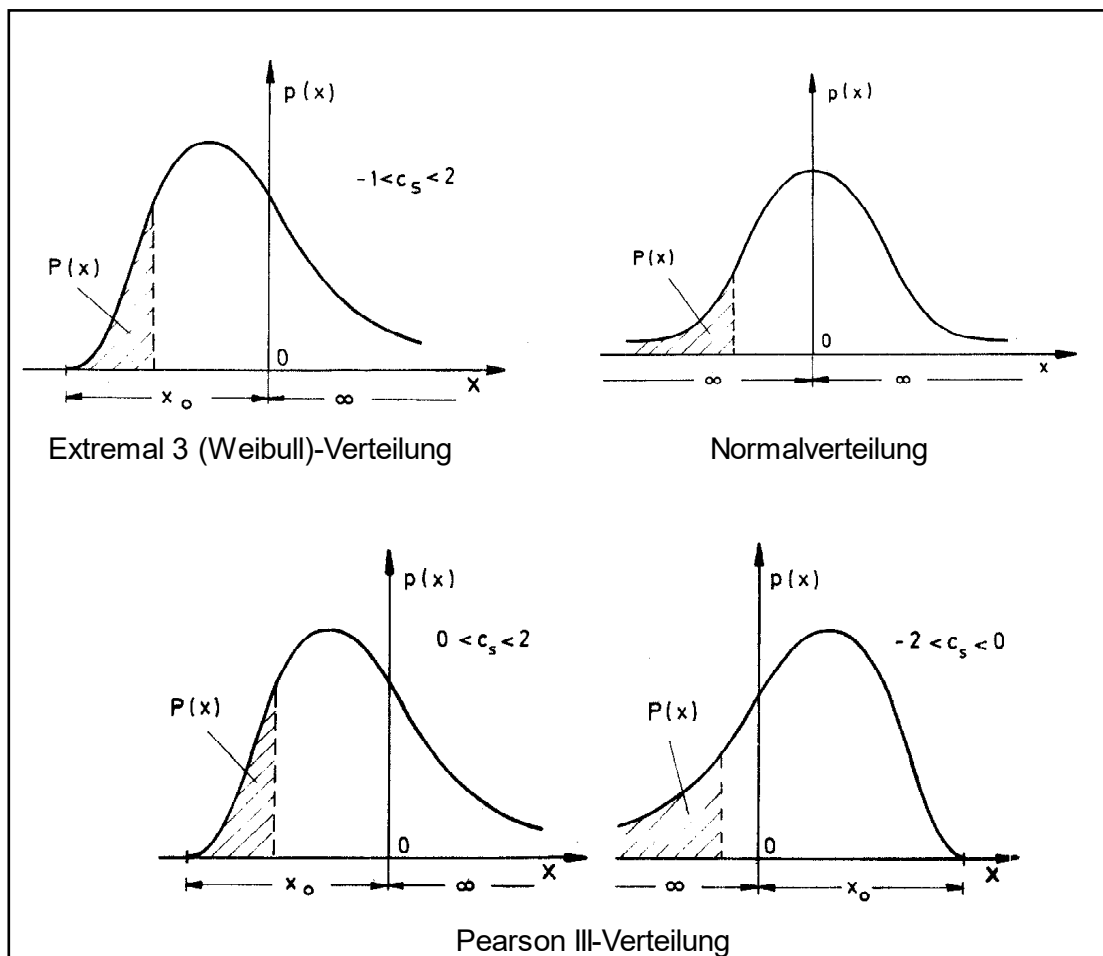


Abbildung 2: Dichtefunktionen verschiedener Verteilungsfunktionen

Tabelle 11: Häufigkeitsfaktoren k der Unterschreitungswahrscheinlichkeit P für die Extremal 3 (Weibull)–Verteilung

c_s	Wiederholungszeitspanne T in Jahren													
	∞	100	75	50	40	30	25	20	15	10	5	2	1.01	
	0.0	1.0	1.3	2.0	2.5	3.3	4	5	6.7	10	20	50	90	99
	Unterschreitungswahrscheinlichkeit P in Prozent													
-1.00	-32.323	-3.053	-2.845	-2.547	-2.382	-2.167	-2.029	-1.859	-1.636	-1.316	-0.739	0.152	1.123	1.697
-0.90	-18.421	-2.988	-2.792	-2.511	-2.254	-2.148	-2.015	-1.851	-1.635	-1.323	-0.754	0.142	0.140	1.740
-0.80	-12.717	-2.919	-2.735	-2.471	-2.322	-2.126	-1.999	-1.841	-1.633	-1.329	-0.768	0.131	1.157	1.786
-0.70	-9.616	-2.845	-2.657	-2.427	-2.286	-2.101	-1.980	-1.829	-1.629	-1.333	-0.783	0.119	1.174	1.835
-0.60	-7.672	-2.767	-2.610	-2.379	-2.248	-2.072	-1.958	-1.814	-1.622	-1.337	-0.797	0.106	1.192	1.886
-0.50	-6.341	-2.685	-2.541	-2.328	-2.205	-2.041	-1.933	-1.796	-1.613	-1.338	-0.811	0.092	1.209	1.941
-0.40	-5.375	-2.600	-2.469	-2.273	-2.159	-2.006	-1.905	-1.776	-1.602	-1.338	-0.825	0.077	1.227	1.999
-0.30	-4.644	-2.512	-2.393	-2.215	-2.110	-1.968	-1.873	-1.752	-1.588	-1.336	-0.838	0.061	1.244	2.059
-0.20	-4.073	-2.422	-2.316	-2.154	-2.058	-1.927	-1.839	-1.726	-1.571	-1.332	-0.850	0.044	1.261	2.122
-0.10	-3.616	-2.331	-2.236	-2.090	-2.003	-1.883	-1.802	-1.697	-1.552	-1.325	-0.860	0.026	1.278	2.188
0.00	-3.243	-2.239	-2.155	-2.025	-1.946	-1.836	-1.762	-1.665	-1.530	-1.316	-0.870	0.008	1.293	2.256
0.10	-2.933	-2.148	-2.074	-1.958	-1.887	-1.788	-1.720	-1.631	-1.506	-1.305	-0.878	-0.011	1.308	2.326
0.20	-2.673	-2.058	-1.993	-1.891	-1.828	-1.738	-1.676	-1.595	-1.479	-1.292	-0.884	-0.031	1.321	2.398
0.30	-2.452	-1.969	-1.914	-1.823	-1.767	-1.687	-1.631	-1.557	-1.451	-1.276	-0.889	-0.051	1.334	2.471
0.40	-2.262	-1.883	-1.835	-1.756	-1.707	-1.635	-1.585	-1.518	-1.420	-1.259	-0.893	-0.070	1.344	2.546
0.50	-2.097	-1.800	-1.759	-1.690	-1.647	-1.583	-1.538	-1.478	-1.389	-1.240	-0.894	-0.090	1.353	2.621
0.60	-1.954	-1.721	-1.685	-1.626	-1.588	-1.532	-1.491	-1.437	-1.356	-1.219	-0.894	-0.110	1.361	2.696
0.70	-1.828	-1.645	-1.615	-1.563	-1.530	-1.481	-1.445	-1.396	-1.323	-1.197	-0.892	-0.129	1.366	2.771
0.80	-1.717	-1.573	-1.547	-1.503	-1.474	-1.431	-1.399	-1.355	-1.289	-1.174	-0.889	-0.148	1.370	2.846
0.90	-1.618	-1.505	-1.483	-1.445	-1.420	-1.382	-1.354	-1.315	-1.256	-1.151	-0.884	-0.166	1.372	2.919
1.00	-1.530	-1.441	-1.422	-1.390	-1.368	-1.335	-1.310	-1.275	-1.222	-1.126	-0.878	-0.183	1.373	2.992
1.10	-1.452	-1.380	-1.365	-1.337	-1.318	-1.289	-1.268	-1.237	-1.189	-1.102	-0.870	-0.200	1.372	3.063
1.20	-1.381	-1.324	-1.311	-1.288	-1.271	-1.246	-1.227	-1.199	-1.157	-1.077	-0.862	-0.215	1.369	3.132
1.30	-1.317	-1.272	-1.261	-1.240	-1.226	-1.204	-1.187	-1.163	-1.125	-1.053	-0.853	-0.230	1.365	3.199
1.40	-1.258	-1.222	-1.213	-1.196	-1.184	-1.165	-1.150	-1.128	-1.094	-1.029	-0.843	-0.244	1.359	3.264
1.50	-1.205	-1.177	-1.169	-1.154	-1.144	-1.127	-1.114	-1.095	-1.064	-1.005	-0.833	-0.256	1.352	3.327
1.60	-1.157	-1.134	-1.127	-1.115	-1.106	-1.091	-1.080	-1.063	-1.035	-0.982	-0.822	-0.268	1.344	3.388
1.70	-1.113	-1.094	-1.089	-1.078	-1.070	-1.057	-1.047	-1.032	-1.008	-0.959	-0.811	-0.279	1.335	3.446
1.80	-1.072	-1.057	-1.052	-1.043	-1.036	-1.025	-1.016	-1.003	-0.981	-0.937	-0.800	-0.289	1.325	3.501
1.90	-1.035	-1.022	-1.018	-1.010	-1.005	-0.995	-0.987	-0.975	-0.955	-0.915	-0.788	-0.298	1.314	3.555
2.00	-1.000	-0.990	-0.987	-0.980	-0.975	-0.966	-0.959	-0.949	-0.931	-0.895	-0.777	-0.307	1.303	3.605

Tabelle 12: Häufigkeitsfaktoren k der Unterschreitungswahrscheinlichkeit P für die Normal-Verteilung ($c_s = 0$) und die Pearson 3-Verteilung

c_s	Wiederholungszeitspanne T in Jahren													
	∞	100	75	50	40	30	25	20	15	10	5	2	1.11	1.01
	0.0	1.0	1.3	2.0	2.5	3.3	4	5	6.7	10	20	50	90	99
	Unterschreitungswahrscheinlichkeit P in Prozent													
-2.0	-3.605	-3.317	-2.912	-2.689	-2.401	-2.219	-1.996	-1.708	-1.303	-0.609	0.307	0.895	0.990	
-1.9	-3.553	-3.274	-2.881	-2.664	-2.384	-2.207	-1.989	-1.708	-1.311	-0.627	0.294	0.920	1.037	
-1.8	-3.499	-3.230	-2.848	-2.638	-2.366	-2.193	-1.981	-1.707	-1.318	-0.643	0.281	0.945	1.087	
-1.7	-3.444	-3.184	-2.815	-2.611	-2.347	-2.179	-1.972	-1.705	-1.324	-0.660	0.268	0.970	1.140	
-1.6	-3.388	-3.136	-2.780	-2.582	-2.326	-2.163	-1.962	-1.701	-1.329	-0.675	0.254	0.994	1.197	
-1.5	-3.330	-3.088	-2.743	-2.552	-2.304	-2.146	-1.951	-1.697	-1.333	-0.691	0.240	1.018	1.256	
-1.4	-3.271	-3.038	-2.706	-2.521	-2.281	-2.128	-1.938	-1.691	-1.337	-0.705	0.225	1.041	1.318	
-1.3	-3.211	-2.986	-2.667	-2.489	-2.257	-2.108	-1.925	-1.685	-1.339	-0.719	0.210	1.064	1.383	
-1.2	-3.149	-2.934	-2.626	-2.455	-2.231	-2.088	-1.910	-1.677	-1.340	-0.733	0.195	1.086	1.449	
-1.1	-3.087	-2.880	-2.585	-2.420	-2.204	-2.066	-1.894	-1.668	-1.341	-0.745	0.180	1.107	1.518	
-1	-3.023	-2.825	-2.542	-2.384	-2.176	-2.043	-1.877	-1.658	-1.340	-0.758	0.164	1.128	1.588	
-0.9	-2.957	-2.769	-2.498	-2.346	-2.147	-2.018	-1.859	-1.648	-1.339	-0.769	0.148	1.147	1.660	
-0.8	-2.891	-2.711	-2.453	-2.308	-2.117	-1.993	-1.839	-1.635	-1.336	-0.780	0.132	1.166	1.733	
-0.7	-2.824	-2.653	-2.407	-2.268	-2.085	-1.967	-1.819	-1.622	-1.333	-0.790	0.116	1.183	1.806	
-0.6	-2.755	-2.593	-2.359	-2.227	-2.052	-1.939	-1.797	-1.608	-1.329	-0.800	0.099	1.200	1.880	
-0.5	-2.686	-2.533	-2.311	-2.185	-2.019	-1.910	-1.774	-1.593	-1.323	-0.808	0.083	1.216	1.955	
-0.4	-2.615	-2.471	-2.261	-2.142	-1.984	-1.880	-1.750	-1.577	-1.317	-0.816	0.067	1.231	2.029	
-0.3	-2.544	-2.409	-2.211	-2.098	-1.948	-1.849	-1.726	-1.559	-1.309	-0.824	0.050	1.245	2.104	
-0.2	-2.472	-2.345	-2.159	-2.053	-1.911	-1.818	-1.700	-1.541	-1.301	-0.830	0.033	1.258	2.178	
-0.1	-2.400	-2.281	-2.107	-2.007	-1.873	-1.785	-1.673	-1.521	-1.292	-0.836	0.017	1.270	2.253	
0	-∞	-2.216	-2.054	-1.960	-1.834	-1.751	-1.645	-1.501	-1.282	-0.842	0.000	1.282	2.326	
0.1	-20.000	-2.253	-2.151	-2.000	-1.912	-1.794	-1.716	-1.616	-1.480	-1.270	-0.846	-0.017	1.292	2.400
0.2	-10.000	-2.178	-2.085	-1.945	-1.864	-1.753	-1.680	-1.586	-1.457	-1.258	-0.850	-0.033	1.301	2.472
0.3	-6.667	-2.104	-2.018	-1.890	-1.814	-1.712	-1.643	-1.555	-1.434	-1.245	-0.853	-0.050	1.309	2.544
0.4	-5.000	-2.029	-1.951	-1.834	-1.764	-1.669	-1.606	-1.524	-1.410	-1.231	-0.855	-0.067	1.317	2.615
0.5	-4.000	-1.955	-1.884	-1.777	-1.714	-1.626	-1.567	-1.491	-1.385	-1.216	-0.857	-0.083	1.323	2.686
0.6	-3.333	-1.880	-1.817	-1.720	-1.663	-1.583	-1.528	-1.458	-1.359	-1.200	-0.857	-0.099	1.329	2.755
0.7	-2.857	-1.806	-1.750	-1.663	-1.611	-1.538	-1.489	-1.423	-1.332	-1.183	-0.857	-0.116	1.333	2.824
0.8	-2.500	-1.733	-1.683	-1.606	-1.559	-1.493	-1.448	-1.389	-1.304	-1.166	-0.856	-0.132	1.336	2.891
0.9	-2.222	-1.660	-1.617	-1.549	-1.507	-1.448	-1.407	-1.353	-1.275	-1.147	-0.854	-0.148	1.339	2.957
1	-2.000	-1.588	-1.551	-1.492	-1.455	-1.403	-1.366	-1.317	-1.246	-1.128	-0.852	-0.164	1.340	3.023
1.1	-1.818	-1.518	-1.487	-1.435	-1.403	-1.357	-1.324	-1.280	-1.216	-1.107	-0.848	-0.180	1.341	3.087
1.2	-1.667	-1.449	-1.423	-1.379	-1.352	-1.311	-1.282	-1.243	-1.185	-1.086	-0.844	-0.195	1.340	3.149
1.3	-1.538	-1.383	-1.361	-1.324	-1.300	-1.265	-1.240	-1.206	-1.154	-1.064	-0.838	-0.210	1.339	3.211
1.4	-1.429	-1.318	-1.300	-1.270	-1.250	-1.220	-1.198	-1.168	-1.123	-1.041	-0.832	-0.225	1.337	3.271
1.5	-1.333	-1.256	-1.242	-1.217	-1.201	-1.175	-1.157	-1.131	-1.091	-1.018	-0.825	-0.240	1.333	3.330
1.6	-1.250	-1.197	-1.186	-1.166	-1.152	-1.131	-1.116	-1.093	-1.059	-0.994	-0.817	-0.254	1.329	3.388
1.7	-1.176	-1.140	-1.132	-1.116	-1.105	-1.088	-1.075	-1.056	-1.026	-0.970	-0.808	-0.268	1.324	3.444
1.8	-1.111	-1.087	-1.081	-1.069	-1.060	-1.046	-1.035	-1.020	-0.994	-0.945	-0.799	-0.281	1.318	3.499
1.9	-1.053	-1.037	-1.032	-1.023	-1.016	-1.005	-0.997	-0.984	-0.962	-0.920	-0.788	-0.294	1.311	3.553
2	-1.000	-0.990	-0.987	-0.980	-0.975	-0.966	-0.959	-0.949	-0.931	-0.895	-0.777	-0.307	1.303	3.605

9. LINEARE REGRESSION

Die folgenden Formeln beziehen sich auf zwei Stichproben X und Y mit $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ und $Y = \{y_1, \dots, y_n\}$. Im Folgenden wird X als unabhängige Variable und Y als abhängige Variable verwendet.

Lineares Regressionsmodell

$y_i = b_1 \cdot x_i + b_0 + \varepsilon_i$, wobei ε_i hier vernachlässigt wird, d. h. $\varepsilon_i = 0$ (Annahme)

Schätzung des Regressionsmodells

$$\bar{y} = b_1 \cdot \bar{x} + b_0$$

$$\text{mit: } b_1 = \frac{s_{xy}}{s_{xx}} \text{ und } \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \text{ und } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\text{wobei: } s_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \text{ und } s_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})$$

t-Test

$$\hat{t} = \frac{r \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

$$\text{mit: } r = \frac{s_{xy}}{\sqrt{s_{xx} \cdot s_{yy}}}$$

$$\text{wobei: } s_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \text{ und } s_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \text{ und } s_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})$$

Testung der Nullhypothese mit $|\hat{t}| > t_{n-2, \alpha/2}$

Tabelle 13: Transformationen zur Linearisierung

Nr.	Vermuteter Zusammenhang	Linearisierung	Transformation in $y = b_0 + b_1x$
1	$v = cu^d$	$\log v = \log c + d \cdot \log u$	$x = \log u, y = \log v,$ $b_0 = \log c, b_1 = d$
2	$v = cd^u$	$\log v = \log c + \log d \cdot u$	$x = u, y = \log v,$ $b_0 = \log c, b_1 = \log d$
3	$v = c \cdot e^{du}$	$\ln v = \ln c + du$	$x = u, y = \ln v,$ $b_0 = \ln c, b_1 = d$
4	$v = c \cdot e^{d/u}$	$\ln v = \ln c + d/u$	$x = 1/u, y = \ln v,$ $b_0 = \ln c, b_1 = d$
5	$v = c + d/u$	$v = c + d/u$	$x = 1/u, y = v,$ $b_0 = c, b_1 = d$
6	$v = \frac{c}{d+u}$	$1/v = d/c + u/c$	$x = u, y = 1/v,$ $b_0 = d/c, b_1 = 1/c$
7	$v = \frac{cu}{d+u}$	$1/v = 1/c + \frac{d}{cu}$	$x = 1/u, y = 1/v,$ $b_0 = 1/c, b_1 = d/c$
8	$v = \frac{u}{c+du}$	$u/v = c + du$	$x = u, y = u/v,$ $b_0 = c, b_1 = d$

Tabelle 14: Signifikanzschranken der t-Verteilung in Abhängigkeit von der Irrtumswahrscheinlichkeit α und dem Freiheitsgrad f ($f = n - 2$)

$f = n - 2$	α für zweiseitigen Test			
	0.1	0.05	0.01	0.001
1	6.31	12.71	63.66	636.58
2	2.92	4.30	9.92	31.60
3	2.35	3.18	5.84	12.92
4	2.13	2.78	4.60	8.61
5	2.02	2.57	4.03	6.87
6	1.94	2.45	3.71	5.96
7	1.89	2.36	3.50	5.41
8	1.86	2.31	3.36	5.04
9	1.83	2.26	3.25	4.78
10	1.81	2.23	3.17	4.59
11	1.80	2.20	3.11	4.44
12	1.78	2.18	3.05	4.32
13	1.77	2.16	3.01	4.22
14	1.76	2.14	2.98	4.14
15	1.75	2.13	2.95	4.07
16	1.75	2.12	2.92	4.01
17	1.74	2.11	2.90	3.97
18	1.73	2.10	2.88	3.92
19	1.73	2.09	2.86	3.88
20	1.72	2.09	2.85	3.85
21	1.72	2.08	2.83	3.82
22	1.72	2.07	2.82	3.79
23	1.71	2.07	2.81	3.77
24	1.71	2.06	2.80	3.75
25	1.71	2.06	2.79	3.73
26	1.71	2.06	2.78	3.71
27	1.70	2.05	2.77	3.69
28	1.70	2.05	2.76	3.67
29	1.70	2.05	2.76	3.66
30	1.70	2.04	2.75	3.65
40	1.68	2.02	2.70	3.55
60	1.67	2.00	2.66	3.46
120	1.66	1.98	2.62	3.37
	0.05	0.025	0.005	0.0005
	α für einseitigen Test			

10. SUMMENDIFFERENZENZENLINIE (SDL)

SDL:
$$\int_0^t (Q_z - Q_a) dt = \int_0^t Q_z dt - \int_0^t Q_a dt$$

Zufluss-SDL:
$$\sum \Delta Q_z = \sum_{i=1}^n (Q_{z,i} - MQ)$$

Sollabgabe-SDL:
$$\sum \Delta Q_a = \sum_{i=1}^n (Q_{a,i} - MQ)$$

Q_z [m³/s], Q_a [m³/s], MQ [m³/s]

Ausbaugrad:
$$\beta = \frac{S}{\sum_{i=1}^n Q_{z,i}}$$

β [-], S [Millionen m³], Q_z [Millionen m³]

Ausgleichsgrad:
$$\alpha = \frac{Q_a}{MQ} \quad (\alpha \leq 1,0)$$

α [-], Q_a [m³/s], MQ [m³/s]

Speicherfüllung:
$$S_i = \min_i \{ SN, [S_{i-1} + (QZ_i - QA_i)] \}$$

Überlauf:
$$\ddot{U}_i = \max_i \{ 0, [(QZ_i - QA_i) - (SN - S_{i-1})] \}$$

11. HOCHWASSERRÜCKHALTERÄUME

Retentionsberechnung

$$Q_G = \mu \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

mit: μ [-], A [m²], g [m/s²], h [m], Q_G [m³/s]

$$Q_H = \frac{2}{3} \mu \cdot B \cdot h_{\bar{u}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_{\bar{u}}}$$

mit: μ [-], B [m], $h_{\bar{u}}$ [m], g [m/s²], Q_H [m³/s]

Speicheränderung:
$$\int_{S_j}^{S_{j+1}} dS = \int_{j \cdot \Delta t}^{(j+1) \cdot \Delta t} QZ(t) dt - \int_{j \cdot \Delta t}^{(j+1) \cdot \Delta t} QA(t) dt$$

Beziehung Abfluss/Speicherung:
$$QA = f\left(\frac{2 \cdot S}{\Delta t} + QA\right)$$

Arbeitsgleichung:
$$\frac{2 \cdot S_{j+1}}{\Delta t} + QA_{j+1} = (QZ_j + QZ_{j+1}) + \left(\frac{2 \cdot S_j}{\Delta t} + QA_j\right) - 2 \cdot QA_j$$

Speicherwirkungslinie

$$S = \int_{t_0}^{t_1} (QZ(t) - QR) dt$$

$$\Delta QR_i = QR_{i-1} - QR_i$$

$$\Delta S_i = \frac{\Delta t_{i-1} + \Delta t_i}{2} \cdot \Delta QR_i$$

$$S_i = S_{i-1} + \Delta S_i$$

Δt_i = Zeitspanne, während der QR_i überschritten wird [s]

mit: QZ [m³/s], QR [m³/s], S [m³], t [s]

Rückhaltegrad

$$\alpha_R = \frac{HQ(T) - QR}{HQ(T)}$$

mit: $HQ(T)$ [m³/s], QR [m³/s]

Beckenausbaugrad

$$\beta_A = \frac{SN}{SQ_G} = \frac{\text{erforderlicher Stauraum}}{\text{Zuflusssumme}}$$

mit: SN [m³], SQ_G [m³]

12. LINEARE PROGRAMMIERUNG

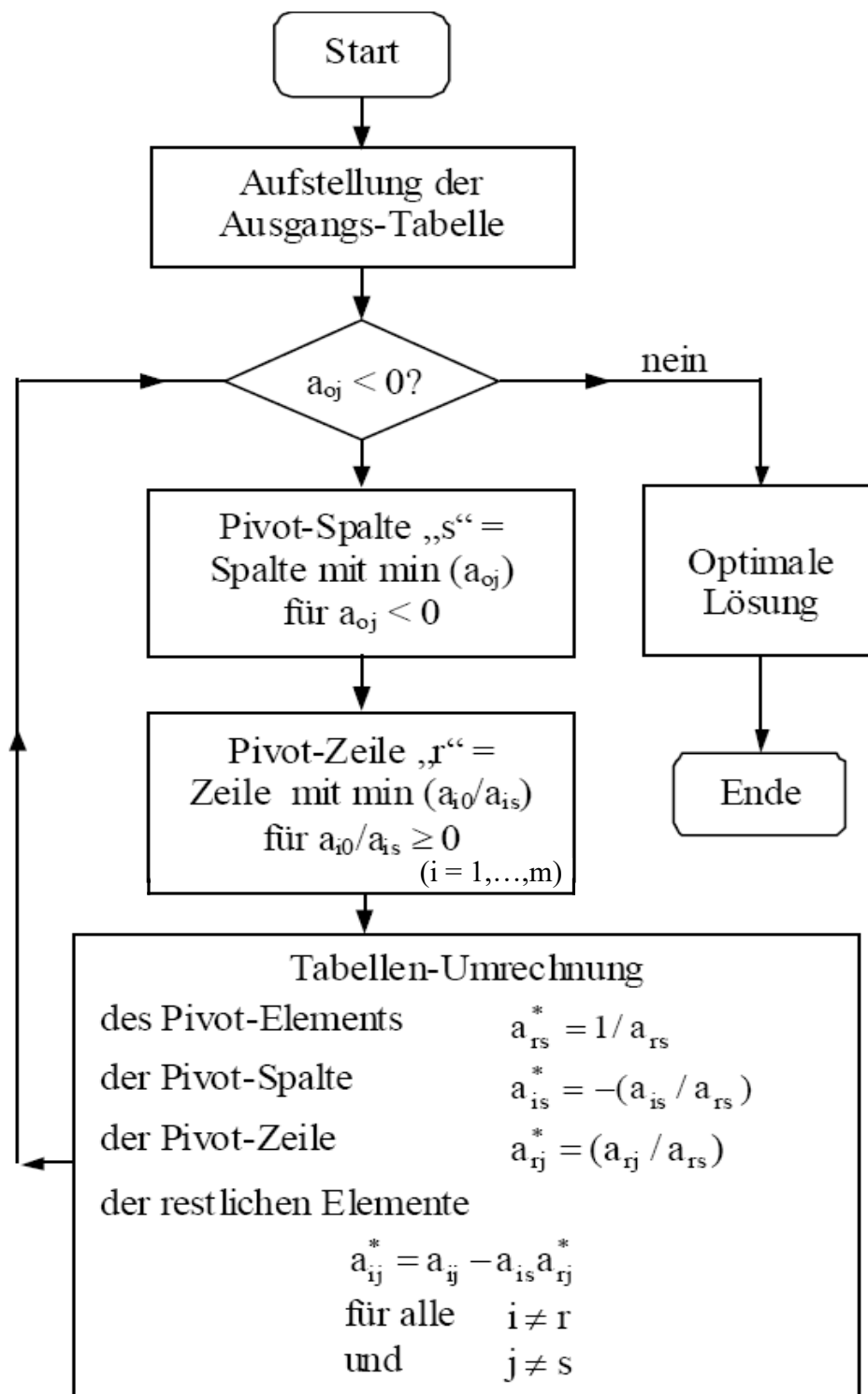


Abbildung 3: Ablaufplan des Simplex-Algorithmus

13. DYNAMISCHE PROGRAMMIERUNG

Zielfunktion:
$$\max Z = \sum_{i=1}^n r_i(x_i)$$

Transformationsfunktion:
$$S_{i+1} = t(S_i, x_i)$$

Rekursionsformel:
$$f_i^*(S_i) = \max \{ r_i(x_i) + f_{i+1}^*(S_{i+1}) \}$$

14. PROJEKTBEWERTUNG

Kosten-Nutzen-Analyse

Kapitalwert: $KP = N - K$

Nutzen-Kosten-Verhältnis: $NK = \frac{N}{K}$

Tabelle 15: Unterteilung aller Kosten und Nutzen nach dem Zeitpunkt der Ausgabe/Einnahme

	Vor Bezugszeitpunkt: Akkumulation	Nach Bezugszeitpunkt: Diskontierung
Einzelne Kosten/Nutzen	$P \cdot (1+i)^n$	$P \cdot (1+i)^{-n}$
Laufende Kosten/Nutzen	$\frac{(1+i)^n - 1}{i} \cdot P$	$\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \cdot P$

Kapitalgewinnungsfaktor: $\frac{R}{BW} = \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$

Rückstellungsfaktor: $\frac{R}{F_n} = \frac{i}{(1+i)^n - 1}$

Annuität: $A = KP \cdot \frac{R}{BW}$

mit N = Gesamtnutzen zum Bezugszeitpunkt; K = Gesamtkosten zum Bezugszeitpunkt;
 i = jährlicher Zinssatz (als Dezimalzahl); P = Kapitaleinsatz; n = Anzahl Jahre ab
 Bezugszeitpunkt; R = Rente, F_n = Endwert; BW = Barwert

Nutzwertanalyse

Nutzwert:
$$NW_i = \sum_{j=1}^n e_{ij} \cdot g_j \text{ mit } e_{ij} = f(k_{ij})$$

Tabelle 16: Skalierung der Zielerträge

Bei Minimierung	$e_{ij} = \frac{k_{\max,j} - k_{ij}}{k_{\max,j} - k_{\min,j}}$
Bei Maximierung	$e_{ij} = \frac{k_{ij} - k_{\min,j}}{k_{\max,j} - k_{\min,j}}$

mit: NW_i = Nutzwert der Alternative i ; k_{ij} = tatsächlicher Wert des Zielertrags;
 e_{ij} = dimensionsloser Zielerfüllungsgrad; g_j = Gewichtung des Kriteriums j ;
 n = Anzahl der Kriterien; $i = 1 \dots n$ Zahl der Alternativen; $j = 1 \dots m$ Zahl der Kriterien

15. FLIEßFORMELN

Kontinuitätsgleichung:

$$Q = v \cdot A$$

mit: Q [m³/s], v [m/s], A [m²]

Fließgeschwindigkeit nach Gauckler-Manning-Strickler

$$v = k_{St} \cdot r_{hy}^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

mit: v [m/s], k_{St} [m^{1/3}/s], r_{hy} [m], I [-]

Hydraulischer Radius:

$$r_{hy} = \frac{A}{L_U}$$

mit: r_{hy} [m], A [m²], L_U [m]

Universelle Fließformel für offene Gerinne:

$$v = -4 \cdot \log \left(\frac{f_g \cdot v}{8 \cdot r_{hy} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot r_{hy} \cdot I}} + \frac{\frac{k}{r_{hy}}}{4 \cdot f_r} \right) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot r_{hy} \cdot I}$$

mit: ν : kinematische Viskosität; $\nu = 1,31 \cdot 10^{-6}$ [m²/s] bei 10° C

v [m/s], f_g [-], f_r [-], k [m], r_{hy} [m], g [m/s²], I [-]

Vereinfachte universelle Fließformel:

$$v = \left(20,75 + 17,71 \cdot \log \frac{r_{hy}}{k} \right) \cdot \sqrt{r_{hy} \cdot I}$$

mit: v [m/s], r_{hy} [m], k [m], I [-]

Rauheit kompakter Querschnitte:

$$k_{St,ges} = \left[\frac{L_U}{\sum_{i=1}^n \left[\frac{L_{U,i}}{k_{St,i}^2} \right]^{\frac{2}{3}}} \right]^{\frac{3}{2}}$$

mit: k_{St} [m^{1/3}/s], L_U [m]

Rauheit Trapezprofil:

$$k_{St,ges} = \frac{L_U^{\frac{2}{3}} \cdot k_{St,So} \cdot k_{St,Bö}}{\left(b_{So} \cdot k_{St,Bö}^{\frac{3}{2}} + L_{U,Bö} \cdot k_{St,So}^{\frac{3}{2}} \right)^{\frac{2}{3}}}$$

mit: k_{St} [$m^{1/3}/s$], L_u [m], b [m]

Fließgewässer mit bewachsenen Vorländern

$$D_{V,hy} = \frac{C_{WR} \cdot \sum A_{P,i}}{L_U \cdot L_B}$$

mit: $D_{V,hy}$ [-], $C_{WR} \in [1,0; 1,5]$ [-], $A_{P,i}$ [m^2], L [m]

$$C_{V,hy} = \frac{k_{St}}{16 \cdot g \cdot r_{hy}^{\frac{1}{3}} \cdot l^{\frac{1}{2}}} \cdot D_{V,hy}$$

mit: $C_{V,hy}$ [-], k_{St} [$m^{1/3}/s$], g [m/s^2], r_{hy} [m], l [-], $D_{V,hy}$ [-]

$$X_{flex} = C_{V,hy} \cdot \alpha$$

mit: X_{flex} [-], $C_{V,hy}$ [-], α [-]

$$X_{starr} = 8 \cdot v_{oB} \cdot C_{V,hy} \cdot (1 - \alpha)$$

mit: X_{starr} [-], v_{oB} [m/s], α [-], $C_{V,hy}$ [-]

$$\frac{k_{St,V}}{k_{St}} = \frac{v}{v_{oB}} = \sqrt{\left(\frac{X_{flex}}{1 + X_{starr}} \right)^2 + \frac{1}{1 + X_{starr}}} - \frac{X_{flex}}{1 + X_{starr}}$$

mit: k_{St} [$m^{1/3}/s$], v [m/s], X [-]

16. GESCHIEBETRIEB

Sohlschubspannung

$$\tau_{\text{vorh}} = \rho \cdot g \cdot r_{\text{hy}} \cdot l$$

mit: τ_{vorh} [N/m²], ρ [kg/m³], r_{hy} [m], l [-]

Geschiebetrieb nach Meyer-Peter/Müller

$$m_G = 8 \cdot \rho_F \cdot v_0^* \cdot d_{\text{Ch}} \cdot Fr^* \cdot \left(\frac{Q_S}{Q} \cdot \left(\frac{k_{\text{St}}}{k_r} \right)^{1,5} - \frac{Fr_{\text{krit}}^*}{Fr^*} \right)^{1,5}$$

Sohlschubspannungsgeschwindigkeit: $v_0^* = \sqrt{g \cdot h \cdot l}$

Feststoff-Froudezahl: $Fr^* = \frac{(v_0^*)^2}{\rho' \cdot g \cdot d_{\text{Ch}}} = \frac{\tau_0}{(\rho_F - \rho_W) \cdot g \cdot d_{\text{Ch}}}$

Relative Feststoffdichte: $\rho' = \frac{\rho_F - \rho_W}{\rho_W}$

Kornrauheitsbeiwert: $k_r = \frac{26}{(d_{90})^{1/6}}$

Sedimentologischer Korndurchmesser: $D^* = \left(\frac{\rho' \cdot g}{\nu^2} \right)^{1/3} \cdot d_{\text{Ch}}$

Kritische Feststoff-Froudezahl:

$D^* \leq 6$, dann gilt $Fr_{\text{crit}}^* = 0,109 (D^*)^{-0,5}$

$6 < D^* \leq 10$, dann gilt $Fr_{\text{crit}}^* = 0,14 (D^*)^{-0,64}$

$10 < D^* \leq 20$, dann gilt $Fr_{\text{crit}}^* = 0,04 (D^*)^{-0,1}$

$20 < D^* \leq 150$, dann gilt $Fr_{\text{crit}}^* = 0,013 (D^*)^{0,29}$

$150 < D^*$, dann gilt $Fr_{\text{crit}}^* = 0,055$

mit:

m_G [kg/(m·s)], ρ_F [kg/m³] (für Sand: 2650 [kg/m³]), v_0^* [m/s], g [m/s²], h [m], l [-], d_{Ch} [m],
 Fr^* [-], v_0^* [m/s], ρ' [-], τ_0 [N/m²], ρ_W [kg/m³], Q_S [m³/s], Q [m³/s], k_{St} [m^{1/3}/s], k_r [-], d_{90} [m],
 ν [m²/s] (kinematische Viskosität: $1,31 \cdot 10^{-6}$ [m²/s] bei 10 °C), D^* [-], Fr_{crit}^* [-]

Tabelle 17: Kritische Schleppspannungen nach DIN 19661, Teil 2

Sohlenbeschaffenheit		N/m ²
Einzelkorngefüge vorherrschend	Feinsand, Korngröße 0,063 bis 0,2 mm	1,0
	Mittelsand, Korngröße 0,2 bis 0,63 mm	2,0
	Grobsand, Korngröße 0,63 bis 1 mm	3,0
	Grobsand, Korngröße 1 bis 2 mm	4,0
	Grobsand, Korngröße 0,63 bis 2 mm	6,0
	Kies-Sand-Gemisch, Korngröße 0,63 bis 6,3 mm festgelagert, langanhaltend überströmt	12,0
	Mittelkies, Korngröße 6,3 bis 20 mm	15,0
	Grobkies, Korngröße 20 bis 63 mm	45,0
	Plattiges Geschiebe, 1 bis 2 cm hoch, 4 bis 6 cm lang	50,0
Boden wenig kolloidal	lehmiger Sand	2,0
	lehmhaltige Ablagerung	2,5
	lockerer Schlamm	2,5
	lehmiger Kies, langanhaltend überströmt	20,0
Boden stark kolloidal	lockerer Lehm	3,5
	festgelagerter Lehm	12,0
	Ton	12,0
	festgelagerter Schlamm	12,0
Rasen verwachsen	Rasen, langanhaltend überströmt	15,0
	Rasen, vorwiegend überströmt	30,0

17. STANDSICHERHEIT

Kippnachweis

Eine Staumauer ist ausreichend kippstabil, d. h. an der Wasserseite der Gründungsfuge zugspannungsfrei, solange die Resultierende aller Kräfte in der Kernfläche der Sohle schneidet.

Die Neigung der luftseitigen Mauer m kann ebenfalls zur Berechnung der Kippstabilität herangezogen werden.

Berechnung der Kippstabilität...

... mit unterwasserseitigem Wasserdruck

$$m_{\text{erf}} = \sqrt{\frac{\gamma_W \cdot \left(1 - \frac{h_u^3}{h_o^3}\right)}{\gamma_B - \gamma_W \cdot \frac{h_u}{h_o} - k \cdot \gamma_W \cdot \left(1 - \frac{h_u}{h_o}\right)}} < m_{\text{vorh}}$$

... ohne unterwasserseitigen Wasserdruck

$$m_{\text{erf}} = \sqrt{\frac{\gamma_W}{\gamma_B - k \cdot \gamma_W}} < m_{\text{vorh}}$$

mit: m [-], γ_W [kN/m³], γ_B [kN/m³], h_u [m], h_o [m], k [-]

Gleitnachweis

Gewichtsstaumauer

$$s = \frac{(G - S) \cdot \tan \rho + \tau_c \cdot b}{W_h} \geq \eta$$

mit: s [-], G [kN/m], S [kN/m], $\tan \rho$ [-], τ_c [kN/m²], b [m], W_h [kN/m], η [-]

Innengedichteter Damm

$$s = \frac{(G_{\text{Luftseite}}) \cdot \tan \rho}{W_h + E_{\text{ah}}} \geq \eta$$

mit: s [-], G [kN/m], $\tan \rho$ [-], W_h [kN/m], E_{ah} [kN/m], η [-]

Oberflächengedichteter Damm

$$s = \frac{(G_{\text{Gesamtstaudamm}} + W_v) \cdot \tan \rho}{W_h} > \eta$$

mit: s [-], G [kN/m], W_v [kN/m], $\tan \rho$ [-], W_h [kN/m], η [-]

18. WEHRBEMESSUNG

Kritische Wassertiefe (Rechteckquerschnitt)

$$h_{kr} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2 \cdot g}}$$

mit: h_{kr} [m], Q [m³/s], b [m], g [m/s²]

Froude-Zahl

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}}$$

mit: Fr [-], v [m/s], g [m/s²], h [m]

Konjugierte Wassertiefen

$$\frac{h_2}{h_1} = 0,5 \cdot \left(\sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 1 \right)$$

mit: h [m], Fr [-]

Form des Wechselsprungs

Freier Wechselsprung mit Deckwalze

$$Fr_1 \geq 1,71 \qquad \frac{h_2}{h_1} \geq 1,97$$

Gewellter Wechselsprung mit Deckwalze (klein) und stehenden Oberflächenwellen

$$1,57 < Fr_1 < 1,71 \qquad 1,78 < \frac{h_2}{h_1} < 1,97$$

Gewellter Wechselsprung mit stehenden Oberflächenwellen und schwach ausgeprägten Grundwalzen

$$Fr_1 \leq 1,57 \qquad \frac{h_2}{h_1} \leq 1,78$$

mit: h [m], Fr [-]

Bernoulli-Gleichung

$$z_1 + h_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + h_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + h_v$$

mit: z [m], h [m], p [Pa], ρ [kg/m³], g [m/s²], v [m/s]

Wehrformeln

Freier Überfall nach Poleni

$$Q_{\ddot{u}} = \frac{2}{3} \mu \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h_{\ddot{u}}^{3/2}$$

mit: $Q_{\ddot{u}}$ [m^3/s], μ [-], b [m], g [m/s^2], $h_{\ddot{u}}$ [m]

Trichter-/Kelchüberfall

$$Q_{\ddot{u}} = \frac{2}{3} \mu \cdot U \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h_{\ddot{u}}^{3/2}$$

mit: $Q_{\ddot{u}}$ [m^3/s], μ [-], U [m], g [m/s^2], $h_{\ddot{u}}$ [m]

Heberüberfall

$$Q_{\ddot{u}} = b \cdot a \cdot \mu_H \cdot \sqrt{h_H \cdot 2 \cdot g}$$

mit: $Q_{\ddot{u}}$ [m^3/s], b [m], a [m], μ_H [-], h_H [m], g [m/s^2]

Wechselsprunglänge:

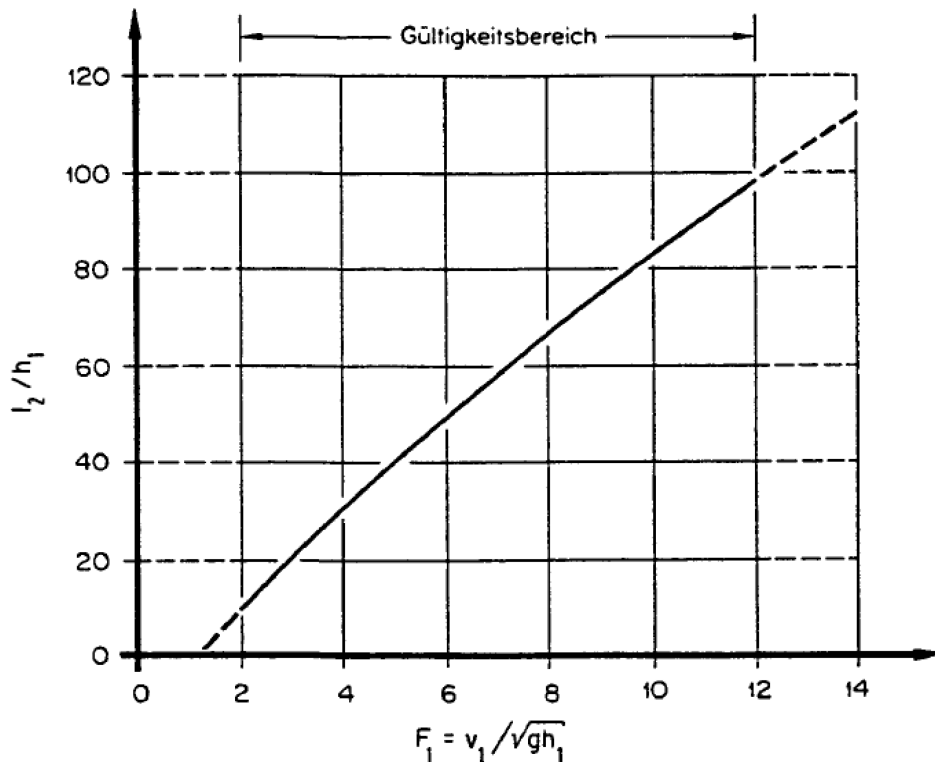


Abbildung 4: USBR-Diagramm (Wechselsprunglänge l_2 , bezogen auf h_1 für horizontales Rechteckgerinne, Quelle: Wasserbau, Vischer, D.; Huber, A., 1993)

Einstaugrad:

$$\varepsilon = \frac{h_u + a}{h_2} \quad 1,05 \leq \varepsilon \leq 1,15$$

mit: ε [-], h [m], a [m]

19. WASSERKRAFT

Leistungsabgabe von Turbinen:

$$P_T = \eta_t \cdot \rho \cdot g \cdot h_f \cdot Q$$

mit: P_T [W], η_T [-], ρ [kg/m³], g [m/s²], h_f [m], Q [m³/s]

Kraftwerksleistung:

$$P_K = P_T \cdot \eta_G \cdot \eta_U$$

mit: P_K [W], P_T [W], η_G [-], η_U [-]

Leistungsbedarf von Pumpen:

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot h}{\eta_{\text{ges}}}$$

mit: P [W], ρ [kg/m³], g [m/s²], Q [m³/s], h [m], η_{ges} [-]

Bemessung von Wasserkraftanlagen

Potentielle Energie

$$E_p = \frac{1}{3,6 \cdot 10^6} \cdot g \cdot m \cdot h_p$$

mit: E_P [kWh], g [m/s²], m [kg], h_p [m]

Potentielle Energiehöhe

$$h_p = \frac{p}{\rho \cdot g} + z$$

mit: h_p [m], p [N/m²], ρ [kg/m³], g [m/s²], z [m]

Gespeicherte potentielle Energie in einer Talsperre

$$E = \frac{1}{3,6 \cdot 10^6} \cdot g \cdot \rho \cdot S \cdot h_s$$

mit: E [kWh], g [m/s²], ρ [kg/m³], S [m³], h_s [m]

Kinetische Energie

$$E_k = \frac{1}{3,6 \cdot 10^6} \cdot g \cdot m \cdot h_k = \frac{1}{2 \cdot 3,6 \cdot 10^6} \cdot m \cdot v^2$$

mit: E_k [kWh], g [m/s^2], m [kg], h_k [m], v [m/s]

Gesamtenergie

$$E = E_p + E_k = \frac{1}{3,6 \cdot 10^6} \cdot g \cdot m \cdot (h_k + h_p)$$

mit: E [kWh], g [m/s^2], m [kg], h [m]

Energiehöhe nach Bernoulli

$$h_E = h_p + h_k = \frac{p}{\rho \cdot g} + z + \frac{v^2}{2g}$$

mit: h [m], p [Pa], ρ [kg/m^3], g [m/s^2], z [m], v [m/s], g [m/s^2]

Verlusthöhe (örtliche Verluste)

$$h_{v,i} = \zeta_i \frac{v_i^2}{2g}$$

mit: ζ_i [-], v_i [m/s], g [m/s^2], $h_{v,i}$ [m]

Gesamtverlust über Strecke L

$$h_{v,L} = \sum_L h_{v,i} = \sum_L \zeta_i \frac{v_i^2}{2g}$$

mit: $h_{v,L}$ [m], ζ_i [-], v_i [m/s], g [m/s^2]

Leistung einer Wasserkraftanlage

$$P = \eta_{tot} \cdot \frac{\rho \cdot g}{10^3} \cdot Q \cdot h_f = \frac{\rho \cdot g}{10^3} \cdot Q \cdot (h_f - \sum h_{v,i}) = \frac{c_p \cdot Q \cdot h_f}{10^3}$$

mit: P [kW], η_{tot} [-], ρ [kg/m^3], g [m/s^2], Q [m^3/s], h_f [m], h_v [m],
 c_p Leistungsüberschlagsbeiwert [$kg/(s^2 \cdot m^2)$]

Wirkungsgrade

$$\eta_{\text{tot}} = \eta_{\text{L}} \cdot \eta_{\text{T}} \cdot \eta_{\text{Getriebe}} \cdot \eta_{\text{G}} \cdot \eta_{\text{Trafo}} \cdot \eta_{\text{Eig}}$$

mit: η [-]

$$\eta_{\text{A}} = \frac{P}{P_{\text{hydr}}} = 1 - \frac{P_{\text{Verlust}}}{P_{\text{hydr}}} = \eta_{\text{tot}}$$

mit: η [-], P [W]

Regelarbeitsvermögen:

$$E_{\text{A}} = \int_0^t P(t) dt = \frac{9,81}{3600} \cdot \eta_{\text{tot}} \cdot \int_0^t Q(t) \cdot h_f(t) dt$$

mit: E_{A} [kWh], P [W], η [-], Q [m³/s], h [m]

20. SICKERLINIE

Kozeny-Parabel

Sickerlinie

$$x^2 + y^2 = (x + y_0)^2$$

$$y_0 = \sqrt{H^2 + d^2} - d$$

$$s = m_w \cdot H$$

$$d = B - s + 0,3 \cdot s$$

mit: x [m], y [m], H [m], d [m], s [m], m_w [-], B [m]

Korrektur der Sickerlinie

$$a + \Delta a = \frac{y_0}{1 - \cos \alpha}$$

mit: a [m], Δa [m], y [m], α [°]

Tabelle 18: Werte für die Korrektur der Sickerlinie

Winkel der luftseitigen Böschung α [°]	10	20	30	45	60
$\frac{\Delta a}{a + \Delta a}$	0,35	0,345	0,34	0,33	0,32

Durchsickerung

Damm

$$q_D = y_0 \cdot k_D$$

mit: q_D [$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$], y_0 [m], k_D [m/s]

$$q_D = k_D \cdot n \cdot \Delta h \cdot \frac{\Delta b}{\Delta s}$$

mit: q_D [$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$], k_D [m/s], n [-], Δh [m], Δb [m], Δs [m]

Untergrund

$$q_U = k_U \cdot \frac{H}{n_1 \cdot l} \cdot T$$

mit: q_U [$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$], k_U [m/s], H [m], n_1 [-], l [m], T [m]

Tabelle 19: Beiwert n_1

$\frac{l}{T}$ [-]	20	5	4	3	2	1
n_1 [-]	1,18	1,21	1,25	1,33	1,47	2,00

Standsicherheit der luftseitigen Böschung

trockene Böschung

$$\eta = \frac{\tan \phi}{\tan \beta}$$

böschungsparelle Sickerströmung

$$\eta = \frac{\tan \phi}{2 \cdot \tan \beta}$$

Wasseraustritt unterhalb rückgestauter WSL

$$\eta = \frac{\tan \phi}{\tan(2 \cdot \beta)}$$

mit: η [-], ϕ [°], β [°]