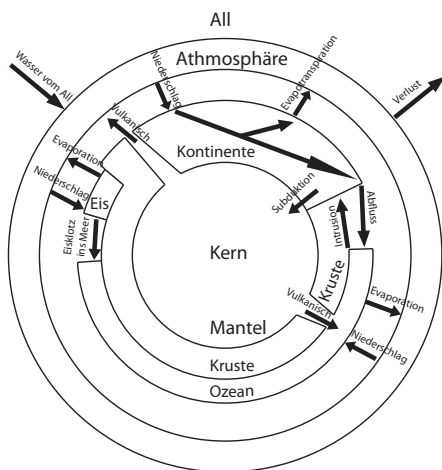


# Einführung

## Wasserkreislauf



**Abbildung 1:** Wasserkreislauf Hydrosphäre: 15 km in Atmosphäre, 1 km in Lithosphäre

## Beschreibung hydrologischer Prozesse, Modelle, Systeme

### Skalen

**Mikroskala** elementare Flüsse, Standorte, Teilflächen von Einzugsgebieten. Kann mit einem einzigen Parametersatz beschrieben werden.

**Mesoskala** komplexe Flüsse, Grundwasserleiter, Versorgungsgebiete, Flussgebiete, Einzugsgebiet <sup>1</sup>. Konzeptionelle Modelle.

**Makroskala** komplexe regionale und globale Flüsse, Klimamodelle, Stromgebiete, Kontinente.

**Regionalisierung** Übertragung von hydrologischen Kenngrößen von einem Gebiet in ein anderes.

### Hydrologische Daten

**Mittelwert** monatl. / jährl. Vorhersagen von Niederschlags- / Abflussverfügbarkeit.

**Extremwerte** für dimensionierung von Wasserbauwerken; Min/ Max von Niederschlag, Wasserstand, Fluss-, / Grundwasserspiegel.

**Zeitreihen** Bewirtschaftung von Wassersourcensystemen.

**Parameter** Zeitunabhängige Eigenschaften (Bodennutzung, Litologie, etc.).

**Variablen** Zeitabhängige Eigenschaften (Niederschläge, Temp, Sonnenstrahlung).

## deterministische Modelle

**physikalische M** System kann mit einer

<sup>1</sup>**Einzugsgebiet** Grösse der Horizontalprojektion einer Gebietsfläche, aus welche der Durchfluss an einem bestimmten Flussquerschnitt stammt. Wird durch Wasserscheiden begrenzt.

Gleichung vollständig beschrieben werden (Grundgesetze der Physik).

**konzeptionelle M** vereinfachte Näherung, Empirie.

**Black- Box M** Ursache- Wirkung- Beziehung zwischen In- und Output.

## stochastische Modelle

In Hydrologie verwendet, integriert Unsicherheiten (probabilistische Modelle/ Zeitreihen Modell). Technisch nutzbare Prognosen, bestimmte Bemessungsjährlichkeiten, keine präzisen Prognosen.

**Unsicherheiten** - interne Variabilität der natürlichen Prozesse

- Mangel an Verständnis der nat. Proz.
- Datenmangel (qualitativ / quantitativ)

## Wasserhaushalt

### Wasserressourcen

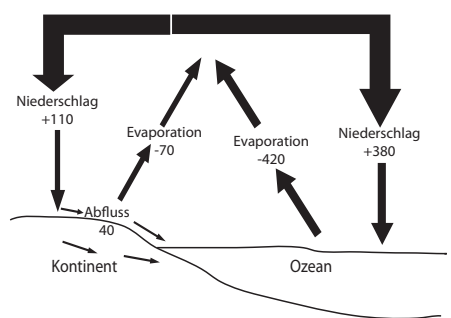
$$V_{\text{Hydrosphäre}} = 1.3 - 1.5 \cdot 10^9 \text{ km}^3$$

Verteilung: Ozeane & Meere: 96%, Gletscher & Polareis: 2%

Süsswassermenge (ohne Polarregion/ fossiles Wasser):  $0.4\% \equiv 5 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ . 10% der Erdoberfläche sind kultivierbar. Stadt braucht  $300x$  mehr  $H_2O$  als Nahrungsmittel.

**Wasserbilanz Global**  $A = 510 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ , Niederschlag = Verdunstung =  $1133 \text{ mm/a}$ . **mittlere Verweilzeit**  $T_r = \frac{V}{Q}$ ,  $Q$ : Fluss

Teil d	Bezugs A	Menge	Zeit
Hydrosp	$10^3 \text{ km}^3$	$10^3 \text{ km}^3$	
Meere	361300	1338000	2650 a
Eis	16228	24365	8400 a
Fluss	148800	2.1	18.5 d
Bio $H_2O$	510000	1.1	7 d
Grundw	134800	4000	286 a
Athmos.	510000	13	8.2 d
Tot.	510000	1386032	2400 a
Süssw	148800	35077	-



**Abbildung 2:** Größen des Wasserkreislaufs

## Wasserhaushalt der CH

Messung:  $P$ : Niederschlag (1481 mm/a),  $Q$ : Abfluss (961mm/a),  $\Delta S$ : Speicheränderung (7.5mm/a). Berechnung:  $E$ : Verdunstung (513 mm/a). Zufluss aus Ausland: 318mm/a, Gesamtabfluss: 1279mm/a.

$$E = P - Q \pm \Delta S$$

### \*Niederschlagsbildung

**Niederschlagsbildung** durch Kondensation von Wasserdampf. Aufsteigende Luftmassen (abkühlende Luftpakete).

### \*Wasserdampf

Quellen für die **Luftfeuchtigkeit**: Transpiration der Pflanzen, Verdunstung aus Meere. (etwas aus Boden, Seen, Flüsse).

## Kondensationsmechanismen

**Kondensation** findet dann statt, wenn der **Taupunkt** (Sättigungsverhältnisse) erreicht ist. Plus Staubpartikel. Grösse der Wassertropfen:  $3 - 3000 \mu m$ , durch aufeinandertreffen von mehreren Tropfen. **Schnee** entsteht durch Berührung und Agglomeration von Eiskristallen.

**Koaleszenz** Wasserdampf hat verschiedene Dampfdrücke für Wasser oder Eis. Eine Wolke bildet sich um einen Kondensationskern. Die verschiedenen Dampfdrücke können dazu führen, dass der Dampf gegenüber der Flüssigkeit gerade gesättigt, gegenüber dem Eis aber übersättigt ist. Darum neigen Eispartikel zur Aufnahme von Wasser und damit zur Vergrößerung. Neue Kondensationskerne entstehen durch Kollisionen, ausgelöst durch Fallbewegung oder Turbulenzen.

## Niederschlagsarten

**Konvektive NS** Heisse Erdoberfläche, dadurch kontinuierlicher Aufstieg. Kurze NS Dauer, begrenzte Flächenausdehnung, unterschiedliche Intensität.

**Gewitter** Bildung (Kondensation, innere Turbulenzen, Koaleszenz), Reife (Niederschlag in Form von grossen Tropfen oder Hagel, starke Böen, starke Aufwinde), Auflösung (schwach aber andauernde Niederschläge, Abwinde übernehmen Dominanz).

**Zyklonale NS** auch **advective NS** verschiedene Luftmassen. Hindernis = kalte Luftmasse.

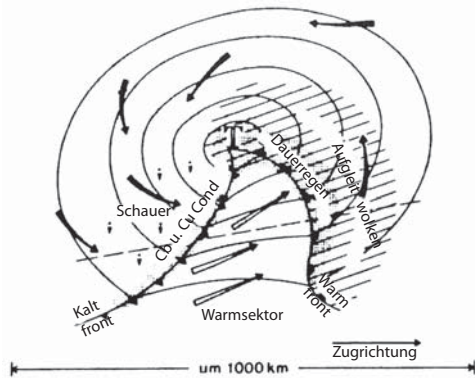


Abbildung 3: Zyklone

Lang anhaltender Landregen, grosse Regionen. Linksdrehende Luftwirbel. Ablauf: Mit dem Anzug der Zyklon kommt mit Landregen. Keine Niederschläge zwischen den Fronten. Mit dem Aufholen der Kaltfront setzt konvektive Schauerneigung ein.

**Orographische NS** Hindernis = Berg. Luv-seite: feucht. Leeseite: trocken.

## Hydrologische Prozesse

### Grundlagen Struktur von Einzugsgebieten

Entstehung der **Fließgewässer**: Niederschlag > Verdunstung + Gebietsrückhalt (Speicherung, Infiltration). Beziehungen zwischen den Strukturen der Flussnetze, Flusslängen, Einzugsgebiet und Abflussregime können mit Hilfe von Klima, Geländehöhe, Relief, Vegetation, Boden und Untergrund untersucht werden.

**Hauptzonen im Flusssystem** obere **Produktionszone** Hauptbildungsgebiet für Abfluss und Feststoffe. mittlere **Transferzone** Abtransport von Wasser und Feststoffen. untere **Depositionszone** Ablagerung von Feststoffen (Sedimentation) im Mündungsgebiet.

**Prinzip der minimalen Varianz** Verlust an potentieller Energie auf den gesamten Lauf gleichmässig verteilen. **Prinzip der Minimierung der Arbeit** Minimierung der Verluste an potentieller Energie im gesamten System.

### Niederschlag

**PunktNS** bestimmte Stelle, lokale Erfassung. **GebietsNS** NShöhe/ -intensität über ein definiertes Gebiet.

**Messung PunktNS** Auffangfläche genormt (200cm<sup>2</sup>). **Hellmann** 1.5 m über Boden, tägliche Lesung und Leerung. **Kontinuierliche Aufzeichnung Syphonschreiber** automatische Entleerung, Schwimmer

mit Schreiber gekoppelt. Durch Auswertung der Papierstreifen kann Intensität berechnet werden. **Messwippe** Doppelkammersystem. Eine Kammer wird gefüllt (Niederschlagsmenge = 0.1/0.2 mm), wenn diese gefüllt ist, wird diese geleert und die andere gefüllt.

**Niederschlagswaage** In 1min Abstand wird das Gewicht des kumulierten NS gemessen. Ermittlung der NSintensität.

**Genauigkeit und Fehler NSMessung** systematische F. Installationsfehler, Hindernisse, auch Wind. zufällige F.

Deformation des Windfelds <sup>a</sup>	2-10%
für Schnee	10-50%
Benetzungsverluste <sup>b</sup>	2-10%
Verdunstungsverluste	0-4%
Ein- und Ausspritzen	1-2%
Schneewehen und Drift	?
Schräg fallender NS	?
Total bei Regen	5-15%
Total bei Schnee	20-50%

<sup>a</sup>Turbulenzen blasen Niederschlag vom Gerät weg

<sup>b</sup>Vernachlässigbar für Starkniederschläge

**Gerätespezifische Unterschiede** Hellmann-NSMesser: grössere NSMengen als Kippwaage.

**Homogenität der NSMessung** optischer Vergleich von Ganglinien benachbarter Stationen. Inhomogene Abflüsse: Abweichung um 10% vom langjährigen Mittel. Systematische F. mit **Doppelsummenlinien**. *y*: kumulierte Werte der zu überprüfenden Station. *x*: kumulierte Werte einer oder im mehrerer (Mittel!) Stationen. ⇒ homogen: Gerade, inhomogen: Knick. Analog: Vergleich von Abflüssen. Knick = Speicher, Wasserentnahme. Parallel versetzte Geraden: temporärer Sprung. Kurve statt Knick: Trend.

**Korrektur von NSMessungen** monatliche Mittelwerte → Korrekturdaten. Hellmann-NSMesser: Windfeldefformation, Haftwasser, Verdunstungsverluste max. 1%.

Korrektur für Hellmann-NSMesser, monatlich.  $N_k$ : korr. Monatssumme [mm],  $k$ : Umrechnungsfaktor (Tab),  $N_g$ : gem. Monatssumme,  $\Delta N_{2+3}$ : Haftwasserverlust, Abhängig von NSForm.  $q$ : NSTage,  $Q$ : %-Schneeanteil an Monatssumme (Tab.)

$$N_k = k(N_h + \Delta N_{2+3})$$

$$\Delta N_{2+3} = 0.15q \left( 2 - \frac{Q}{100} \right)$$

**Zeitliche Verteilung PunktNS Hyetograph** NSGanglinie, NShöhe oder NSintensität als Funktion der Zeit (Histogramm). Kumulative NSGanglinie. NSintensität = Höhe/Zeit. Geben Daten für Dimensionierung von Abfluss-Kontroll-Bauwerken.

**Gebietsniederschlag** örtlich verschieden in Bezug auf räuml. Variabilität & Intensität,

vor allem bei konvektiven NS. Relief (Luv-, Leegebiete), Beregnungsrichtung (Hochwasser!). Überregnung in Entwässerungsrichtung ⇒ Verschärfung der Abflussspitze. Flächenhafte Messung mit Radar- und Satellitenbeobachtung (Reichweite: 40-230 km), Lage und Zugrichtung von NS. Radarstrahl wird durch NS und Absorption der Atmosphäre abgeschwächt. Effekt wird mit abnehmender Wellenlänge vergrößert.

**Niederschlagsregime** Jahresgang. **Intensitätsganglinie** zeitl. Verlauf von StarkNS ⇒ Hochwasserganglinie. **Tropentyp** Aequat. Regenzone, doppelte Regenzeit, Max. Apr, Nov. **Randtropentyp** eine Regenzeit. **Winterregentyp** Subtropen mittlere Breiten- Mittelmeer. **Typ d. gemässigten Zonen** NS in allen Jahreszeiten, 2 Max, modifiziert durch Lage zum Meer, Westwindströmung, geodätische Höhe.

Räumliche Verteilung der NS durch planetarische, atmosphärische Zirkulation bestimmt.

**Extremniederschlag** grosse NSHöhen (advektive Vorgänge, kleine Tropfen), Hochwasserentstehung in grossen Einzugsgebieten. Starke NSintensitäten (konvektive Vorgänge, grosse Tropfen, Gewitter). Schwellenwert für **Starkregen** (D):

$$P = \sqrt{5t - \left(\frac{t}{24}\right)^2}$$

*P*: NShöhe (mm), *t*: Regendauer (min).

**DDF** Depth duration frequency curves. Regenhöhe-Dauer-Häufigkeits-Kurve.

**IDF** Intensity duration frequency curves. Intensitäts-Dauer-Häufigkeits-Kurve.

**Schneefall** Weltweit: 23% Erdoberfläche ≡ 50% Landfläche. **Abhängig von** Höhe der 0° Grenze, Höhenlage Einzugsgebiet, Boden-zustand, Landschaftscharakter, Orographie (Luv > Lee), Exposition, Gletscher (prägt Abflussregime). **Schneemessung** Schneefallrate messen, Schneedeckung ermitteln. **Wasservolumen einer Schneedecke** Schneehöhe (cm), Dichte (g/cm<sup>3</sup>). Wasseräquivalent (mm), Bedeckungsgrad (%).

### Interzeption

Verluste durch Benetzung der Vegetationsoberfläche, bevor NS auf der Bodenoberfläche auftritt. Geht über Verdunstung wider in die Atmosphäre zurück. Mitteleuropa: Verluste 10-20%. **Messung der Interzeption** **Baumkrone** *P*: Regenmenge auf freier Geländeoberfläche, *P<sub>St</sub>*: Entlang Baumstamm, *P<sub>K</sub>*: Kronendurchlass.

$$I = P - (P_{St} + P_K)$$

**Sträucher  $P'$ :** Durchgesickerte Wassermenge am Ende eines Gartenbeets. Undurchlässiger Boden, Boden kann Wasser speichern.

$$I = P - P'$$

**Zeitliche Variation** Beginn des Ereignis, grösster Einfluss, danach wird der Rückhalt durch den vollen Interzeptionspeicher immer kleiner.  $I_{tot}$ : gesamte Interzeption.  $P_{tot}(t)$ : kumulative Regen zur Zeit  $t$

$$I(t) = I_{tot} \left( 1 - e^{-P_{tot}(t)/I_{tot}} \right)$$

### Verdunstung

Übergang von Wasser flüssiger Phase in die Gasphase. Energiequellen für Verdunstung: Sonnenstrahlung, Wärmetransport durch d. Wind (Advektion), Wärmespeicherung im Boden/ Wasser.

**Evaporation** Verdunstung ohne Mitwirkung der Pflanzen. **Evapotranspiration** mit Pflanzen (Transpiration), Abhängig vom Vegetationstyp und Stadium der Veg.phase. **Klimatische Faktoren** Sonnenstrahlung, atmosph. Windzirkulation, rel. Feuchtigkeit, Luftdruck. **morphologische Fakt.** Oberfläche, Höhe über Meer.

potentielle Verdunstung  $\Leftrightarrow H_2O$  kein limitierender Faktor  $\neq$  effektive Verdunstung (vorhandenes  $H_2O$ ).

**Evaporation freie Wasseroberfläche Form und Ausdehnung der Wasseroberfläche** Luftfeuchtigkeit eines Windes wird über einer freien Wasseroberfläche höher. Dadurch sinkt die Evaporation. Langer See, Wind parallel hat kleinere Verdunstung als gleicher See, aber Wind senkrecht. **Wassertiefe** Winter: See tief, hohe Evaporation. See flach, tiefe Evaporation. Sommer umgekehrt. **Salzgehalt.** Hoher Salzgehalt (1%) reduziert Evaporation (1%). **unbewachsener Boden**  $E_{Boden} \cong cE_{Wasser}$ .  $c$ : Abhängig vom Bodentyp. Evapor. ist kleiner als über freie Wasseroberfl. Sand:  $c \approx 1$ , Tonig:  $0.75 < c < 0.9$ . **Messung** **Evaporationsbehälter** nach oben offen. **Perkolationsmessgerät.** **Piché-Evaporimeter** Reagenzglas. Wasser kann nur über Verdunstung austreten. [mm/Tag]. **indirekte Abschätzung** Energie- oder Wasserbilanzmethode. **Energiebilanzmethode** ohne Vegetation.  $R_n$ : Nettostrahlung,  $R_s$ : Solarstrahlung,  $R_r$ : reflekt. Strahl.  $R_c$ : effektive, langwellige Ausstrahlung,  $\Delta H$ : Gespeicherte Wärme,  $H_s$ : Verlust fühlbarer Wärme,  $H_e$ : Verlust an Verdunstungswärme  $H_o$ : zugeführter Wärmefluss im Boden,  $H_o$ : abgeführter WF im Boden.

$$R_n = \Delta H + H_s + H_e - H_i + H_o$$

$$R_n = R_s - R_r - R_c$$

**Evapotranspiration Messung** Messung mit Lysimeter (mit Boden gefüllter Behälter auf Waage).  $P$ : Zufluss,  $Q$ : Abfluss,  $ET$ : Evapotransp.  $S'' - S'$  Speicherung (Nassgewicht - Trockengewicht).

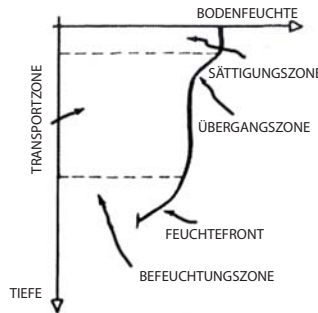
$$P = Q + ET + (S'' - S')$$

**indirekte Schätzung Wasserbilanzmethode**  $ET$ : Evapotransp.,  $P$ : NS,  $I$ : Interzeption,  $R_G$ : Grundwasserabfluss,  $R_O$ : Oberflächenabfluss,  $S$ : Speicherung (vernachlässigbar für Beobachtungen  $> 1a$ ). (alles in [mm/t]).

$$ET = P - I \pm R_G - R_O \pm S$$

### Infiltration

NS bewegt sich durch Bodenoberfläche, erhöht Bodenfeuchte, füllt Aquifer, speist Fließgewässer während Trockenperioden. **Grundwasserspiegel** Grenze zwischen gesättigter und ungesättigter Zone.



**Abbildung 4:** Bodenfeuchte zonen während Infiltration

Infiltrationsrate [mm/t]:  $f$  (potentiell resp. aktuell), kumulative Infiltration:  $F = \int f dt$

### \*Boden

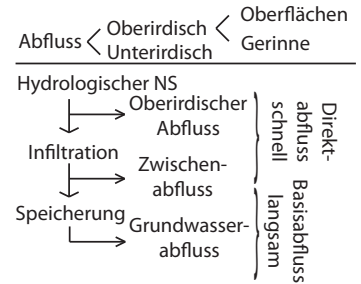
**Messung der Bodenfeuchte** Gravimetrisch wägen, trocknen, wägen. Prozentwert des Trockengewichts. **Tensiometer** Bodenwasser „spannung“, gut für feuchte Böden, Keramikende. **Neutronen sonde** emittiert Neutronen, reagieren mit Wasser und werden detektiert. **Messung der Infiltration** **Infiltration** Ringe im Boden mit Wasser, das infiltriert.

### Infiltrationsprozess

Gleichung von Richards, Gleichung von Philip. Weg des  $H_2O$  durch den Boden.

### Abfluss

Bildung: Anfang des NS: Muldenspeicherung. sobald Infiltration eintritt, Bodenwasserspeicherung (langanhaltend: Retention, Abbau durch Verdunstung. kurzzeit: Detention, Abbau durch Ausfluss.). Ausfluss aus Bodenwasserspeicher: **ungesättigter Wasserfluss** in ungesättigter Bodenzone, Grundwasserfluss durch gesättigten Aquifer, Oberflächenabfluss (Gerinneabfluss) über Landoberfläche.



**Abbildung 5:** Abfluss

**Oberflächenabfluss** wird gebildet durch: Infiltrationskapazität überschritten, Sättigungsflächenabfluss durch Sättigung von unten. **Grundwasserabfluss:** Versickerung, später Exfiltration. Grössere Drücke auf untenliegende Grundwasserbereiche, die ausgedrückt werden. **Interflow**, Zwischenfluss, versickert in undurchlässigere Tiefe, fliesst Hangparallel ab.

**Hortonscher Oberflächenabfluss** Durch Vernachlässigung der Interzeption durch Vegetation  $\Rightarrow$  Oberflächenabfluss ist der Teil des Regens, der nicht durch Infiltration zurückgehalten wird. (limitierende Vegetation, Siedlungsgebiete, geringe Infiltrationskapazitäten (semi-aride, aride Gebiete)).

**Bodenfiltrationskapazität**  $f$  [mm/h], Regenintensität  $i$ .  $i < f$ : gesamter Regen wird absorbiert, kein Oberflächenabfluss.  $i > f$ : Oberflächenabfluss mit Rate  $(i - f)$  (rainfall excess).

**Oberflächen-Mulden-Speicherung**  $\propto$  Höhe des Oberflächenabfluss.

**Unterirdischer Abfluss, gesättigter Oberflächenabfluss** Infiltrationskapazität übersteigt die Regenintensitäten (humide Klimazonen). Boden wird von unten durch den unterirdischen Abfluss gesättigt. Meist an Uferböschungen. Gebiete die tatsächlich zum Abfluss im Fluss beitragen: *variable source areas/ partial areas*. **Dunniansischer Abfluss** NS < Sättigung  $\Rightarrow$  Infiltration, sonst Oberflächenabfluss.

### Abflussmessung

**Durchflussmessung Tracer** (Fluoreszenzfarbstoffe, Kochsalz), Tracer darf nicht durch Versickerung, Ableitung oder Stillwasserzonen verloren gehen. **Fließgeschwin-**

**digkeitsmessung** Wasserstands- und Fließquerschnittsmessung. **Messflügel** (# Umdrehungen), **induktive Messung** Wasser = bewegter Leiter  $\Rightarrow$  Spannung, welche an Elektrode abgegriffen werden kann, **Ultraschall** Dopplereffekt, in Rohrleitungen, **Tauchstab** Messung des Drehmoments. **Hydraulische Berechnungen** b. Kanälen und Wehren (Venturi-Kanal, Thompson-Wehr). **Wasserstandsmessungen** registrierend vs. nichtregistrierend. Höhe, Druck, Schwimmer. Druckmessumformer (hydrostat. Druck), Einperlgerät (Luftblase an Wasseroberfl.), Hochwassergrenzwertpegel (Markierpegel), Pulsradar (über Wasserpegel, mittels EM-Welle). **Genauigkeit Abflussmessung Flügelmessung** 5% (zufälliger Fehler) + systematische Fehler, Referenzmessung, **Verdünnungsmethode** ähnliche Fehler. **Lattenpegel** 0.5-5cm, **Hochwassergrenzwertpegel** 3-10cm, **Schwimmerpegel**  $\pm 1$ cm, **Drucksonden** 2-3cm, Vorsicht bei kalkhaltigem Wasser, **Einperlgeräte**  $\pm 1$ cm, **Pulsradar**  $\pm 1$ cm. **Systematische Fehler** bei der Abflussmessung: Pegelrelationen sind nur bei stationären Verhältnissen gültig. Im Hochwasserfall: instationäre Verhältnisse.

**Pegelrelation** Berechnung der Eichkurve aus Abflussdaten (Kombination von Geschwindigkeits- und Wasserstandsmessung). Durchflussquerschnitt:  $W = f(Q)$ . Wasserstands- Durchfluss- Beziehung ( $Q$ : Durchfluss,  $W$ : Wasserstand,  $a, n$ : Parameter der Potenzfunktion,  $b$ : Höhendifferenz zwischen Pegelnulld und Sohlenniveau.). Eindeutigkeit ist bei stationärem Fließen:

$$Q = a(W - b)^n$$

$$\rightarrow \log Q = \log a + n \log(W - b) \quad \text{linear}$$

Mittlerer, quadratischer relativer Fehler der **Durchflusskurve**.  $Q_i$ : gemessenes  $Q$ ,  $\bar{Q}_i$ : aus Wasserstand- Durchfluss- Beziehung,  $n$ : Anzahl Messwerte.

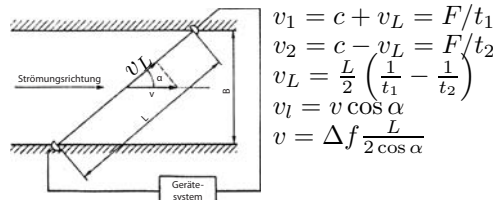
$$m_{Q(W)} = 100 \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_i - \bar{Q}_i}{\bar{Q}_i} \right)^2} [\%]$$

Durchflusskurve muss korrigiert werden, wenn Grenzwerte überschritten.  $MQ$ : Mittlerer Durchfluss.

- 20% Niedrigwasserbereich ( $Q \leq 0.5MQ$ ) (aufgrund von Erosion und Sedimentation ist die Messung mit Fehlern verbunden)
- 5% Mittelwasser ( $0.5MQ < Q \leq 2MQ$ )
- 10% Hochwasser ( $Q > 2MQ$ )

**Fließgeschwindigkeit Flügelmessung**:  $v$ : Geschwindigkeit,  $A$ : Querschnittsfläche,  $Q$ : Abfluss:  $Q = vA$ ;  $a, b$ : Konstanten des Flügels,  $n$ : Anzahl Umdrehungen:  $v = a + bn$ ;

Fläche  $i$ -te Lamelle ( $b_i$ : Breite der Lamelle):  $A_i = h_i \Delta b_i$ ,  $h_i = 1/4h_{i1} + 2h_{i2} + h_{i3}$ : arithmetisches Mittel. **Mittlere** Querschnittstiefe:  $h = A/b$ , Querschnittsgeschw.:  $v = Q/A$ , Oberflächengeschw.  $v_0 = \frac{1}{b} \sum B_i v_{i,0}$ , Bezugswasserstand  $W = \frac{1}{Q} \sum Q_i W_i$ . Genauigkeit der zufälligen Fehler: 5%. **Induktion** Ähnlich wie Messflügel, aber mit Strom-/ Spannungsmesser, misst EM-Induktion, verursacht durch  $H_2O$ . **Ultraschall** Schallsignal breitet sich im strömenden Wasser mit der Strömung schneller aus, als dagegen.



**Abbildung 6: Ultraschallmessprinzip**  
**Tauchstab nach JENS** Fließende Wasser erzeugt ein Drehmoment gegen die Schwerkraft. Gegenmoment, so dass der Stab wieder vertikal im Wasser hängt. Messtiefen: 20-100cm. **Tracermethoden Verdünnungsmethode** Markierungsstoff wird eingepfropft und nach der Messtrecke die Verdünnung gemessen. **Salzverdünnungsmessung** Beziehung zwischen Leitfähigkeit und Salzkonzentration.  $K$ : Menge Salz.  $K = Q \int_T k dt$ . Alternativ  $q$ : konst. Injektion,  $k_0, k_1$ : Konzentrationen:  $qk_0 = (Q + q)k_1$ . Eichbeziehung Leitfähigkeit- Verdünnung ( $p$ ).  $p = K/K'$  ( $K$ : Menge im Eichgefäß,  $K'$ : zugesetzte Menge Salzlösung).  $Q = qp_0$ . **radioaktive Tracer**  $A_0, A_1, A_2$ : Aktivität (unbelastet, beim Einlass, im Messquerschnitt),  $q$ : Menge pro Zeiteinheit.  $QA_0 + qA_1 = (Q + q)A_2$ .

**Zeitliche Charakterisierung Hydrologisches Regime**<sup>2</sup> hydrologisches Gesamtverhalten eines Fließgewässers.  
 - ephemere Flüsse: führen nur bei Regen  $H_2O$ , kein Basisabfluss  
 - intermittierende Flüsse: während NS Periode Basisabfluss, Trockenzeit kein  $H_2O$ . Süden EU.  
 - perennierende Flüsse ganze Jahr Wasser, Basisabfluss bildet wesentlichen Teil des Abflusses (Mittel-/ NordEU).

**CH Regiemtypen** alpine, mittelländisch-jurassische, südalpine Regime.

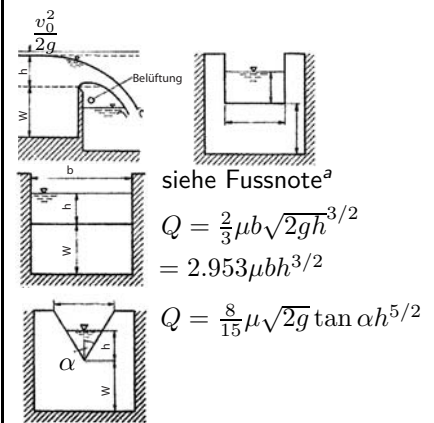
**Jahresganglinie** Darstellung von beobachteten/ berechneten Daten in der Reihenfolge ihres zeitlichen Auftretens. **Hydrologisches Normaljahr** wenn die Ganglinie der mittleren GL und Dauerlinie der mittleren DL für 10 Jahre entspricht. Abflusssumme =  $\int_{t_1}^{t_2} Q dt$ . **Summenlinie** fortschreitende

Summierung der Ganglinie über Zeitachse. Wendepunkt der Summenlinie = Min/ Max der Ganglinie, Steigung = Abfluss. **Dauerkurve** Summenlinie eines Normaljahres. Zeigt Unter-/ Überschreitungshäufigkeit eines bestimmten täglichen Abfluss an.



**Abbildung 7: Abflussregimetypen**

**Messwehre**



**Abbildung 8: Messwehre**

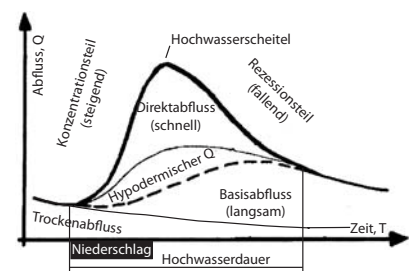
$$^a Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \left[ \left( h + \frac{v_0^2}{2g} \right)^{3/2} - \left( \frac{v_0^2}{2g} \right)^{3/2} \right]$$

$$\mu = 0.615 \left( 1 + \frac{1}{1000h+1.6} \right) \left[ 1 + 0.5 \left( \frac{h}{h+w} \right) \right]$$

$w > 0.3m, h/w \leq 1, 0.025m \leq h \leq 0.8m$

**Niederwasser** saisonales Abflussminimum. ausbleibende NS verbunden mit hoher Temp. und Verdunst. In alpinen Gebieten setzen Niederwasserperioden erst im Okt. bis Dez. ein, Dauer wird von der Kältetem. und den Höhenlagen des EZG bestimmt.  $Q < 0.15$  bis  $0.3 MQ$ . **Dürre**: anormal trockenes Wetter, Wasserbilanz unausgeglich. **landwirtschaftl. Trockenheit** Wassermangel in Wurzelzone. **Meteorologische Trockenheit** NS unter dem mittleren NS. **Trockenperiode** 0.9mm/15d, 4.9mm/30d.

**Abflussganglinie von Extremereignissen** Hochwasserabfall ist eine Funktion der Gebietsspeicherung.



**Abbildung 9: Hauptabflusskomponenten**

<sup>2</sup>Regime relativen oder absoluten Schwankungen eines Wasserhaushaltelementes innerhalb eines bestimmten Zeitraums.

### Schnee und Eis

Beeinflusst Wasserhaushalt eines EZG: Wasserspeicher, Wärmehaushalt, Abflussbildung durch Schneeschmelze. **Messgrösse der Schneedecke** Höhe  $h_s$  [cm], Dichte  $\rho_s$  [ $kg/m^3$ ], Schneedauer [d], Wasseräquivalent  $W_A = \frac{1}{100} \rho_s h_s$  [mm]. Dichte nimmt mit dem Alter der Schneedecke zu.

Eis-/ Schneart	Dichte	Dichte
Wasser	1000	
lockerer Neuschnee	50-65	
mit leichtem Wind		65-80
mittlerer Wind		250-290
starker Wind		300-360
setzender Schnee	70-190	
gesetzter Schnee	200-300	
nasser Neuschnee	400-800	
Firnschnee	500-850	

Schneehöhe eines Schneefalls nimmt mit der geodätischen Höhe ab, Mächtigkeit der Schneedecke nimmt mit der Höhe zu. Vegetation (Wald) wirkt auf die Schneedeckenverteilung.

### Schneesmelzprozess

Schneedecke weist Schichtung auf, alle Phasen des Wasser liegen nebeneinander. Entwicklungsgang der Schneedecke: Akkumulation, Metamorphose, Ablation.

### Hydrologische Modellierung von Einzugsgebieten

#### Niederschlag-Abfluss-Modelle

Variabilität des Wasserkreislaufs Vorhersagen, Datengenerierung um Informationen über die hydrologische Variabilität zu untersuchen. **Deterministische Modelle** physikalische Gesetze und Beziehungen. **Probabilistische Modelle** Statistik. Modelle sollen wenn möglich auf Linearität, Zeitinvarianz und Block-Parametrisierung beruhen. Upscaling kaum möglich.

**Modellklassen** Vollständige Prozess- und physikalisch begründete gegliederte Mod.

- vollständige Massen-, Energie und Impulserhaltungssätze, Wechselwirkung zwischen Boden, Vegetation und Atmosphäre, Oberflächenabfluss, Wasserbewegung durch un-/gesättigte Zonen zu beschreiben, grosser Aufwand

- konzeptionelle/ empirische Komponenten, einzelne Prozesse durch einfache mathematische Beziehungen beschreiben.

**Konzeptionelle Blockmodelle**

elementare Konzeption (Linearspeicher, linearer Kanal), EZG kann als ganzes charakterisiert werden, alle Prozesse können ge-

trennt reproduziert werden → Anzahl Parameter kann hoch sein.

**Input-Output**, auch Blackbox-Modelle, einzige Transformationsbeziehung, ohne inneren Bezug zum EZG. Minimale Rechenanforderung.

**Kontinuierliche Simulation** Wasserkreislauf als ganzes simulieren. vs **Ereignisbasiert** bestimmte und begrenzte Zeitspanne. **Grundlegende Schritte für Modellierung**

- Definition d. Problemstellung
- Wahl der Klasse des hydrol. Modells
- Wahl des M-Typs in der gewählten Klasse
- Kalibration (Parameterschätzung)
- Beurteilung des Anwendungsbereichs und der Leistungsfähigkeit
- Anwendung

### Punktniederschlag

Wichtig für Abfluss (Hoch-/ Niederwasser)-Vrohersage, Rekonstruktion des natürlichen Abflusses, Simulation des Wasserhaushaltes (Auswirkung anthropogener Veränderungen), Dimensionierung von Anlagen, rationale Bewirtschaftung von Speicher usw.

**Stochastische Modellierung** synthetische Regendaten erzeugen. Regenereigniss lässt sich durch Poisson-Prozess beschreiben.  $P[N(0, t) = n] = \frac{\lambda^n e^{-\lambda t}}{n!}$ . WSK, dass  $n$  Realisationen innerhalb von  $\Delta t$  auftreten.

### Gebietsniederschlag

Eingangsgrosse für Gebietsbilanzen, Analyse abgelaufener Hochwasser, Synthese von Bemessungshochwasser. Kleine EZG ( $A \leq 10 km^2$ ) wird Punktmessung als GebietsNS angesetzt.

**Arithmetisches Mittel** ebenes Gelände, gleichförmige Verteilung der Messstationen, resp. einzelne Messwerte haben keine grosse Abweichung zu Jahreswerten.  $\bar{P}$ : GebietsNS,  $n$ : # Stationen,  $P_i$ : NSSumme der Stat.  $i$ .

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$$

**Thiessen-Polygon-Methode** Bei ungleichförmiger Verteilung der Stationen: Messwert jeder Station wird mit einem Flächengewicht versehen. Jeder Punkt wird der nächsten NS-Station zugeordnet.  $n$ : Anzahl Teilflächen,  $\gamma_i = A_i/A_{tot}$ : Flächengewicht. Beschränkung der Flächen im Gebirge  $\leq 10 km^2$ .

$$\bar{P} = \sum_{i=1}^n \gamma_i P_i$$

**Isohyetenmethode** (Linien gleicher NSHöhen) Orographische Effekte können berücksichtigt werden.  $\Delta A_i$ : Fläche zwischen zwei

Isohyeten,  $P_i^{(*)}$ : mittlerer NS im  $\Delta A_i$ .

$$\bar{P} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \Delta A_i P_i^{(*)}$$

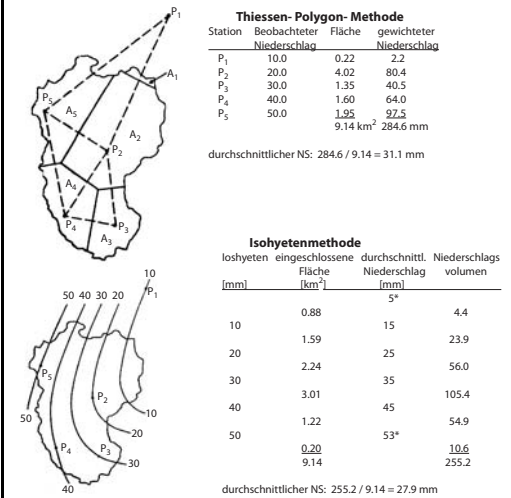


Abbildung 10: GebietsNS

### Modellierung der Einzugsgebietsverluste

**Interzeption**  $I_{tot}$  = Summe von  $H_2O$ , das am Ende eines NSereignisses auf der Vegetation gespeichert ist und von den Pflanzen während des Regens verdunstet.  $t_p$ : Regendauer [h],  $E$ : Evaporationsrate [mm/h]  $2.5 \cdot 10^{-3} mm/h$ ,  $\hat{S}$ : max. Speicherung [mm] 2-15mm,  $c$ : Verhältnis der vegetationsbedeckten Fläche [-].

$$I_{tot} = \hat{S} + cET_p$$

generelle Ansatz:  $a, b, c$ : Faktoren, Abhängig vom Vegetationstyp,  $n$ : Vegetation,  $P_{tot}$  kummulierte Regenmenge.

$$I_{tot} = c(a + bP_{tot}^n)$$

**Verdunstung Schätzung der Evaporation** **Formel von Truoc**  $E$ : Evaporation [mm/t],  $P$ : Totale Regenmenge [mm/t],  $a$ : maximale Wassermenge, welche für Evaporation verfügbar ist [mm/t],  $a = 1$  trocken,  $a = 10$  nass,  $L$ : Sonnenfaktor [-],  $T$ : mittlere Lufttemp. [°C],  $R_g$ : Globalstrahlung [cal/(cm d)],  $R_s$ : Strahlung ausserhalb der Atmosphäre (tab),  $N$ : effektive Sonnenscheindauer [h],  $N_{h,pot}$ : pot. Sonnenscheindauer [h].

$$E = \frac{P_{tot} + a}{1 + \left(\frac{P_{tot} + a}{L}\right)}$$

$$L = \frac{1}{16} \left(T + \sqrt{R_g}\right)$$

$$R_g = R_s \left(0.18 + 0.62 \frac{N}{N_{h,pot}}\right)$$

### Schätzung der potentiellen Evapotranspiration

Thornthwaite grossräumige Abschätzung, Monatssummen.  $PET$ : pot. Evapotranspiration [mm/mt],  $b$ : Koeff. Fkt von Saison/Breitengrad (siehe Tab.),  $T$ : Temp [°C],  $I = \sum_{j=1}^{12} i_j$ : thermaler Jahresindex,  $i_j = (\frac{T_j}{5})^{1-5.14}$ : Monatsindex,  $a = \frac{1.6}{100} I + 0.5$ .

$$PET = 16b \left( \frac{10T}{I} \right)^a$$

Werte für  $b$ :

J	F	M	A	M	J
0.76	0.80	1.02	1.14	1.31	1.33
J	A	S	O	N	D
.134	.123	1.05	0.93	0.77	0.72

Für MittelEU sind die Werte ab der zweiten Jahreshälfte zu hoch.

Blaney- Criddle Tageswerte.  $T$ : Tagesmittel Lufttemp [°C],  $S_0$ : täglich astronomisch mögliche Sonnenscheindauer,  $S_{Jahr}$ : Jahressumme der astronomisch möglichen Sonnenscheindauer. Gl.(1) für Westen USA, Gl.(2) für MittelEU.

$$PET_{BC} = (8.128 + 0.457T) \frac{S_0 100}{S_{Jahr}} \quad (1)$$

$$PET = -1.55 + 0.96 PET_{BC} \quad (2)$$

Penman  $E$ : Evaporation,  $f_{crop}$ : Anbaukoeff. (Getreide- und Vegetationsentwicklung) (Tab)

$$PET = f_{crop} E$$

**Schätzung der aktuellen Evapotranspiration AET** Bei ausreichender Wasserversorgung: AET=PET.

**Hydrologisches Defizit**  $H_2O$ -Bilanzierung dient um  $H_2O$ -speicher zu quantifizieren, Defizite zu ermitteln. **Wasserbilanzgleichung**,  $P$ : NS,  $Q$ : Abfluss,  $ET$ : Evapotranspiration,  $S_2 - S_1$ : Speicherung (Speichervolumen zu Zeit  $t_1, t_2$ ),  $I$ : Interzeption (vernachlässigbar).

$$P = Q + ET + (S_2 - S_1) + I$$

$P < PET \Rightarrow AET \leq PET, Q = 0, \Delta S \leq 0$  für Bodenspeicher, nicht Schneespeicher  
 $P > PET \Rightarrow AET = PET, Q \geq 0, \Delta S \geq 0$  für Bodenspeicher, nicht Schneespeicher.  
 Hydrologisches Defizit:  $D = PET - AET$ . Während Tockensaison ( $P < EP$ ), Zeitspanne von 0 bis  $t$ :

pot. Freigabe von  $H_2O$ :

$L(t) = P(t) - PET(t) < 0$  eff. Freigabe von  $H_2O$ :

$$B(t) = S_{max} - S(t) = AET(t) - P(t)$$

$S_{max}$ : max. Speicherung/ Bodenkapazität,  $S(t)$ : Speicherung nach  $t$ .

**Infiltration**

**Gleichung von Horton** Veränderung der Infiltrationsrate,  $k$ : Infiltrationsrate [1/t],  $f_0$ :

Startrate,  $f_c$ : Endfiltrationsrate, Schätzungen.  $F(t)$ : kumulative Infiltration.

$$-\frac{df}{dt} = k(f - f_c)$$

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$$

$$F(t) = f_c t + \frac{f_0 - f_c}{k} (1 - e^{-kt})$$

Boden/Bedeckungs-komplex	$f_0$ [mm/h]	$f_c$ [mm/h]	$k$ [1/min]
Landwirts. (1) <sup>a</sup>	280	6÷220	1.6
Landwirts. (2) <sup>b</sup>	900	20÷290	0.8
Torf	325	2÷29	1.8
fein/sand Ton (1)	210	2÷25	2.0
fein/sand Ton (2)	670	10÷30	1.4

<sup>a</sup>unbedeckt

<sup>b</sup>grasbedeckt

**Konzeptionelle u. empirische Methoden** Gesamtmenge NettoNS = gesamte Direktabfluss. Abschätzung des Direktabflusses mit Ganglinienseparation (Abtrennung des Basisabflusses).

**CN-Methode** (Curve Number Modell)  $\hat{S}$ : Max. infiltrierbare  $H_2O$ menge (Durchlässigkeit/ Landnutzung),  $P_e(t)$ : kumulierte Menge NettoNS,  $P(t)$ : kumulierte Menge GesamtNS,  $I_a$ : Anfangsverluste (Interzeption/ Oberflächenspeicherung, 5-20% von  $\hat{S}$ ).

$$P_e(t) = \frac{(P(t) - I_a)^2}{P(t) - I_a + \hat{S}} \quad P(t) > I_a$$

$$P_e(t) = 0 \quad P(t) \leq I_a$$

$$\hat{S} [mm] = S_0 \left( \frac{100}{CN - 1} \right) \quad S_0 = 254$$

$P_e(t)$  auch kumulierter NSüberschuss → Oberflächenabfluss,  $CN$ : Abhängig von Bodencharakteristik/ -nutzung (Tab).  $CN$  hoch: wenig durchlässig;  $CN$  niedrig: hohe Durchlässigkeit. **Hydrologischer Bodentyp** -A: grosses Versickerungsvermögen (tiefe Sand/ Kiesböden)  $> 0.76cm/h$

-B: mittleres Versick.V (mitteltiefe Sandböden, Löss)  $0.38 - 0.76cm/h$

-C: geringes Versick.V (flache Sandböden/ sandiger Lehm)  $0.13 - 0.38cm/h$

-D: sehr geringes Versick.V (Tonböden)  $0 - 0.13cm/h$

Bodennutzung	A	B	C	D
Ödland	77	86	91	94
Wein	70	73	79	82
Getreide	64	76	84	88
Weide(norm)	49	69	79	84
Dauerwiese	30	58	71	78

**Schätzung der Parameter** 1. hydrologische Bodengruppe identifizieren, 2. mit Landnutzung vergleichen, CN-Wert von Teilgebiet können gemittelt und mit der Fläche gewichtet werden. Danach kumulierte NettoNShöhe für sämtliche Zeitpunkte berechnen.

**Korrektur mit Vorfeuchtebedingung.**

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2.3 - 0.013CN_{II}}$$

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0.433 - 0.0057CN_{II}}$$

AMC Group	Dormant season	Growing
I	$P > 12.7$	$P > 35.6$
II	$12.7 \leq P < 27.9$	$35.6 \leq P < 53.3$
III	$P \geq 27.9$	$P \geq 53.3$

**Sättigungszeit** Nettoniederschlag tritt erst nach Erreichen der Sättigungszeit auf

$$t_p = \frac{k_f \Psi \Delta \theta}{i(i - k_f)}$$

**Φ-Index-Methode** Infiltr.eigenschaften zeitlich und räumlich konstant.  $Q_D$ : Direktabfluss,  $P_i$ : Ns im Zeitintervall  $i$ ,  $\Delta t$ : Dauer Zeitintervall,  $M$ : Anzahl Zeitintervalle.

$$Q_D = \sum_{i=1} M P_i - \sum_{i=1} M P_i \begin{cases} (\Phi) & \text{if } \Phi < P_i \\ (P_i) & \text{if } \Phi > P_i \end{cases}$$

**Prozentwertmethode** NettoNS als prozentualer Anteil des gesamten NS.  $c$ : Prozentanteil des NS der je Zeitschritt infiltriert.

$$Q_D = \left( 1 - \frac{c}{100} \right) \sum_{i=1} M P_i$$

**Isochronenmethode**

Verfahren für die Erstellung einer Einheitsganglinie für ein bestimmtes Gebiet. Kombination einer Reihe von linearen Translationsgliedern.

**Abfluss aus Schneeschmelze**

Schneedecke ist ein saisonaler  $H_2O$ speicher. Wichtig in voralpinen und alpinen EZG. Gelangt erst Wochen/ Mte später zum Abfluss. Summe aus Regen und Schneeschmelze:  $H_2O$ dargebot.

**Modellierung des Abflusses aus Schneeschmelze**

Abschätzung des aktuellen potentiellen Wasservorrats der Schneedecke (Schneespeicher). Für Schneedeckenausflusses (Abh. von Temp., Strahlung, NS, Pberflächenbeschaffenheit, Schneebedeckungsgrad, Höhenlage, Exposition) gibt es nur Punktmodelle, die auf das Gebiet übertragen werden. Nur kleinere EZG.

**Temperatur-Index** Lufttemp. als Informationsträger über thermodynamische Prozesse.  $a_d$ : Grad-Tag-Faktor (Schmelzfaktor [mm/(°Cd)]) (siehe Tab),  $T_L$ : Mittlere Lufttemp. über Tagesabschnitte mit  $T > 0$  [°C],  $T_b$ : Basistemp ( $0 \leq T_b \leq 2^\circ C$ ).

$$M_d = a_d (T_L - T_b) \quad [mm/d]$$

Vegetationsbedeckung	$a_d$ [mm/(°Cd)]
nicht bewaldet, offenes Gelände	4 - 7
offener Laubwald ge- ringer Nadelwaldanteil	3 - 4.3
Nadelwald/ dichter Mischwald	1.5 - 2.3
Dichter Nadelwald	1 - 1.5
Hochgebirge	>6
Gletscher	
Freiland	3-10

**Grad-Tag-Verfahren** Tägliche Schmelzwasserabgabe ohne gleichzeitig fallender Regen.  $\bar{T}_L$ : Tagesmittel der positiven Werte der Lufttemp [°C]

$$M_D = A_D \bar{T}_L$$

## Extremereignisse

### Starkniederschläge

**Definition von StarkNS** NS, der im Verhältnis zu seiner Dauer eine hohe NS-Intensität aufweist und selten auftritt. Lange Dauerstufe ( $T > 24 - 72h$ ), Kurze Dauerstufe ( $5 - 10min < T < h$ ). **StarkNS CH** Vom Einfluss der Alpen geprägt. Beteiligt bei der Entwicklung von Strömungszuständen, welche NS in der Region verursachen können, aber auch Riegel zwischen nord- und südalpinen Bedingungen (Temp./Feuchte). **Punkt- und GebietsNS** Generalisierung: Abnahme des NS vom Zentrum mit zunehmender Fläche. **Radarmessungen und Fernerkundung** für kurzfristige Vorhersagen.

### Datenmaterial

**Messnetz** TagesNSmessnetz (SMA) standardisiert, Daten werden auf Fehler überprüft. Konventionelles NSMessnetz (Pulviometer) Tagessammler. Automatische Stationen (ANETZ), alle 10 Min. **Daten** Höhe, Dauer, Intensität, Wahrscheinlichkeit der NS. Auswahl von Datenserien: Zeitbezogene Auswahl (Extremwerte). Mengenbezogene Auswahl (nach Grösse geordnet, Schwellenwert festlegen, Werte darüber auswählen). Festlegung der Schwellenwerte durch NSDauer (Gewitter/ DauerNS), Zeitbezug Messintervall, Flächenbezug (Punkt/ Gebiet), Klima (Orographie, Saison, usw.), Stationsnetzeigenschaften, Anwendungen. **Verteilungsfunktion** Exponentialverteilung oder Paretoverteilung. Sind gleich, bei langen Messreihen. **Voraussetzungen für statistische Analyse** Zeitliche Repräsentanz (Stabilität langer Auswerteziträume und zeitliche Variabilität) (einheitliche Instrumentierung, Datenaufbereitung,

Gewährleistung von Homogenität und Stationarität), räumliche Repräsentanz (Übertragbarkeit von Punkt auf Fläche), Ausreiserprobleme und richtige Zuordnung. **Messfehler und Korrektur** Korrekturangaben sind nur auf Monats- oder Jahresbasis gültig.

### Dimensionierungsniederschlag

Grundlage für ein Dimensionierungsereignis für verschiedene Auftretenshäufigkeiten sind die DDF oder IDF-Kurven.

### Zeitliche Verteilung des Punktniederschlags

Zeitliche Verlauf eines Regenereignisses kann wesentlichen Einfluss auf das Abflussverhalten haben. Begriffe: Vorregen (kann Retention herabsetzen), Hauptregen, Nachregen. Blockregen: Regen mit konstanter Intensität.

### Methoden zur Hochwasserabschätzung

Bauwerke so dimensionieren, dass sie eine Wiederkehrswahrscheinlichkeit von 100 (Siedlungsgebieten) bis mehrere tausend Jahren (Talsperren) sicher bewältigen können.

### Methoden zur Hochwasseranalyse

**empirische Formeln** Abschätzungsformeln, Regressionsmodelle. **Frequenzanalyse** Aufgrund vorhandenen Werten eine Verteilungsfunktion bestimmen und daraus die Jährlichkeiten ermitteln. **NS-Abfluss-Modelle deterministisch** definierte Eingangsgrößen liefern ein Resultat. Abschätzung von Dauer und Volumen. **probabilistisch** Statistische Parameter (Mittelwert/ Varianz) welche die Eigenschaften beschreiben. **Empirische Formeln** deterministisch und geben keine Häufigkeit von Hochwasserereignissen an. **Frequenzanalyse** beruhen auf Zeitreihen der jährlichen Abflussmaxima oder der Abflüsse über einen bestimmten Schwellenwert. Mittels Regionalisierungstechniken versucht man einen funktionellen, aber statistisch formulierten Zusammenhang zwischen EZG-größen und Hochwasserabflussverhalten herauszufinden. Steigert bei hohen Jährlichkeiten die Signifikanz der Aussage. Ermöglicht also an Stellen an denen keine Daten zur Verfügung stehen die Abflussmenge abzuschätzen. **Alternative Derived distribution approach** Verteilungsfkt Hochwasserabfluss aus Verteilungsfunkt. NS und

Eigenschaften des EZG. **NS-Abfluss-Modell mit definierten Eingangsgrößen** wenn zu bestimmten Ereignissen Messreihen von NS und Abfluss vorliegen. Wahl der Modellstruktur hängt von der Grösse und den Eigenschaften des EZG, sowie von der gewünschten Jährlichkeit als auch der für die Kalibration zur Verfügung stehenden Daten ab.

### Empirische Formeln und vermutlich max. Hochwasser

**Empirische Formeln** Geben keine Auskunft über Jährlichkeit und Frequenz an.

**Formeln mit Einbezug der EZG-A als einziger Gebietsparameter**  $Hq = \frac{c}{A+b} + d$  [ $m^3/skm^2$ ] oder  $Hq = aA^b$  mit  $a, b, c, d$  als Parameter

**weitere Gebietsparametern mit Ausnahmen des Regens** Geoparameter

**mit Einbezug des Regens** Regendauer und Regenmenge

**mit Einbezug der Fläche und weiteren, rein empirischen Parametern** Hochwasserberechnung mit bestimmter Wiederkehrperiode.

**Vermutlich max. Hochwasserabschätzung** Bestimmt einen einzigen Hochwasserabflusswert. Methode der Umhüllenden verbindet die Fläche des EZG mit den max. Hochwasserabflüssen. ( $\hat{q}, b, v$ : Parameter

$$q = \hat{q} + bA^{-v} \quad [m^3/skm^2]$$

Verkelinerung der Fläche  $A \Rightarrow$  u.U. unrealistische Werte.

### Hochwasserabschätzung aus Niederschlagsdaten

#### Rational Method (Laufzeitverfahren)

Anwendung in Siedlungshydrologie/ kleinen EZG.  $Q$ : Abfluss,  $C$ : Abflusskoeffizient,  $A$ : Einzugsgebietsfläche,  $i$ : Niederschlagsintensität,  $c$ : Korrekturfaktor (Interzeption, routing des Flusses).  $Q = CAic$

### \*Stoffabtrag und Stofftransport

**Bodenerosion durch Wasser** Wichtige auslösende Faktoren: Starkregen, Schneeschmelze, zu intensive Beregnung, mit Quadrat der Fließgeschwindigkeit wachsende Strosskraft des Wassers.

**Geschiebetransport** Erosion nimmt zu wenn das Gefälle stärker wird (zum Gleichgewicht), die Ablagerung nimmt zu wenn das Gefälle flacher ist. Bei der Vergrößerung des Gefälles setzt der Geschiebetransport früher ein,

die Fracht vergrößert und die Schlepplspannung wird erhöht. **Auflandung** wegen Verringerung des Fließgefälles, Verringerung des Rauheitbeiwertes, Sohlenverbreiterung, Geschiebentnahme oder -zufuhr.

**Begriffe** Hydrograph Abflussganglinie  
Hyetograph Niederschlagsganglinie

### Inhaltsverzeichnis

**Einführung** 1  
Wasserkreislauf . . . . . 1  
Beschreibung hydrologischer Prozesse, Modelle, Systeme . . . . . 1  
deterministische Modelle . . . . . 1  
stochastische Modelle . . . . . 1  
**Wasserhaushalt** 1  
Wasserressourcen . . . . . 1  
Wasserhaushalt der CH . . . . . 1  
**Wasser in der Atmosphäre** 1

\*Niederschlagsbildung . . . . . 1  
\*Wasserdampf . . . . . 1  
Kondensationsmechanismen . . . . . 1  
Niederschlagsarten . . . . . 1  
**Hydrologische Prozesse** 2  
Grundlagen Struktur von Einzugsgebieten . . . . . 2  
Niederschlag . . . . . 2  
Interzeption . . . . . 2  
Verdunstung . . . . . 3  
Infiltration . . . . . 3  
\*Boden . . . . . 3  
Infiltrationsprozess . . . . . 3  
Abfluss . . . . . 3

Schnee und Eis . . . . . 5  
Schneesmelzprozess . . . . . 5  
**Hydrologische Modellierung von Einzugsgebieten** 5  
Niederschlag-Abfluss-Modelle . . . . . 5  
Punktniederschlag . . . . . 5  
Gebietsniederschlag . . . . . 5  
Modellierung der Einzugsgebietenkontrolle . . . . . 5  
Infiltration . . . . . 6  
Isochronenmethode . . . . . 6  
Modellierung des Abflusses aus Schneeschmelze . . . . . 6

**Extremereignisse** 7  
Starkniederschläge . . . . . 7  
Datenmaterial . . . . . 7  
Dimensionierungsniederschlag . . . . . 7  
Zeitliche Verteilung des Punktniederschlags . . . . . 7  
Hochwasserabschätzung . . . . . 7  
Methoden zur Hochwasseranalyse . . . . . 7  
Empirische Formeln und vermutlich max. Hochwasser . . . . . 7  
Hochwasserabschätzung aus Niederschlagsdaten . . . . . 7

### Index

- Φ-Index-Methode, 6
- Abflussganglinie von Extremereignissen, 4
- Abflussmessung, 3
- advective NS, 1
- Alternative, 7
- Arithmetisches Mittel, 5
- Auflandung, 8
- Begriffe, 8
- Black- Box M, 1
- Bodenerosion durch Wasser, 7
- Bodenfiltrationskapazität, 3
- CH Regiemtypen, 4
- CN-Methode, 6
- Dürre, 4
- Daten, 7
- Dauerkurve, 4
- DDF, 2
- Definition von StarkNS, 7
- Depositionszone, 2
- Deterministische Modelle, 5
- Doppelsummenlinien, 2
- Drucksonden, 4
- Dunniansischer Abfluss, 3
- Durchflusskurve, 4
- Durchflussmessung, 3
- Einperlgeräte, 4
- Einzugsgebiet, 1
- Empirische Formeln, 7
- empirische Formeln, 7
- Energiebilanzmethode, 3
- Evaporation, 3, 5
- Evapotranspiration, 3
- Extremniederschlag, 2
- Extremwerte, 1
- Fernerkundung, 7
- Flügelmessung, 4
- Flüsse
  - emerph, 4
  - intermittierend, 4
  - perennierend, 4
- Fließgeschwindigkeit, 4
- Fließgeschwindigkeitsmessung, 3
- Fließgewässer, 2
- freie Wasseroberfläche, 3
- Frequenzanalyse, 7
- Gebietsniederschlag, 2
- GebietsNS, 2
- Genauigkeit Abflussmessung, 4
- Genauigkeit und Fehler NSMessung, 2
- gesättigter Oberflächenabfluss, 3
- Geschiebetransport, 7
- Gewitter, 1
- Gleichung von Horton, 6
- Grad-Tag-Verfahren, 7
- Grundlegende Schritte für Modellierung, 5
- Grundwasserabfluss, 3
- Grundwasserspiegel, 3
- Hauptzonen im Flusssystem, 2
- Hellmann, 2
- Hochwassergrenzpegel, 4
- Homogenität der NSMessung, 2
- Hortonscher Oberflächenabfluss, 3
- Hydraulische Berechnungen, 4
- Hydrologischer Bodentyp, 6
- Hydrologisches Defizit, 6
- Hydrologisches Normaljahr, 4
- Hydrologisches Regime, 4
- Hyetograph, 2
- IDF, 2
- indirekte Abschätzung, 3
- Induktion, 4
- induktive Messung, 4
- Interflow, 3
- Interzeption, 2, 5
- Isohyetenmethode, 5
- Jahresganglinie, 4
- Koaleszenz, 1
- Kondensation, 1
- Kontinuierliche Aufzeichnung, 2
- Konvektive NS, 1
- konzeptionelle M, 1
- Konzeptionelle u. empirische Methoden, 6
- Korrektur mit Vorfeuchtebedingung, 6
- Korrektur von NSMessungen, 2
- landwirtschaftl. Trockenheit, 4
- Lattenpegel, 4
- Luftfeuchtigkeit, 1
- Makroskala, 1
- Mesoskala, 1
- Messfehler und Korrektur, 7
- Messflügel, 4
- Messgrösse der Schneedecke, 5
- Messnetz, 7
- Messung, 3
- Messung der Bodenfeuchte, 3
- Messung der Infiltration, 3
- Messung der Interzeption, 2
- Messung PunktNS, 2
- Messwehre, 4
- Messwippe, 2
- Meteorologische Trockenheit, 4
- Mikroskala, 1
- Mittelwert, 1
- Mittlere, 4
- mittlere Verweilzeit, 1
- Modellklassen, 5
- Mulden-Speicherung, 3
- Niederschlag
  - advektiv, 1
  - Ganglinie, 2
  - Gebietsniederschlag, 2
  - konvektiv, 1
  - Messung, 2
  - orographisch, 2
  - Punktniederschlag, 2
  - zyklonal, 1
- Niederschlagsbildung, 1
- Niederschlagsregime, 2
- Niederschlagswaage, 2
- Niederwasser, 4
- NS-Abfluss-Modelle, 7
- Oberflächenabfluss, 3
- Orographische NS, 2
- Parameter, 1
- Pegelrelation, 4
- physikalische M, 1
- Prinzip der minimalen Varianz, 2
- Prinzip der Minimierung der Arbeit, 2
- Probabilistische Modelle, 5
- Produktionszone, 2
- Prozentwertmethode, 6
- Pulsradar, 4
- Punkt- und GebietsNS, 7
- PunktNS, 2
- Radarmessungen, 7
- radioaktive Tracer, 4
- Rational Method (Laufzeitverfahren), 7
- Regime, 4
- Regionalisierung, 1
- Sättigungszeit, 6
- Salzgehalt, 3
- Salzverdünnungsmessung, 4
- Schätzung
  - CN-Methode (Parameter), 6
  - Evaporation, 5
  - Evapotranspiration AET, 6
  - pot. Evapotranspiration, 5
- Schätzung der Evaporation, 5
- Schnee, 1
- Schneefall, 2
- Schneemessung, 2
- Schwimmerpegel, 4
- StarkNS CH, 7
- Starkregen, 2
- Stochastische Modellierung, 5
- Sträucher, 3
- Summenlinie, 4
- Syphonschreiber, 2
- Systematische Fehler, 4
- Tauchstab, 4
- Tauchstab nach JENS, 4
- Taupunkt, 1
- Temperatur-Index, 6
- Thiessen-Polygon-Methode, 5
- Tracer, 3
- Tracermethoden, 4
- Transferzone, 2
- Ultraschall, 4
- unbewachsener Boden, 3
- ungesättigter Wasserfluss, 3
- Unsicherheiten, 1
- Unterirdischer Abfluss, 3
- Variablen, 1
- Verdünnungsmethode, 4
- Verdunstung, 5
- Vermutlich max. Hochwasserabschätzung, 7
- Verteilungsfunktion, 7
- Voraussetzungen für statistische Analyse, 7
- Wasserbilanz Global, 1
- Wasserbilanzgleichung, 6
- Wasserbilanzmethode, 3
- Wasserhaushalt der CH, 1
- Wasserstandsmessungen, 4
- Wassertiefe, 3
- Wasservolumen einer Schneedecke, 2
- Zeitliche Charakterisierung, 4
- Zeitliche Variation, 3
- Zeitliche Verteilung PunktNS, 2
- Zeitreihen, 1
- Zyklonale NS, 1