

---

# Ingenieurhydrologie I

---

**Prof. Dr.-Ing. Manfred W. Ostrowski**

Mitarbeit: Dipl.-Ing. A. Klawitter, Dipl.-Ing. M. Bach, Dipl.-Ing. S. Wörsching, Dipl.-Ing. J. Hack,  
Dr.-Ing. O. Kraft



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Institut für Wasserbau  
und Wasserwirtschaft  
Fachgebiet Ingenieurhydrologie  
und Wasserbewirtschaftung



---

## Vorwort

---

### **Sinn und Zweck dieses Umdrucks:**

Der Vorlesungsumdruck Ingenieur-Hydrologie I stellt eine knappe Zusammenfassung der in der Vorlesung vorgestellten Themengebiete dar und verfolgt lediglich den Zweck eines richtungsweisenden Schriftstücks. Der Umdruck hat weiterhin keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

### **Stoffauswahl:**

Analog zur Vorlesung Ingenieur-Hydrologie I werden die Grundlagen der Hydrologie erläutert. Dazu gehören insbesondere die Darstellung des hydrologischen Kreislaufs und Erläuterungen zu Messmethoden zum Erfassen einzelner hydrologischer Komponenten. Beschrieben werden außerdem anthropogene Einflüsse auf die Wasserbilanz sowie statistische Analysen hydrologischer Reihe. Weiterhin werden mathematische Ansätze zur Beschreibung der in der Hydrologie üblichen Teilprozesse vorgestellt.

### **Zusätzliche Literatur und Übungen:**

Da es sich bei diesem Umdruck lediglich um eine Zusammenfassung des in der Vorlesung besprochenen Stoffes handelt, wird empfohlen gegebenenfalls entsprechende zusätzliche Literatur zu Hilfe zu nehmen. In Kapitel 1.4 sind Angaben zu sonstigen Schriftstücken gemacht.

Zusätzlich zur Vorlesung Ingenieur-Hydrologie I werden semesterbegleitend Vorrechenübungen (VÜ) angeboten.



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

**Institut für Wasserbau  
und Wasserwirtschaft**

**Prof. Dr.-Ing. M. Ostrowski**  
Fachgebiet Ingenieurhydrologie  
und Wasserbewirtschaftung

Petersenstraße 13  
64287 Darmstadt  
<http://www.ihwb.tu-darmstadt.de>

Stand: 23. Mai 2011



---

## Inhaltsverzeichnis

---

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>5</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>9</b>
1.1 Definition und Abgrenzung . . . . .	9
1.2 Lernziele . . . . .	10
1.3 Methodik . . . . .	10
1.4 Literatur . . . . .	10
<b>2 Der hydrologische Kreislauf</b>	<b>11</b>
2.1 Antriebskräfte . . . . .	12
2.2 Übersicht über die Teilprozesse . . . . .	15
<b>3 Anthropogene Einflüsse auf die Wasserbilanz</b>	<b>17</b>
3.1 Veränderung des Energiehaushalts . . . . .	17
3.2 Veränderung der Wasserbilanz . . . . .	18
3.3 Gegenseitige Beeinflussung von Energie- und Wasserbilanz . . . . .	18
3.4 Auswirkung der Urbanisierung . . . . .	19
<b>4 Messmethoden</b>	<b>21</b>
4.1 Klimagrößen . . . . .	21
4.2 Verdunstung . . . . .	22
4.3 Abfluss . . . . .	23
4.4 Infiltration . . . . .	25
4.5 Grundwasserstand . . . . .	27
4.6 Bodenfeuchte . . . . .	27
4.7 Physiographische Merkmale von Einzugsgebieten . . . . .	28
<b>5 Mathematische Berechnungsmethoden</b>	<b>31</b>
5.1 Einleitung . . . . .	31
5.2 Grundlagen deterministischer hydrologischer Modelle . . . . .	31
5.3 Hydrologische Modelle für Teilprozesse - ein Überblick . . . . .	33
5.4 Belastungsbildung . . . . .	36
5.4.1 Schmelzsetzungsverfahren . . . . .	36
5.5 Belastungsverteilung . . . . .	36
5.5.1 Thiessen-Polygon-Verfahren . . . . .	36
5.5.2 Isohyeten-Verfahren . . . . .	37
5.6 Belastungsaufteilung/Abflussbildung . . . . .	37
5.6.1 Phi-Index-Verfahren . . . . .	37
5.6.2 Abflussbeiwertverfahren . . . . .	38

5.6.3	Horton-Verfahren . . . . .	38
5.7	Abflusskonzentration . . . . .	39
5.7.1	Grundlagen . . . . .	39
5.7.2	Einheitsganglinienverfahren . . . . .	39
5.7.3	Einzellinearspeicherverfahren . . . . .	42
5.7.4	Isochronenverfahren . . . . .	43
5.8	Abflusstransformation . . . . .	44
5.8.1	Grundlagen . . . . .	44
5.8.2	Modifiziertes Puls-Verfahren . . . . .	45
5.8.3	Muskingum-Verfahren . . . . .	46
5.9	Komplexe Modelle . . . . .	47
<b>6</b>	<b>Statistische Auswertungen</b>	<b>51</b>
6.1	Konsistenz und Homogenität . . . . .	51
6.1.1	Doppelsummenanalyse . . . . .	51
6.2	Statistische Analyse einer Einzelreihe . . . . .	52
6.2.1	Plotting-Positions-Verfahren . . . . .	54
6.2.2	Statistische Parameter . . . . .	54
6.2.3	Häufigkeitsanalyse und Verteilungsfunktion . . . . .	55
6.3	Zusammenhangsanalyse zwischen zwei und mehreren Reihen . . . . .	57
<b>7</b>	<b>Bemessung wasserbaulicher Anlagen und Systeme</b>	<b>61</b>
7.1	Die Bemessung mit Einzelereignissen . . . . .	61
7.2	Die Bemessung mit einer partiellen Niederschlagsserie . . . . .	61
7.3	Die Langzeitkontinuumssimulation . . . . .	61
7.4	Übersicht über Aufgabenstellungen . . . . .	62
7.5	Zusammenstellung wasserwirtschaftlicher Planungsaufgaben . . . . .	63
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>67</b>

---

## Abbildungsverzeichnis

---

2.1	Der hydrologische Kreislauf . . . . .	11
2.2	Antriebskräfte des hydrologischen Kreislaufs . . . . .	12
2.3	Druckverteilung Januar / Juli in mbar . . . . .	13
2.4	Luftströmungsverteilung auf dem Atlantik im Januar . . . . .	14
3.1	Leitmedien der natürlichen Umwelt . . . . .	17
3.2	Die Wasserbilanzkomponenten in Abhängigkeit vom Versiegelungsgrad . . . . .	19
4.1	Regenmesser und Regenschreiber . . . . .	22
4.2	Wägbarer Lysimeter . . . . .	23
4.3	Hydrometrischer Meßflügel . . . . .	24
4.4	Eichkurve . . . . .	24
4.5	Ermittlung der Abflußganglinie über die Wasserstandsabflussbeziehung $Q = f(H)$ . . . . .	26
4.6	Doppelring-Infiltrometer . . . . .	27
4.7	Zusammenhänge zwischen Bodenfeuchte, Infiltration, Perkolation und aktueller Evapotranspiration . . . . .	28
5.1	Modelle und Verfahren in der Hydrologie . . . . .	31
5.2	Modell-Abbildung der Realität durch Abstraktion . . . . .	32
5.3	Phasen der Hochwasserentstehung . . . . .	34
5.4	Untergliederung des Wasserkreislaufs in Teilprozesse . . . . .	35
5.5	Verfahren zur Belastungsverteilung . . . . .	36
5.6	Das Phi-Index-Verfahren . . . . .	37
5.7	Verlustrate nach dem Horton-Verfahren . . . . .	38
5.8	Ganglinienseparation (idealisiert) . . . . .	39
5.9	Linearitätsprinzip . . . . .	40
5.10	Superpositionsprinzip . . . . .	40
5.11	Berechnung der Abflussganglinie mit Hilfe der Einheitsganglinie $e(T, t)$ . . . . .	41
5.12	Das Prinzip des Einzellinearspeichers . . . . .	42
5.13	Abflussganglinie aus einem Einzellinearspeicher . . . . .	43
5.14	Einzugsgebiet mit Isochronen und abgeleitetes Zeitflächendiagramm (ZFD) . . . . .	44
5.15	Modifiziertes Puls-Verfahren . . . . .	45
5.16	Das Muskingum-Verfahren . . . . .	46
5.17	Graphische Ermittlung der Parameter $X$ und $k$ beim Muskingum-Verfahren . . . . .	47
5.18	Struktur eines komplexen Wasserbilanzmodells . . . . .	49
6.1	Doppelsummenanalyse . . . . .	52
6.2	Abflussganglinie und Dauerlinie . . . . .	53
6.3	Hydrologischer Längsschnitt der Lahn . . . . .	53
6.4	Zeitreihe einer diskreten statistischen Variablen . . . . .	55
6.5	Formen von Verteilungsfunktionen . . . . .	55
6.6	Zeitreihe, Häufigkeitsverteilung und Häufigkeitsdichte . . . . .	56

---

6.7	Häufigkeitsverteilung und Summenhäufigkeit . . . . .	56
6.8	Einzugsgebiet mit zwei benachbarten Pegeln und Pegelbezugslinien . . . . .	58
6.9	Verlängerung einer kurzen Zeitreihe am Pegel B durch eine Pegelbezugslinie . . .	59
7.1	Zusammenhänge der wasserwirtschaftlichen Planung . . . . .	62



---

---

## Tabellenverzeichnis

---

2.1	Richtungen des Wassertransports der hydrologischen Teilprozesse . . . . .	15
6.1	Bestimmung des Wiederkehrintervalls $T_n$ . . . . .	54



---

## 1 Einleitung

---

### 1.1 Definition und Abgrenzung

---

Für den Begriff *”Hydrologie”* kann man in der Literatur zum Teil recht unterschiedliche Definitionen finden. Um dem Anspruch an eine möglichst allgemeingültige Definition gerecht zu werden, wird die der WMO (World Meteorological Organization, UN) gewählt:

*”Die Hydrologie ist die Wissenschaft, die sich mit dem Auftreten und der Verteilung des Wassers auf der Erde, inklusive seiner chemischen und physikalischen Eigenschaften, beschäftigt.”*

Im Gegensatz zu manchen früheren Ausführungen zur Ingenieurhydrologie umfasst die Vorlesung in stärkerem Maß die Interaktionen zwischen Atmosphäre und der Landphase des hydrologischen Kreislaufs. Die wesentlichen in der Vorlesung betrachteten Elemente des Kreislaufs sind:

- Niederschlag
- Schneedeckenspeicherung
- Wasserstände von Flüssen, Seen und Talsperren
- Abfluss und Speicherung
- Direkte Verdunstung und Pflanzenverdunstung
- Bodenfeuchte
- Grundwasser

Die Hydrologie ist heute in hohem Maß eine wesentliche Grundlage nicht allein der Wasserwirtschaft, sondern auch der Umweltwissenschaften Biologie und Ökologie. Der Wasserkreislauf bewirkt die Verteilung von schädlichen Wasserinhaltsstoffen weltweit über die großräumige atmosphärische Zirkulation. Der Wasserdampf selbst bewirkt die Erhöhung der Gegenstrahlung und trägt somit zur Klimaproblematik bei. Viele Probleme bedürfen einer weitergehenden wissenschaftlichen Untersuchung, bevor eindeutige Aussagen möglich sind. Allerdings scheint es besonders wichtig, technisch orientierte Berufsgruppen frühzeitig mit der Problematik vertraut zu machen.

Neben der generellen Betrachtung der Zusammenhänge zwischen Umwelt und industrieller Zivilisation muss auch die kleinräumige Beeinflussung des Wasserkreislaufs durch die Tätigkeit der Bauingenieur(e)Innen frühzeitig erkannt und für eine ökologisch verträgliche Planung berücksichtigt werden. Daher ist den anthropogenen Einflüssen, insbesondere durch technische Maßnahmen, besondere Aufmerksamkeit geschenkt worden.

Die Vorlesung Ingenieur-Hydrologie I ist eine Voraussetzung für die Hauptfachvorlesung Ingenieur-Hydrologie II. Im Gegensatz zur Ingenieur-Hydrologie II liegt bei der Ingenieur-Hydrologie I das Hauptgewicht auf dem Verständnis der Prozesse. Die Vermittlung numerischer Verfahren beschränkt sich daher auf ein Minimum.

---

## 1.2 Lernziele

---

Die Vorlesung zielt darauf ab, die wesentlichen Prinzipien des hydrologischen Kreislaufs zu verdeutlichen. Aufbauend auf den Grundlagen der Physik, der Mathematik und der Mechanik sollen die wesentlichen Speicher- und Transportprozesse des Wasserkreislaufs in der Landphase erfasst werden. Es geht vorwiegend um das Verständnis der Prozesse; daher sind mathematisch-numerische Lösungsverfahren weniger wichtig als der Ansatz geeigneter Differentialgleichungen.

---

## 1.3 Methodik

---

Aufgrund der für die Vorlesung verfügbaren Zeit können keine Hörsaalübungen mit intensiver Betreuung durchgeführt werden. Die Darbietung des Stoffes erfolgt vorwiegend anhand von Folien, wobei ein Hauptgewicht auf die Darstellung von Wirkungsmechanismen gelegt wird. Im Rahmen der Veranstaltung werden Vorrechenübungen ausgegeben und vorgestellt, die der Vorbereitung auf die Klausur dienen sollen. Zusätzlich werden testatpflichtige, semesterbegleitende Übungen durchgeführt.

---

## 1.4 Literatur

---

### Grundlegende Literatur:

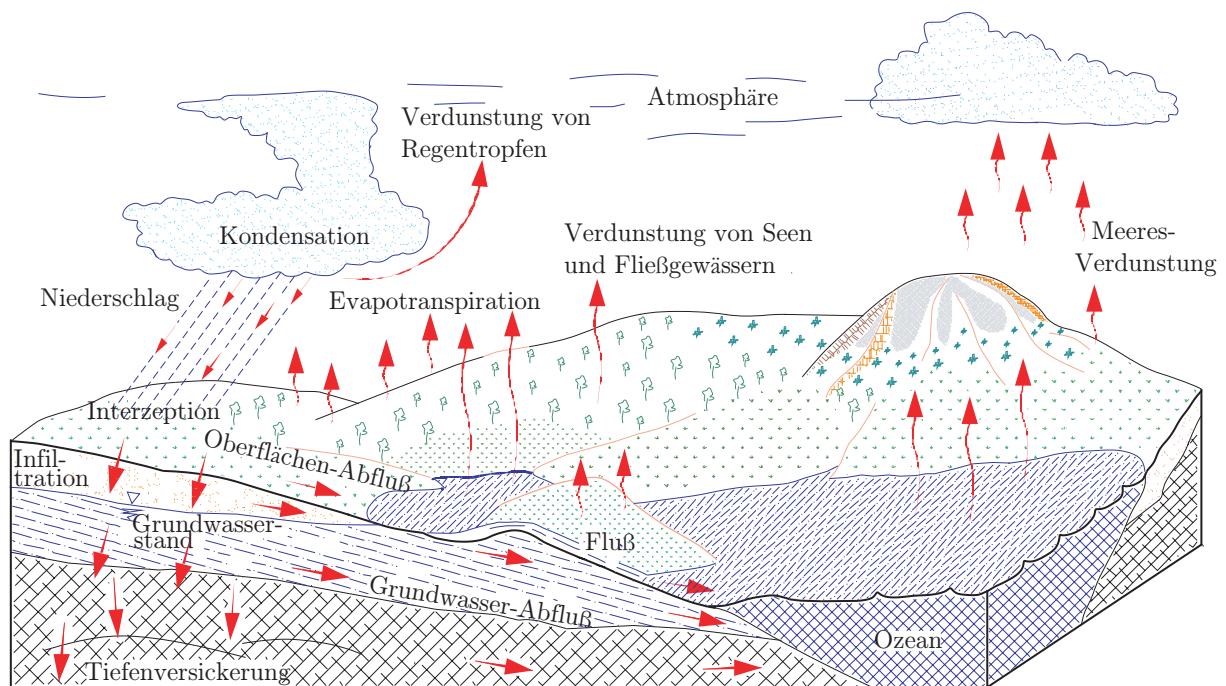
- Dyck, S. et al.: *"Angewandte Hydrologie Teil I und II"*, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin
- Dyck, S. und Peschke G.: *"Grundlagen der Hydrologie"*, Verlag für Bauwesen, 1995
- Maniak, U.: *"Hydrologie und Wasserwirtschaft - Eine Einführung für Ingenieure"*, Springer-Verlag 1992
- Schröder, Euler, Schneider, Knauf: *"Grundlagen des Wasserbaus - Hydrologie, Hydraulik, Wasserrecht"* Werner Verlag, 1982

### Englischsprachige Literatur:

- Shaw, E.: *"Hydrology in Practice"*, Van Nostrand Reinhold, U.K., 1983
- World Meteorological Organization: *"Guide to hydrological practices, Volume I and II"*, WMO-Publication No. 168
- Singh, V.P., *"Elementary Hydrology"*, Prentice Hall, Inc., 1992
- Maidment, D. *"Handbook of Hydrology"*, McGraw-Hill, 1992

## 2 Der hydrologische Kreislauf

Gemessen an anderen Naturphänomenen und Gesetzmäßigkeiten sind die Grundlagen des hydrologischen Kreislaufs erst sehr spät erkannt worden. Dies mag zunächst erstaunen, da heute nahezu jeder Laie erste Zusammenhänge zwischen atmosphärischer Zirkulation und den Niederschlag-Abfluss-Prozessen kennt. Ohne die Hilfsmittel der heutigen Technik zur Beobachtung und Auswertung von Speicher- und Transportprozessen in der Umwelt wäre ein solches Verständnis jedoch ungleich schwieriger. Abbildung 2.1 zeigt die wesentlichen Mechanismen des hydrologischen Kreislaufs.



**Abbildung 2.1:** Der hydrologische Kreislauf

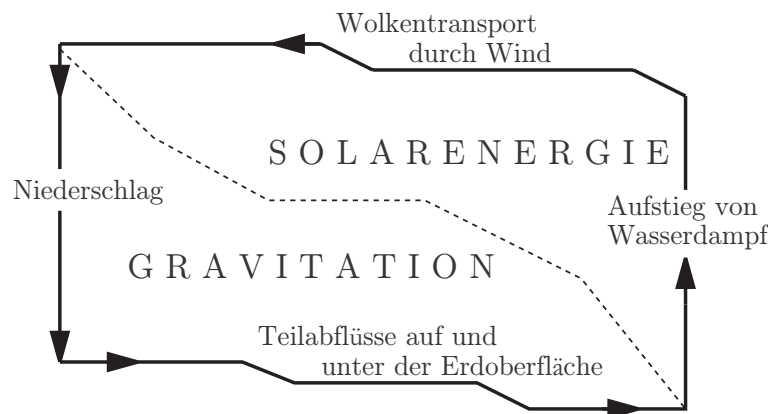
In der Abbildung sind die jeweiligen Richtungen der Prozesse durch die Pfeile ersichtlich. Es kann zwischen vorwiegend vertikalen und vorwiegend horizontalen Prozessen unterschieden werden, wobei die vertikalen Prozesse aufwärts oder abwärts gerichtet sein können. Während die Prozesse in der Atmosphäre vorwiegend durch Solar- und Windkräfte angetrieben werden, wirken auf der Erdoberfläche und in der oberen Erdrinde vorwiegend Kapillarkräfte und die Gravitation. Die enorme Komplexität des hydrologischen Kreislaufs erfordert eine Vielzahl von Teildisziplinen, die sich mit einzelnen Komponenten beschäftigen, wobei auch häufig eine Kopplung an dem Ort ihres Auftretens erfolgt.

### Beispiele:

- Meteorologie → Atmosphäre / Grenzschicht
- Hydraulik → Grundwasser / Gewässer / Rohre
- Hydrogeologie → Grundwasser
- Siedlungswasserwirtschaft → Stadtentwässerungssysteme
- Limnologie → Gewässerbiologie

## 2.1 Antriebskräfte

Der hydrologische Kreislauf wird durch eine Vielzahl von Kräften bestimmt, die in sehr verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen wirksam sind. Die beiden wesentlichen Typen sind die Solarstrahlung (molekulare Beschleunigung) und die Gravitation. Hinzu kommen die Windkräfte, die im wesentlichen für die horizontale Verlagerung von Wasserdampf verantwortlich sind (hierzu siehe Abbildung 2.2).



**Abbildung 2.2:** Antriebskräfte des hydrologischen Kreislaufs

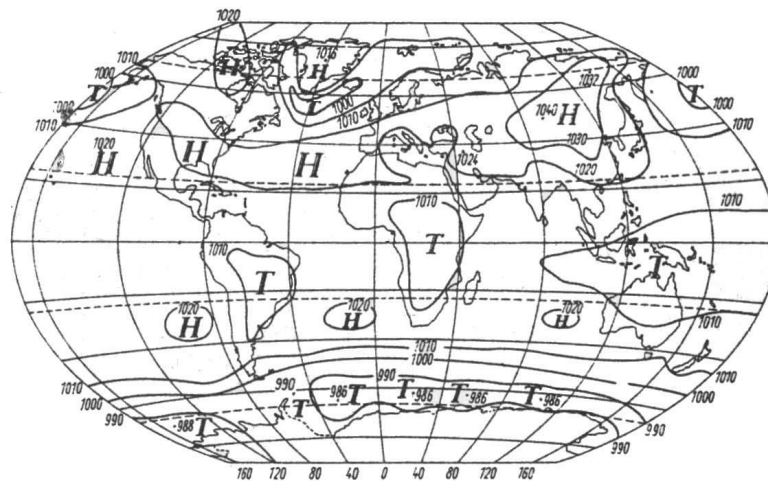
In diesem Zusammenhang sind einige kurze meteorologische Erläuterungen wichtig. Aus der Physik ist bekannt, dass kalte, schwere Luft bei gleicher geodätischer Höhe einen höheren Luftdruck bewirkt als warme, leichte Luft. Ebenso ist bekannt, dass bei Erwärmung eines bodennahen Raumes sich die darüber liegende Luftschicht erwärmt und ausdehnt. Das gegenüber dem Umfeld entstehende Druckgefälle führt zu Luftbewegungen, die aufgrund der Erdrotation durch die Corioliskraft abgelenkt werden. Die höhere Reibung nahe der Erdoberfläche führt zu weiterer Ablenkung der Luftströmungen. In der Konsequenz ergibt sich folgender Sachverhalt:

*Auf der Nordhalbkugel umkreisen die Luftmassen ein Tiefdruckgebiet entgegen, ein Hochdruckgebiet jedoch mit dem Uhrzeigersinn; auf der Südhalbkugel ist es umgekehrt.*

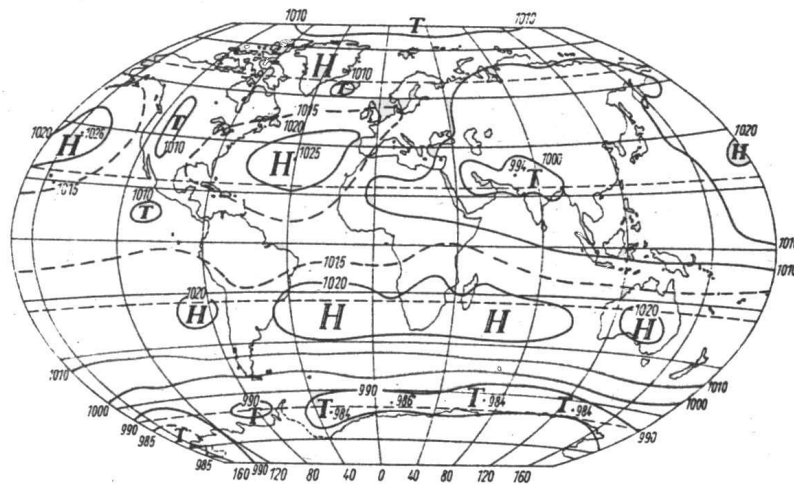
Betrachtet man nun die Ausbildung von Hochdruck- und Tiefdruckgebieten im Nordwinter (Januar) und Nordsommer (Juli), wie in Abbildung 2.3 dargestellt, so ergeben sich die wesentlichen Luftströmungen im Atlantik gemäß Abbildung 2.4.

Es ist deutlich geworden, dass die Erwärmung der Luftmassen durch Zivilisationseinflüsse nicht allein regionale Veränderungen bewirkt, sondern möglicherweise langfristige generelle

Im Januar



Im Juli



**Abbildung 2.3:** Druckverteilung Januar / Juli in mbar [4]

Klimaverschiebungen bewirken kann.

*Temperaturveränderung → Druckveränderung → Windveränderung*

Diese Überlegungen sind derzeit Gegenstand intensiver Forschungsanstrengungen; über lange Zeiträume ist nicht auszuschließen, dass sich unsere momentan verfügbaren wasserwirtschaftlichen Ressourcen verändern. Dies würde eine Herausforderung neuer Dimension für die Wasserwirtschaft bedeuten.

Wie später beschrieben wird, aggregieren bei bestimmten Bedingungen die Wasserdampfbestandteile zu Niederschlagspartikeln mit einem Gewicht, das die Auftriebskräfte überschreitet. Ab diesem Zeitpunkt bestimmt vornehmlich die Gravitation die Teilprozesse.



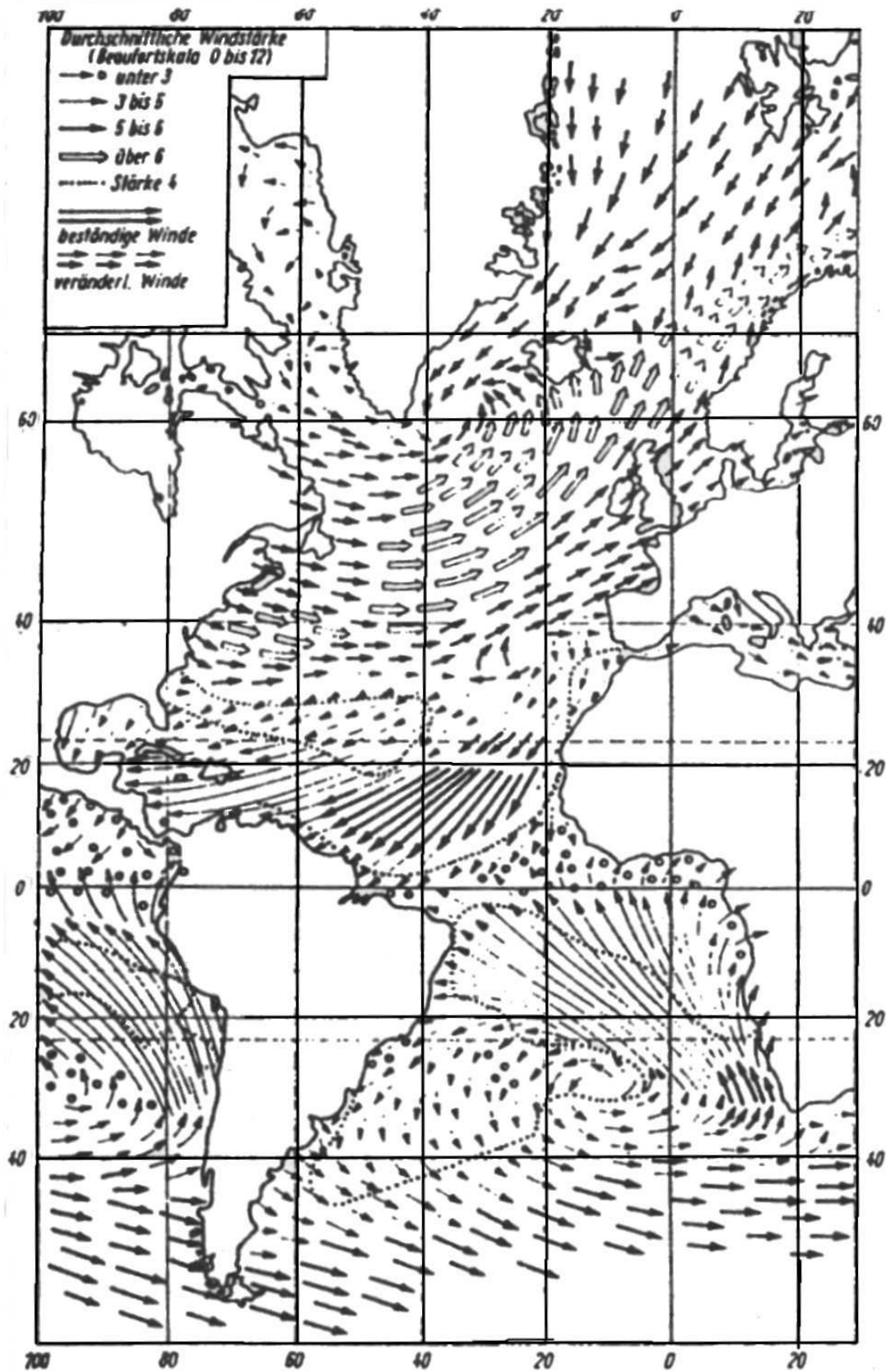


Abbildung 2.4: Luftströmungsverteilung auf dem Atlantik im Januar [4]



---

## 2.2 Übersicht über die Teilprozesse

---

Da sich das Wasser im Kreislauf bewegt, kann die Beschreibung generell an einem beliebigen Punkt beginnen. Ist die Landphase des Kreislaufs Gegenstand der Analyse, so ist es sinnvoll, beim Niederschlag zu beginnen (= 100%).

**Niederschlag:** Absetzen von größeren Wasserpartikeln in verschiedenen Aggregatzuständen auf der Vegetation bzw. Erdoberfläche.

**Interzeption:** Rückhalt von Niederschlag durch Benetzung der Oberflächen. Rückgabe an die Atmosphäre durch aktuelle Verdunstung.

**Schneespeicherung:** Rückhalt von Niederschlag in einer Schneedecke, zunächst im festen Aggregatzustand, dann als Gemisch verschiedener Aggregate (Akkumulation, Umwandlung, Schmelze).

**Infiltration:** Eindringen von Niederschlag in die obere, meist durchwurzelte Bodenzone, begrenzt durch Aufnahmefähigkeit des Bodens aufgrund seiner Eigenschaften und der aktuellen Bodenfeuchte. Behindert bei Versiegelung.

**Interflow (Bodenzwischenabfluss):** Laterale Abflusskomponente, vorwiegend hangparallel in der oberflächennahen Bodenzone.

**Oberflächenabfluss:** Bei hochintensiven bzw. langandauernden Niederschlägen geringerer Intensität Abfluss auf der Erdoberfläche nach Überschreiten der Infiltrationskapazität. Unmittelbar bei Versiegelung der Oberfläche.

**Aktuelle Evapotranspiration:** Summe der direkten Verdunstung (Evaporation) und der Pflanzenverdunstung (Transpiration), die aufgrund der klimatischen Randbedingungen (potentielle Evapotranspiration) und der aktuellen Verfügbarkeit von Wasser möglich ist.

**Perkolation:** Aussickerung von Bodenwasser aus der durchwurzelten Zone in Abhängigkeit von der aktuellen Bodenfeuchte.

**Basisabfluss:** Nach z.T. langandauernden Sickerzeiten gelangt das durchsickerte Wasser in das gesättigte Grundwasser. Aufgrund des Druckgefälles zwischen dem Grundwasserstand und dem Wasserstand im Fließgewässer entsteht ein Austausch.

Die wesentlichen zu beobachtenden Prozesse lassen sich bezüglich ihrer Richtung wie folgt ordnen:

abwärts	aufwärts	landwärts	seewärts
Niederschlag	Evaporation		Abflüsse
Infiltration	Transpiration	Wolken	Wolken
Perkolation	Kapillaraufstieg		

**Tabelle 2.1:** Richtungen des Wassertransports der hydrologischen Teilprozesse

---

Neben den beschriebenen Prozessen existieren im hydrologischen Kreislauf Speicher, die durch Dämpfung und Verzögerung zum Ausgleich der Bilanz beitragen. Die wesentlichen Speicher sind:

- die Ozeane
- die Atmosphäre
- die Vegetationsdecke
- die ungesättigte durchwurzelte Bodenzone
- die ungesättigte nichtdurchwurzelte Bodenzone
- das Grundwasser
- Flüsse, Seen und künstliche Speicher
- Auen und Vorländer von Flüssen (bei Hochwasser)

Diese Speicher sind in komplexer Weise durch die genannten Teilprozesse miteinander gekoppelt. Die funktionale Anbindung der Prozesse an die Speicherinhalte beschränkt sich in der Hydrologie auf den Grundsatz der Massenerhaltung, d.h. es werden in der Regel keine Energiebilanzen betrachtet. Dies bedeutet, dass die momentane Änderung des jeweiligen Speicherinhaltes der Differenz der Ein- und Ausgänge entspricht (siehe Gleichung 5.1). Obwohl z.T. theoretisch besser fundierte Ansätze für die Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Prozessen und Speicherinhalten bekannt sind, nimmt man in der Hydrologie meistens lineare Zusammenhänge an. Dies führt zu analytischen Lösungen der zugrunde liegenden Differentialgleichungen.

Obwohl es inhaltlich wünschenswert wäre, physikalisch besser fundierte Ansätze für Massen- und Energiebilanzen zu verwenden, sind deren Anwendungen wegen fehlender Eingangsdaten und zu hohen Rechenzeiten oftmals enge Grenzen gesetzt. Die schnelle Entwicklung leistungsstarker Computer in den letzten Jahren hat jedoch einen rasanten Fortschritt in Richtung modelltechnischer Darstellung nichtlinearer Prozesse und numerischer Lösungen bewirkt.



---

## 3.2 Veränderung der Wasserbilanz

---

Neben der mehr zufälligen natürlichen Schwankung der Wasserbilanz von Jahr zu Jahr sind Veränderungen festzustellen, die vom Menschen selbst ausgehen, häufig bedingt durch Planungsgrundlagen, die von BauingenieurInnen erarbeitet werden. Beispiele sind: Trinkwasserversorgung, Abwasserreinigung, Regenwasserableitung, Wasserkraft u.s.w.. Auch sonstige technische Entwicklungen durch Industrie und Gewerbe können eine Veränderung der Wasserbilanz bewirken.

Um die erforderliche Planungssicherheit zu gewährleisten und um die langfristige beständige Nutzung der Ressourcen zu garantieren, muss sich das Bauingenieurwesen bei der technischen Planung auch an den ökologischen Randbedingungen orientieren. Es muss ein langfristiges Ziel sein, die Wasserbilanz vor selbstinduzierten nachhaltigen Veränderungen zu schützen. Neben der Übernutzung (Verbrauch > Regeneration) der Resource selbst muss auch die indirekte Beeinflussung der Wasserbilanz über den Energiehaushalt beobachtet werden.

---

## 3.3 Gegenseitige Beeinflussung von Energie- und Wasserbilanz

---

Während der Wirkungsmechanismus über offenen Wasserflächen eindeutig ist, ist das Zusammenspiel von Wasser, Boden und Luft in der jeweiligen Energieumgebung erheblich komplexer. Sowohl der Boden wie auch die Vegetation besitzen hervorragende Puffereigenschaften, die Zeiten des Überschusses oder des Defizites kurz- und eventuell mittelfristig ausgleichen können. Langfristig aber stellen sich regional und vielleicht kontinental Veränderungen der Energie- und Wasserbilanz ein, die in der für die Menschheit derzeit relevanten Zeitspanne nicht mehr umkehrbar sind. Allgemein kann erwartet werden, dass die Temperaturerhöhung Veränderungen des Wasserhaushalts bewirken wird, die die Vegetationsdecke verändern wird. Wenig beleuchtet ist die Auswirkung der lokalen Veränderung der Energiebilanz durch Urbanisierung; es überrascht, dass nur wenige Untersuchungen darüber vorliegen.

Es ist daher notwendig, dass Ingenieure generell und Bauingenieure(Innen) im besonderen die Auswirkungen ihrer Tätigkeit bei ihren Planungen immer beachten. Nicht ohne Grund wird das Bauingenieurwesen in andern Ländern als Zivilingenieurwesen bezeichnet (Civil Engineering oder Ingenieur Civil). Es wäre unsicher, die Kontrolle über dieses zentrale Thema einer beständigen, langandauernden Entwicklung wasserwirtschaftlicher Systeme einzelnen Berufsgruppen zu übertragen. Geeigneter erscheint die Zusammenarbeit aller beteiligten Berufsgruppen unter Berücksichtigung der öffentlichen Meinungsbildung. Es ist die Aufgabe der Ingenieurhydrologie die Auswirkungen der anthropogenen Einflussnahme auf den Wasserkreislauf objektiv zu erfassen.

### 3.4 Auswirkung der Urbanisierung

Gemessen an anderen Formen der Beeinflussung ist die Urbanisierung die wohl intensivste Einflussnahme. Die daraus resultierenden Auswirkungen können wie folgt beschrieben werden:

- Einflüsse auf den Energiehaushalt und das Kleinklima
- Aufheizen der künstlichen Oberflächen durch absorbierte Strahlungsenergie
- Eintrag zusätzlicher Energie (Transport, Heizung, etc.)
- Abschirmung gegen Wind

Durch diese Einflüsse wird im wesentlichen die potentielle Verdunstung erhöht; außerdem entstehen häufig zusätzliche konvektive Starkniederschläge.

#### Einflüsse auf den Wasserhaushalt:

- Verdichtung und Versiegelung der Erdoberfläche
- Bau künstlicher Entwässerungskanäle und Gräben
- Zufuhr zusätzlichen Wassers für Bevölkerung und Industrie

Durch diese Einflüsse wird der direkte Abfluss von diesen Flächen zu Ungunsten der Grundwasserneubildung erhöht und schnell, in den meisten Fällen gemeinsam mit dem verschmutzten Trinkwasser abgeleitet. Da die verbleibenden unversiegelten Flächen ebenfalls der erhöhten potentiellen Verdunstung unterliegen, steigt auch die aktuelle Verdunstungsrate, wodurch sich die Grundwasserneubildung im Vergleich zu nicht urbanisierten Flächen reduziert.

Der Einfluss der Urbanisierung auf die verschiedenen Wasserbilanzkomponenten ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

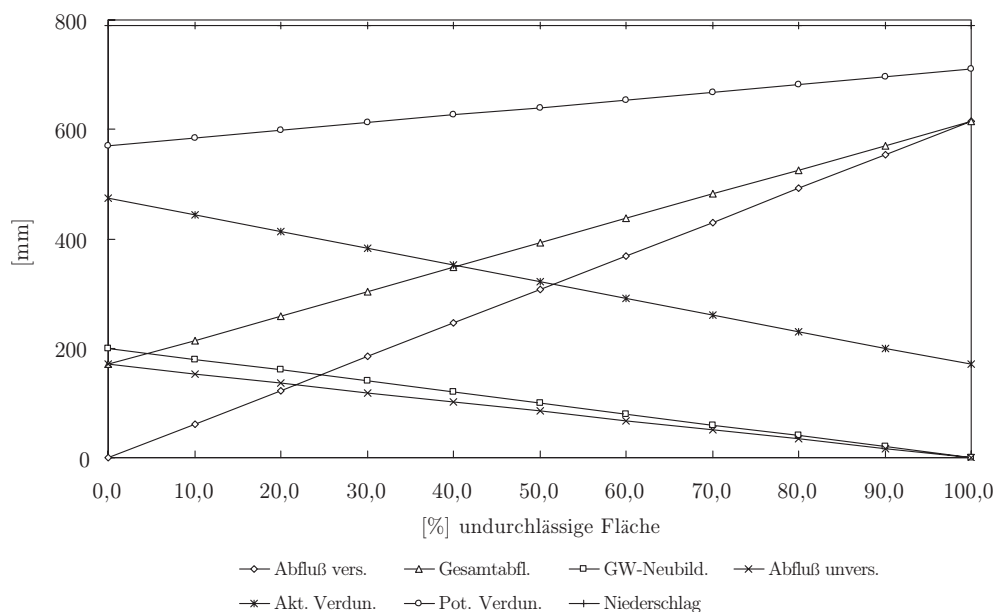


Abbildung 3.2: Die Wasserbilanzkomponenten in Abhängigkeit vom Versiegelungsgrad



---

## 4 Messmethoden

---

Um die Wasserhaushaltsbilanz bestimmen zu können, werden einzelne Glieder über Messungen bestimmt. Die Messungen erfassen sowohl einzelne Prozesse als auch Speicherinhalte. Im Rahmen der Klimamessungen des Deutschen Wetterdienstes werden Niederschlag, Strahlung, Wind, Temperaturen und relative Luftfeuchte gemessen, an einzelnen Stationen auch Informationen über die Schneespeicherung und -schmelze. Die hydrologischen Dienste der Wasserwirtschaftsverwaltung erfassen ebenfalls Niederschläge, im wesentlichen aber Wasserstände an Fließgewässern, Seen und im Grundwasser. Durch Zusammenhangsanalysen zwischen Wasserständen und Abflüssen können an Fließgewässern Abflussganglinien ermittelt werden. An einzelnen Messstellen werden direkte und indirekte Messungen der Verdunstung durchgeführt. Vereinzelt, insbesondere für besondere Fragestellungen werden auch die Infiltration, die Grundwasserneubildung und die Bodenfeuchte erfasst. Die Messgrößen werden letztlich in Geschwindigkeiten umgerechnet  $[L/T]$ , z.B. in mm/h, mm/d oder mm/a. Für die meisten Komponenten der Wasserbilanz ist dies einfach. Lediglich für den Durchfluss an einem definierten Querschnitt muss über die zum Abfluss beitragende Fläche integriert werden.

---

### 4.1 Klimagrößen

---

Während Wetter das momentane (tägliche) Geschehen und Witterung den kurzfristigen Ablauf beschreibt, werden die langfristigen meteorologischen Randbedingungen einer Region als Klima bezeichnet. Dazu gibt es eine Vielzahl von charakteristischen Merkmalen, von denen für die Ingenieurhydrologie fünf bedeutend sind. An einer Vielzahl von Klimahauptstationen werden dreimal pro Tag die *Windgeschwindigkeit*, die *Temperatur*, die *relative Luftfeuchte* und die *Strahlung* gemessen. Ersatzweise wird für die Strahlung auch die tägliche Sonnenscheindauer gemessen. Hier und an mehreren weiteren Stationen wird auch der *Niederschlag* einmal pro Tag mit Hilfe eines Niederschlagsmessers (Abbildung 4.1(a)) bestimmt.

Um den Verlauf des Niederschlags in höherer zeitlicher Auflösung erfassen zu können, werden Niederschlagsschreiber (Abbildung 4.1(b)) verwendet, die die Zunahme der Niederschlagshöhe in der Zeit erfassen. Es gibt eine Reihe von Geräten für diesen Zweck, die entweder mechanisch über eine Schreibautomatik auf Papier aufzeichnen und/oder (in zunehmendem Maß) über Analog/Digitalwandler direkt auf ein Speichermedium übertragen. Von der Mechanik werden Niederschlagswaagen, -wippen, -tropfenzähler und Geräte nach dem Schwimmerprinzip unterschieden, wobei das Schwimmerprinzip eindeutig überwiegt.

Der über der Auffangfläche ( $200 \text{ cm}^2$ ) fallende Niederschlag wird über einen Trichter einem Auffanggefäß zugeführt, in dem ein Schwimmer den aktuellen Wasserstand anzeigt. Der Schwimmer ist mit einer Schreibfeder verbunden, die den Wasserstand auf eine sich mit Uhrzeigerschwindigkeit drehende Trommel überträgt. Wird ein maximaler Wasserstand überschritten, wird das Sammelgefäß nach dem Heberprinzip (s. Hydraulik) entleert; der Schwimmer kehrt in die untere Grundposition zurück.

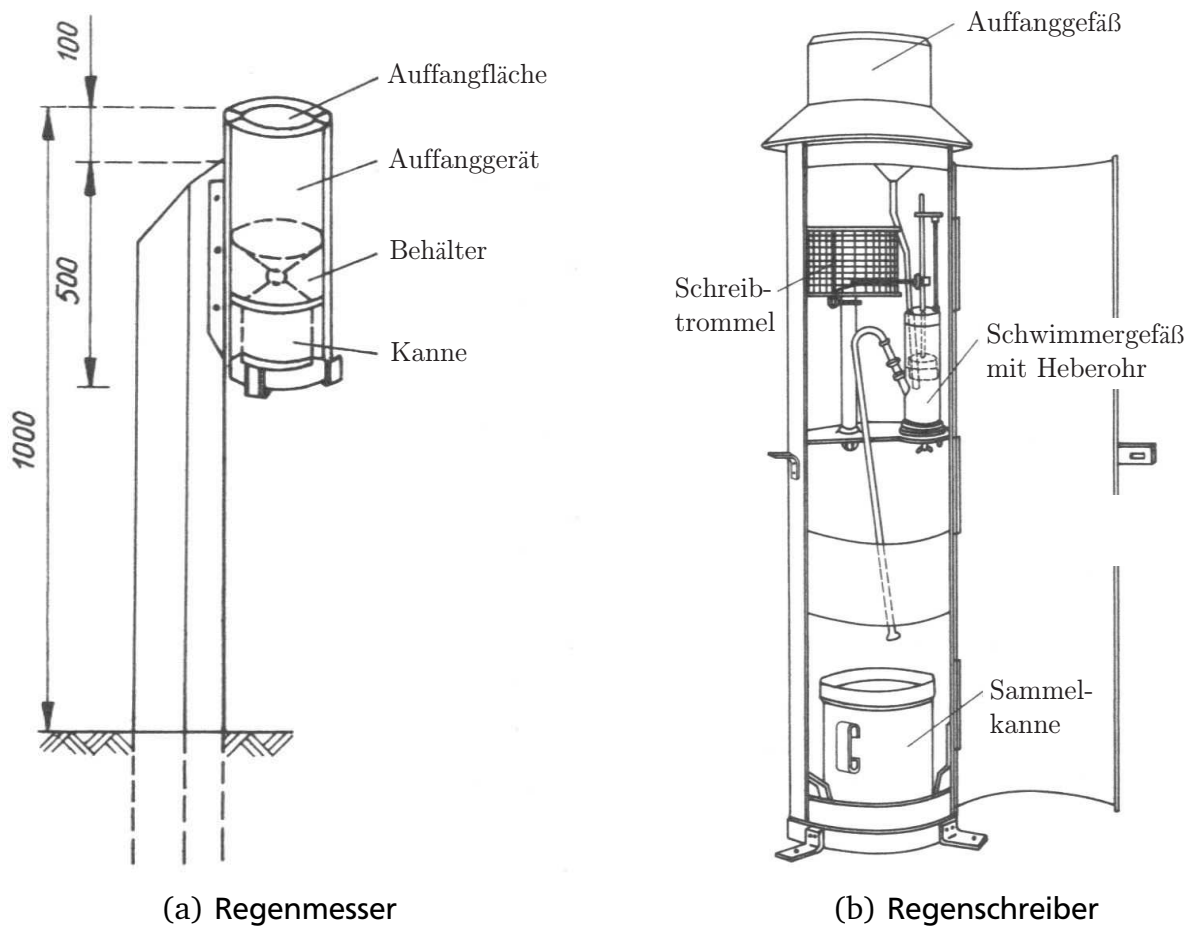


Abbildung 4.1: Regenschneider und Regenschreiber [2]

## 4.2 Verdunstung

Die Verdunstung von offenen Wasserflächen kann auf einfache Art gemessen werden. Zu diesem Zweck wird an einer Station an einem offenen Gefäß die Wasserstandsänderung  $\Delta h$  und an einem benachbarten Niederschlagsmesser die Niederschlagshöhe  $N$  während eines Tages erfasst. Die Verdunstungshöhe  $E$  ergibt sich zu

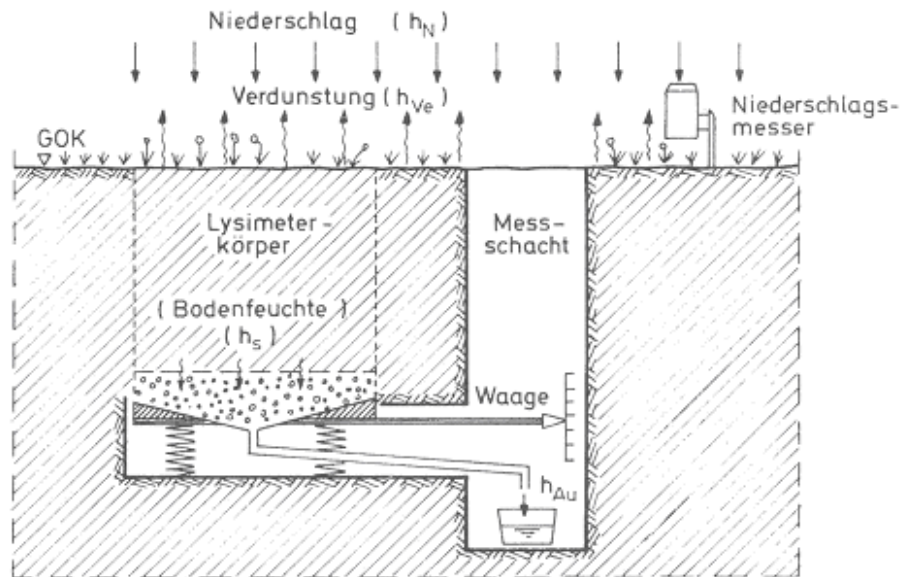
$$E = N + \Delta h \quad \text{mit } \Delta h = h_t - h_{t+\Delta t} \text{ [mm]} \quad (4.1)$$

Selbst wenn die Wasseroberfläche in etwa auf der Höhe der Geländeoberkante liegt, ist die Übertragung auf große Wasserflächen wegen der Aufheizung des Bodens und der Windumströmung mit Unsicherheiten behaftet.

Die Messung der Evapotranspiration von bewachsenen Bodenkörpern ist mit erheblich mehr Aufwand verbunden, wobei eine Aufteilung in Evaporation und Transpiration nicht möglich ist. Die Messung erfolgt an Lysimetern (siehe Abbildung 4.2), an denen gleichzeitig andere Komponenten der Wasserbilanz erfasst werden können, wie z.B. die Infiltration oder die Perkolation. Unterschieden wird in wägbare und nicht wägbare Lysimeter.

Die Infiltration (siehe Kapitel 4.4) ergibt sich aus der Differenz zwischen Niederschlag und Oberflächenabfluss. Die aktuelle Evapotranspiration ergibt sich aus der Infiltration reduziert um





**Abbildung 4.2:** Wägbarer Lysimeter [6]

die Aussickerung und die Gewichtsveränderung. Gleichzeitig werden neben dem Lysimeter die Eingangswerte zur Berechnung der potentiellen Verdunstung gemessen. Dies ist insbesondere an nicht wägbaren Lysimetern wichtig, wenn die Bilanzgleichung mit der Bodenfeuchteveränderung und der aktuellen Verdunstung zwei unbekannte Größen enthält.

### 4.3 Abfluss

Der Abfluss wird häufig über eine unmittelbare, funktional bekannte oder nachträglich über eine empirisch bestimmte Beziehung zwischen Wasserstand, Fläche und Geschwindigkeit ermittelt. In der angewandten Hydrologie wird im Allgemeinen der Wasserstand nach verschiedenen Methoden in verkleinertem Maßstab auf Papier übertragen. Um den Zusammenhang zwischen Wasserstand und Abfluss zu ermitteln, wird für mehr oder weniger stationäre Abflusszustände der Durchfluss über den Querschnitt integriert, so dass punktweise einem Wasserstand ein entsprechender Abfluss zugeordnet werden kann. Es wird dann durch die Punkte eine empirische Ausgleichsfunktion gelegt. Problematisch ist die Belegung der Wasserstand-Abflussbeziehung im Hochwasserbereich, da zum einen die Annahme stationärer Abflusszustände nicht berechtigt ist und aufgrund der Kurzfristigkeit die z.T. umfangreichen Messungen oft nicht durchführbar sind. Die Systematik der Messung des Wasserstandes geht aus Abbildung 4.5 hervor.

In anderen Fällen kann durch bekannte hydraulische Zusammenhänge zwischen Wasserstand  $H$ , Durchflussbreite  $B$  und Abfluss  $Q$  ein funktionaler Zusammenhang hergestellt werden:

$$Q(h) = a \cdot B(H) \cdot H^{3/2} \quad (4.2)$$

Dabei kann  $B$  ebenfalls funktional von  $H$  abhängen (z.B. Dreieck, Rechteck, Trapez).

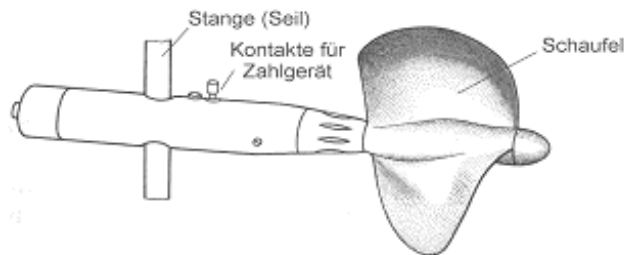
Als Überschlagsmethode kann die Fließgeschwindigkeit  $v$  mit Hilfe von Flößen ermittelt werden, die in den Abflussquerschnitt eintauchen. Durch Messen der Fließzeit  $T$  zwischen zwei Kontrollquerschnitten im Abstand  $L$  kann die Fließgeschwindigkeit berechnet werden.

$$v = \frac{L}{T} \quad (4.3)$$

Nach Abmessen bzw. Abschätzen des Abflussquerschnitts erhält man einen ersten Anhalt über den Durchfluss.

$$Q = v \cdot A \quad (4.4)$$

Die Fließgeschwindigkeit ist über den Durchflussquerschnitt nicht konstant. In der Praxis wird zur punktuellen Messung der Fließgeschwindigkeit im Durchflussquerschnitt häufig der hydrometrische Flügel (siehe Abbildung 4.3) verwendet.

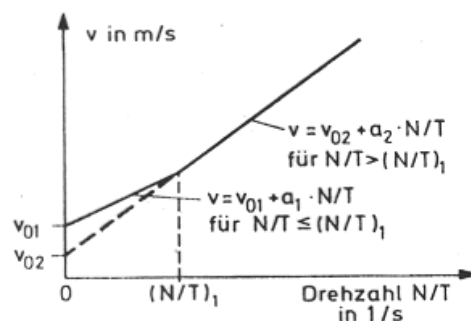


**Abbildung 4.3:** Hydrometrischer Messflügel [2]

Dazu wird der hydrometrische Flügel mit Hilfe eines Drahtseils oder einer Stange an die jeweilige Stelle im Durchflussquerschnitt gebracht. Aufgrund der axialen Anströmung dreht sich der Propeller. Aus der Anzahl der Flügelumdrehung  $N$  während der Messdauer  $T$  kann die Fließgeschwindigkeit  $v$  am jeweiligen Messpunkt über Gleichung 4.5 ermittelt werden (siehe Abbildung 4.4). Die spezifischen Konstanten  $v_0$  und  $a$  sind für jeden Messflügel durch Eichung zu bestimmen.

$$v = v_0 + a \cdot \frac{N}{T} \quad (4.5)$$

Zur Bestimmung des Durchflusses an einem Flussquerschnitt wird der Messquerschnitt in Lamellen unterteilt. Bei der Unterteilung ist zu beachten, dass die Lamellenbegrenzungen mit



**Abbildung 4.4:** Eichkurve [6]

vorhandenen Profilbrechpunkten übereinstimmen. Die Lamellenbreiten müssen nicht konstant sein. In den Lamellenmitten liegen die Messlotrechten  $i$ , auf denen in verschiedenen Wassertiefen  $z$  die Fließgeschwindigkeiten gemessen werden.

Bei der sogenannten *Sechspunktmethode* werden je Messlot  $i$  sechs Messpunkte gewählt, die in 20, 40, 60, 80% der Wassertiefe  $h$  und in größtmöglicher Nähe des Wasserspiegels und der Sohle

liegen. Daraufhin kann für jedes Messlot die mittlere Geschwindigkeit  $v_{mi}$  mit der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$v_{mi} = 0,1 \cdot (v_{i,0h} + 2 \cdot v_{i,0,2h} + 2 \cdot v_{i,0,4h} + 2 \cdot v_{i,0,6h} + 2 \cdot v_{i,0,8h} + v_{i,h}) \quad (4.6)$$

Bei weniger als sechs Messpunkten pro Messlot wird die mittlere Geschwindigkeit als einfaches arithmetisches Mittel aus den Fließgeschwindigkeiten bestimmt.

Der Durchfluss  $Q_i$  der  $i$ -ten Lamelle ergibt sich aus:

$$Q_i = A_i \cdot v_{mi} \quad (4.7)$$

$$\text{mit } A_i = b_i \cdot h_i \text{ und } h_i = 0,25 \cdot (h_{i,links} + 2 \cdot h_{i,Mitte} + h_{i,rechts}) \quad (4.8)$$

Der Gesamtdurchfluss  $Q$  wird dann durch Summation der Lamellendurchflüsse ermittelt.

Ein weiteres Verfahren zur Durchflussmessung ist das Salzverdünnungsverfahren. Es wird angewendet, wenn mit Messflügeln nicht mehr gemessen werden kann, z.B. in Gebirgsbächen mit geringen Wassertiefen. Dabei wird eine Tracerlösung hoher Konzentration  $c_1$  entweder mit konstanter Rate  $Q_I$  oder als einmalige Zugabe mit dem Volumen  $V_I$  in das Fließgewässer injiziert. In einem geeigneten Querschnitt wird stromabwärts die Konzentration  $c_2$  gemessen. Die Konzentration  $c_0$  des unbeeinflussten Abflusses  $Q$  wird ebenfalls bestimmt.

Im Fall der konstanten Infusion  $Q_I$  ergibt sich der Abfluss zu:

$$Q \cdot c_0 + Q_I \cdot c_1 = c_2 \cdot (Q + Q_I) \quad (4.9)$$

$$Q = Q_I \cdot \left( \frac{c_2 - c_1}{c_0 - c_2} \right) \quad (4.10)$$

Für eine einmalige Zugabe ergibt sich der Abfluss zu

$$\int_0^{\infty} (Q \cdot c_0) dt + V \cdot c_1 = \int_0^{\infty} (Q \cdot c_2) dt \quad (4.11)$$

$$V \cdot c_1 = Q \cdot \int_0^{\infty} (c_2 - c_0) dt \quad \Rightarrow \quad Q = \frac{V \cdot c_1}{\int_0^{\infty} (c_2 - c_0) dt} \quad (4.12)$$

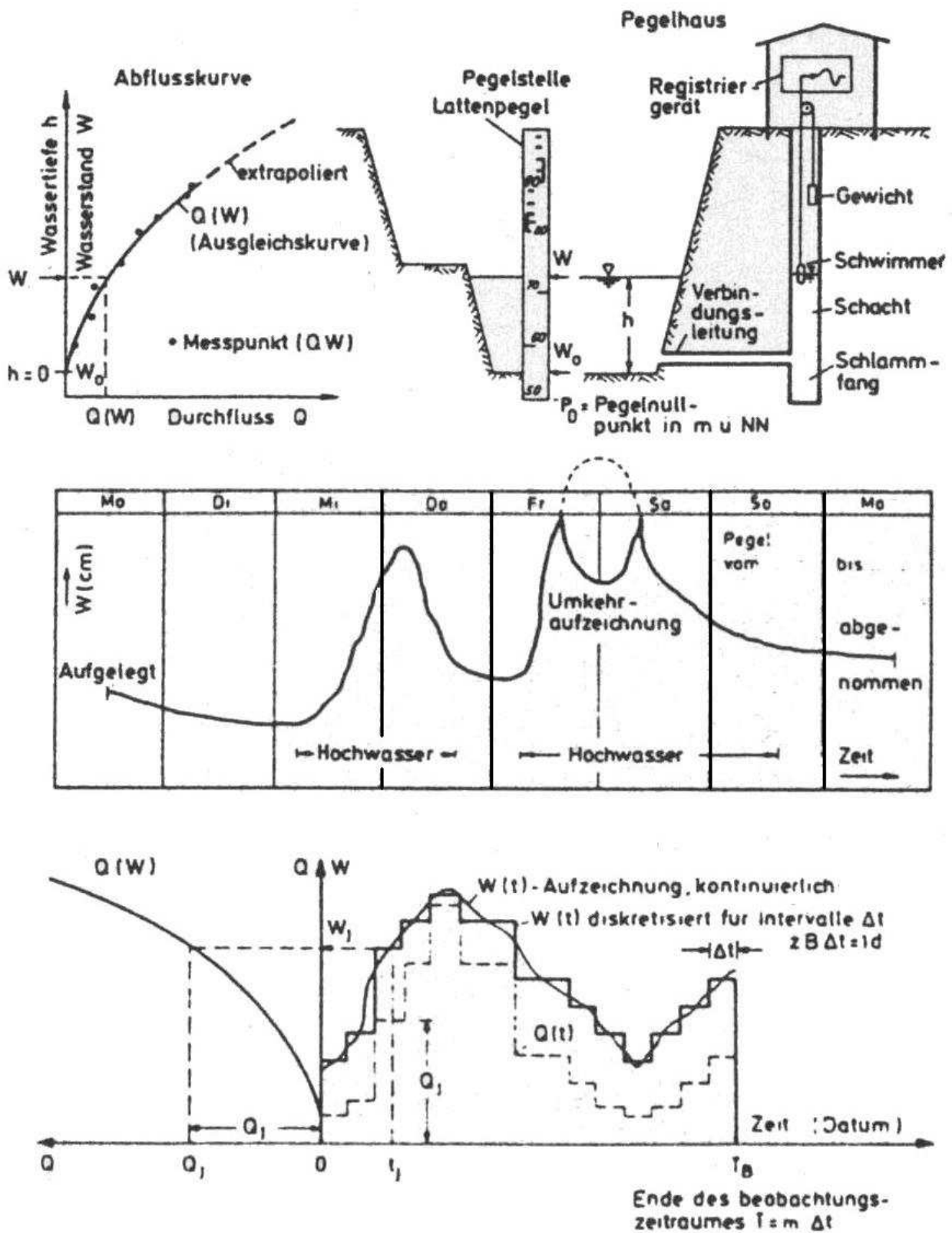


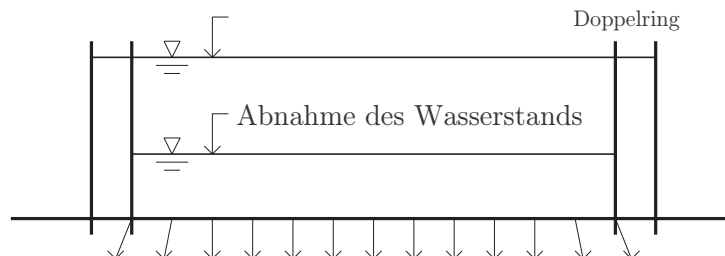
Abbildung 4.5: Ermittlung der Abflussganglinie über die Wasserstandsabflussbeziehung [6]

---

## 4.4 Infiltration

---

Das Eindringen von Wasser in den Boden wird über Infiltrimeter bestimmt (Abbildung 4.6). Dazu wird ein Ring bzw. Doppelring auf die Erdoberfläche aufgesetzt und angedrückt. In diesen Ring wird Wasser eingefüllt. Die Abnahme des Wasserstandes entspricht der Infiltration.



**Abbildung 4.6: Doppelring-Infiltrimeter**

Aufgrund der zweidimensionalen Sickerwasserbewegung am Rand des Infiltrimeters sind diese Messungen mit hohen Unsicherheiten verbunden und lassen im Wesentlichen nur einen Vergleich des Verhaltens verschiedener Böden zu. Die Übertragung auf größere Flächen bedarf der Korrektur.

---

## 4.5 Grundwasserstand

---

Das Grundwasser stellt einen der wesentlichen Speicher des Wasserhaushalts dar. Deshalb ist die Nutzung und der Schutz des Grundwassers von überragender Bedeutung. Daher ist die Beobachtung der Grundwasseroberfläche ebenfalls äußerst bedeutsam.

Die Beobachtung des Grundwasserspiegels erfolgt über Brunnen. Die ursprüngliche Herstellung von Brunnen erfolgte durch Grabung. Es sind gegrabene Brunnen bis zu 50 m Tiefe bekannt. In den wenig erschlossenen Regionen der Erde ist diese Art von Brunnen noch immer weit verbreitet. Die häufigste Art der Herstellung ist jedoch die Bohrung. An Orten mit geringem Flurabstand (Geländeoberfläche bis Grundwasseroberfläche) ist die Nutzung von Handbohrern oder eingeschlagenen Rohren möglich. Ansonsten werden Bohrmaschinen verwendet. In die Bohrlöcher werden Beobachtungsrohre eingeführt. Je nach Untergrundverhältnissen kann das Rohr im standfesten Fels enden oder durch ein Filter gestützt werden. Das Einschwemmen von Material wird durch Siebe verhindert.

Die Erfassung des Wasserstandes erfolgt manuell mit einem Maßband. Das Auftreffen des Bandendes auf der Grundwasseroberfläche wird akkustisch oder elektrisch signalisiert. Automatische Aufzeichnungen erfolgen häufig nach dem Schwimmerprinzip (wie bei Gewässerpegeln). Neben dem Grundwasserstand spielt immer häufiger die Güte eine wesentliche Rolle. In jedem Fall ist eine strikte Kontrolle möglicher Schadstoffimmissionen über den Brunnen erforderlich.

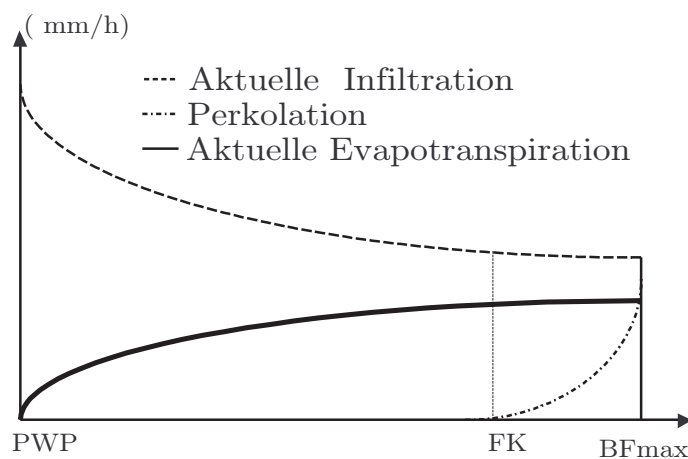
---

## 4.6 Bodenfeuchte

---

Wesentlich für das Verständnis des Bodenwasserhaushalts ist der Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und den Prozessen Infiltration, Perkolation und aktueller Verdunstung. Im Bodenfeuchteverlauf gibt es Grenzbereiche, an denen sich Prozesse verändern. Die wesentlichen

Bodenparameter sind der permanente Welkepunkt, die Feldkapazität und das Gesamtporenvolumen. Unterhalb des permanenten Welkepunkts sind die Wurzeln der Vegetationsdecke nicht mehr in der Lage, dem Boden das vorwiegend hydrochemisch gebundene Wasser zu entziehen (ca. -150 m WS). Bis zur Feldkapazität wird Bodenwasser in der Hülle und in Zwickeln entgegen der Schwerkraft gehalten. Oberhalb der Feldkapazität beginnt eine signifikante Perkolation, die bei Auffüllung des Gesamtporenvolumens die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit erreicht. Die Zusammenhänge gehen aus Abbildung 4.7 hervor.



**Abbildung 4.7:** Zusammenhänge zwischen Bodenfeuchte, Infiltration, Perkolation und aktueller Evapotranspiration

Die Bodenfeuchte kann nur mit einer Methode direkt gemessen werden. Zu diesem Zweck wird eine Bodenprobe entnommen, die im Ausgangszustand gewogen wird. Die Probe wird dann im Ofen getrocknet und erneut gewogen. Aus der Differenz der Gewichte vor und nach der Trocknung wird der Ausgangswassergehalt bestimmt. Diese gravimetrische Methode ist die genaueste. Andere, indirekte Methoden basieren auf Eichmessungen mit der gravimetrischen Methode.

Eine einfache Methode zur Bestimmung der Bodenfeuchte ist die Messung des elektrischen Widerstands. Poröses Material unterschiedlicher Art wird in den Boden eingebracht; nach einiger Zeit stellt sich ein Gleichgewicht mit der Umgebung ein. Am blockförmigen Material sind zwei Elektroden angebracht, zwischen denen der elektrische Widerstand gemessen wird. Eine Änderung der Bodenfeuchte führt zu einer Änderung des Widerstands. Ist der Zusammenhang zwischen beiden bekannt, kann auf die Feuchte geschlossen werden.

Eine weitere verbreitete Methode ist die Tensiometermessung. Eine im allgemeinen keramische Tasse wird an ein Druckmessgerät (Manometer) angeschlossen. Nach Auffüllung des Systems mit Wasser stellt sich nach einiger Zeit ein Gleichgewichtszustand zwischen Tasse und Boden ein. Wenn der Boden trocknet, fließt Wasser aus dem System aus und führt zur Erhöhung der (negativen) Spannung. Bei Zunahme der Feuchte fließt Wasser dem System zu und reduziert die Spannung. Zur Bestimmung der Bodenfeuchte ist die Kenntnis des Zusammenhangs zwischen Feuchte und Spannung erforderlich, die aus der gravimetrischen Methode gewonnen werden kann.

Eine weitere wesentliche Methode ist die Neutronensonde. Dabei wird ausgenutzt, dass Wasserstoffatome mit geringem Gewicht von einer Sonde ausgesandte Neutronen stärker verzögern

---

als Bodenpartikel. Die Anzahl der langsamen Neutronen kann gezählt werden und ist ein Maß für den Wassergehalt.

---

## 4.7 Physiographische Merkmale von Einzugsgebieten

---

Die bisher aufgeführten Messungen behandeln einzelne Glieder der Wasserhaushaltsgleichung an einem Punkt. Bei der Integration der einzelnen Niederschlagsanteile über ein Einzugsgebiet spielen die Eigenschaften des Gebietes selbst eine wesentliche Rolle.

**Die Einzugsgebietsfläche:** Eine maßgebliche Kenngröße eines Gebietes ist die Flächengröße. Sie wird durch Wasserscheiden bestimmt. Eine Wasserscheide ist die Verbindungslinie zwischen zwei Erhebungen durch den dazwischen liegenden Sattelpunkt. Abflüsse von durch Wasserscheiden getrennten Flächen fließen verschiedenen Gewässern zu.

**Die Topographie:** Insbesondere für die Ausbildung der unterschiedlichen Abflusskomponenten ist die Neigung der Erdoberfläche von großer Bedeutung. In der Bundesrepublik sind flächendeckend topographische Karten verfügbar, die z.T. in digitaler Form auf Datenträgern vorliegen (Digitale Geländemodelle). Eine wesentliche zusammenfassende Darstellung der topographischen Verhältnisse sind hypsometrische Kurven. Dabei wird die Verteilung der Flächen gegenüber den Geländehöhen aufgetragen.

**Die Landnutzung:** Die Nutzung der Erdoberfläche hat einen entscheidenden Einfluss auf die Wasserbilanz. Die Landnutzung kann ebenfalls aus Karten entnommen werden. Immer häufiger werden Satellitenrasterbilder zur Bestimmung der jeweiligen Landnutzung herangezogen. Es wird in Laub, Misch- und Nadelwald, Acker, Weide, Wasser und versiegelte Flächen unterschieden.





---

## 5 Mathematische Berechnungsmethoden

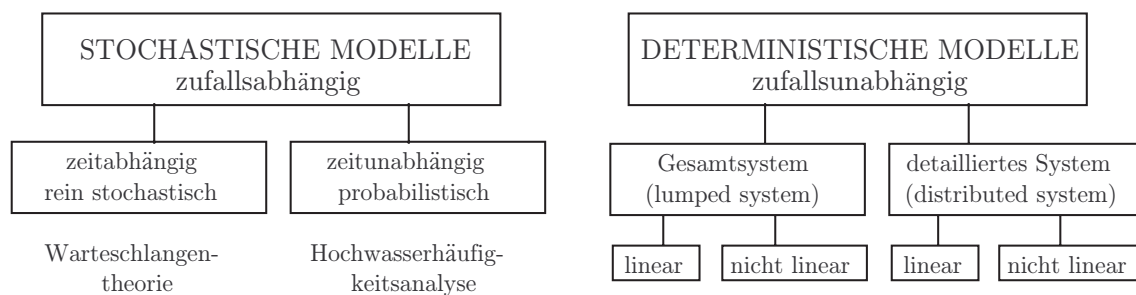
---

### 5.1 Einleitung

---

In der Hydrologie nimmt die Bedeutung mathematischer Modelle zur Lösung wasserwirtschaftlicher Planungsaufgaben stetig zu. Waren noch vor wenigen Jahren Faustformeln und Diagrammlösungen weit verbreitet, besteht jetzt der Anspruch, langfristig gültige Aussagen mit einem hohen Genauigkeitsanspruch zu liefern. Diese Entwicklung wird sich voraussichtlich fortsetzen.

Ein wesentlicher Grund dafür ist auch die zunehmende Inhomogenität der Messreihen des Abflusses durch anthropogene Beeinflussung. Darüber hinaus sind die zur Durchführung von Modellrechnungen erforderlichen Computer im Vergleich zu Personalkosten mit geringen Kosten verbunden. Die Aufnahme der zur Modellierung erforderlichen Eingangsdaten wird durch die Datenverarbeitung und neue Aufnahmetechniken wie die Fernerkundung fortlaufend kostengünstiger. Die Modelle und Verfahren in der Hydrologie werden gemäß Abbildung 5.1 untergliedert.



**Abbildung 5.1:** Modelle und Verfahren in der Hydrologie

Stochastische Verfahren beschreiben unter Berücksichtigung des Zeit- und Zufallseinflusses Zusammenhänge zwischen mehreren Größen mit Hilfe statistischer Ansätze.

Deterministische Verfahren beschreiben hingegen die Ursache-Wirkungsbeziehung zwischen auslösenden (z.B. Niederschlag) und resultierenden Größen (z.B. Abfluss) mit Hilfe geeigneter Algorithmen. Wegen der hohen Komplexität werden keine exakten Lösungen der Energie- und Massenbilanzgleichungen, sondern vereinfachte konzeptionelle, auf empirischer Basis gewonnene Ansätze verwendet.

---

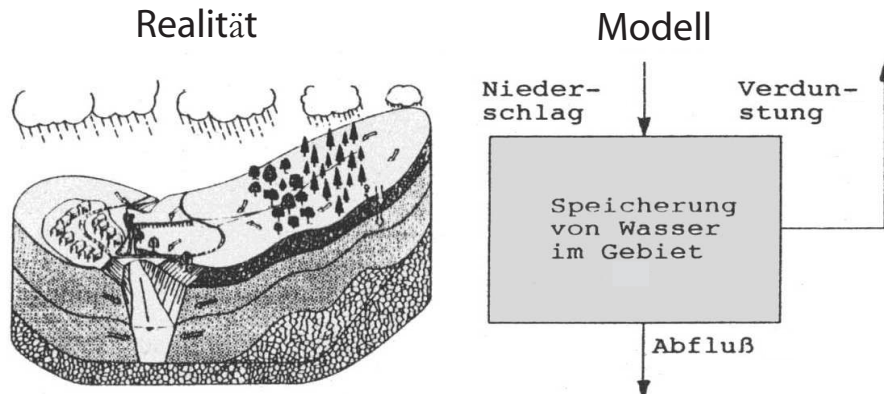
### 5.2 Grundlagen deterministischer hydrologischer Modelle

---

*Ein mathematisches hydrologisches Modell bildet die wesentlichen Eigenschaften des Wasserkreislaufs oder Teile davon ab, ohne das System selbst abzubilden [3].*

Dies steht im Gegensatz zu physikalischen Modellen z.B. in der Wasserbauversuchshalle, die im gleichen oder reduzierten Maßstab das zu analysierende Bauwerk oder System abbilden. Grundlage der Modelle ist die Wasserhaushaltsgleichung für einen gewählten Bilanzraum, z.B. für ein Einzugsgebiet. Die momentane Speicheränderung des Gebiets entspricht der Summe

aller momentanen Zu- und Abflüsse des Gebiets. Die Abstraktion von der Realität zum Modell ist in Abbildung 5.2 dargestellt.



**Abbildung 5.2:** Modell-Abbildung der Realität durch Abstraktion

Für Realität und Modell gilt in gleicher Weise die Massenbilanzgleichung.

$$\frac{dV}{dt} = N - E - A \quad [\text{mm/h}] \quad (5.1)$$

Die aus dem Gebiet abfließenden Komponenten (Verdunstung  $E$  und Abfluss  $A$ ) sind dabei im Allgemeinen vom Speichervolumen  $V$  abhängig. Eine wesentliche Annahme in der deterministischen Hydrologie beinhaltet die Voraussetzung eines linearen Zusammenhangs! Dies bedeutet die Zugrundlegung folgender Annahmen (unter den jeweiligen klimatischen Randbedingungen der potentiellen Verdunstung).

$$E(t) = k_1 \cdot V(t) \quad (5.2)$$

$$A(t) = k_2 \cdot V(t) \quad (5.3)$$

Daraus resultiert folgende inhomogene lineare DGL 1.Ordnung:

$$\frac{dV}{dt} = N(t) - (k_1 + k_2) \cdot V(t) \quad (5.4)$$

Diese DGL besitzt eine analytische Lösung, die aus der Vorlesung Mathematik III bekannt ist. (Zur Erinnerung : 1. Bestimme die Lösung des homogenen Anteils durch Separieren. 2. Multipliziere die Ausgangsgleichung mit dem integrierenden Faktor. 3. Bestimme die Integrationskonstante durch Annahme der Anfangsbedingungen.)

Nimmt man in einem Zeitintervall den Niederschlag als konstante Rate  $i$  [mm/h] an, so ergibt sich für Gleichung 5.4 folgende Lösung:

$$V(t) = \frac{i}{k_1 + k_2} \cdot \left(1 - e^{-(k_1+k_2) \cdot (t-t_0)}\right) + V_0 \cdot e^{-(k_1+k_2) \cdot (t-t_0)} \quad (5.5)$$

Abfluss und Verdunstung lassen sich dann aus den Ausgangsgleichungen 5.2 und 5.3 berechnen. Das Modellkonzept wird als "Linearer Speicher" bezeichnet und wird als Grundmodul bei der komplexen Modellierung hydrologischer Systeme in großem Umfang verwendet.

---

### 5.3 Hydrologische Modelle für Teilprozesse - ein Überblick

---

Obwohl es inhaltlich wünschenswert ist, den hydrologischen Kreislauf immer im Gesamtzusammenhang zu betrachten, ist es in der Ingenieurhydrologie häufig unumgänglich, Teilprozesse aus dem Gesamtkreislauf herauszutrennen und detailliert zu untersuchen. An den Schnittstellen zum Gesamtkreislauf sind dann die Randbedingungen zu schätzen z.B.:

- Hochwassermodelle: Schätzen der Verlustrate (Infiltration, Muldenspeicherung ...)
- Grundwassermodelle: Schätzen der GW-Neubildung

In der Ingenieurhydrologie stehen für die Bemessung von wasserbaulichen Anlagen die Hochwasserereignisse im Vordergrund (z.B. Bemessung von Hochwasserentlastungsanlagen an Speicherbauwerken), während für die Planung und den Betrieb wasserwirtschaftlicher Systeme im Allgemeinen die langjährige Wasserbilanz von größerer Bedeutung ist. Dies liegt darin begründet, dass nach Überschreiten des Speichervolumens weitere Zuflüsse so abgeleitet werden müssen, dass sie das Bauwerk (Damm, Mauer, etc.) nicht gefährden. Der Überlauf aus einem Speicher lässt sich z.B. mit einer aus der Hydraulik bekannten Formel in Abhängigkeit des Überfallbeiwerts  $\mu$  berechnen.

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot B \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h^{3/2} \quad (5.6)$$

Wenn  $Q$  bekannt ist, kann die erforderliche Überfallbreite  $B$  festgesetzt werden.

In Abbildung 5.3 ist die Entstehung von Hochwasserereignissen erklärt. Daraus geht hervor, dass ein Hochwasserabflussereignis nicht nur vom auslösenden Niederschlag, sondern in gleicher Weise auch von der hydrologischen und meteorologischen Vorgeschichte abhängt. Das gleiche Niederschlagsereignis kann z.B. im Frühling nach hoher Vorbefeuchtung durch ergiebige Niederschläge zu einem Hochwasserereignis führen, während es am Ende einer langen Trockenperiode am Ende des Sommers eventuell vollständig in den trockenen Boden einsickern kann. Der Zusammenhang zwischen Niederschlag und Abfluss ist von daher für unversiegelte bzw. natürliche Einzugsgebiete in hohem Maß nichtlinear!

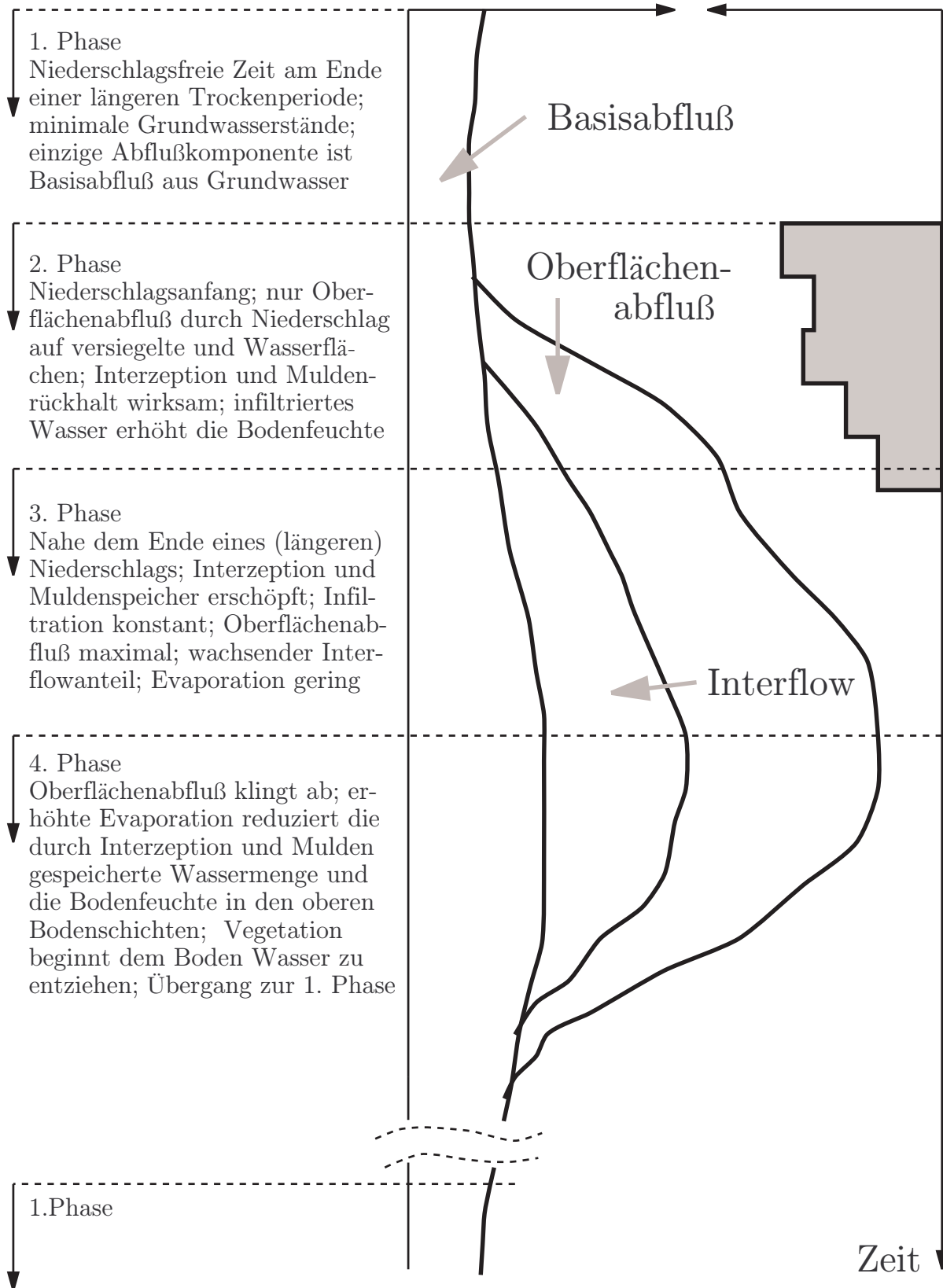
Wie bereits erwähnt, werden die Prozesse des hydrologischen Kreislaufs in der Ingenieurhydrologie aus dem Gesamtzusammenhang herausgenommen und getrennt voneinander betrachtet. Die in der Bundesrepublik übliche Untergliederung in Teilprozesse ist im Folgenden kurz erläutert (siehe auch Abbildung 5.4).

**Belastungsbildung:** Entstehung von Niederschlag entweder direkt aus Regen oder durch Abschmelzen einer Schneedecke.

**Belastungsverteilung:** Ableitung eines mittleren Gebietsniederschlags aus einer oder mehreren Stationsaufzeichnungen

**Belastungsaufteilung/Abflussbildung:** Aufteilung des Gebietsniederschlags in direkt abflusswirksame Anteile (Oberflächenabfluss und Interflow) und langsame (Basisabfluss) oder nicht (Verdunstung) abflusswirksame Anteile.

**Abflusskonzentration:** Integration der direkten Abflussanteile über Fläche und Zeit bis zu einem gewählten Kontrollquerschnitt an einem Fließgewässer.



**Abbildung 5.3:** Phasen der Hochwasserentstehung

**Abflusstransformation:** Zeitliche Verschiebung (Translation) und Dämpfung bzw. Abflachung (Retention) von Hochwasserwellen in Gerinnestrecken oder Speichern.

Für die Beschreibung der Teilprozesse sind eine große Anzahl unterschiedlicher Verfahren und Teilmodelle bekannt. Im Rahmen der einführenden Vorlesung sollen einige davon beispielhaft erläutert werden. Die ausführliche Besprechung weiterer Verfahren und Modelle erfolgt in der Vorlesung Ingenieurhydrologie II. An dieser Stelle wird das Schmelzsetzungsverfahren lediglich verbal beschrieben. Die hier genannten Verfahren sind:

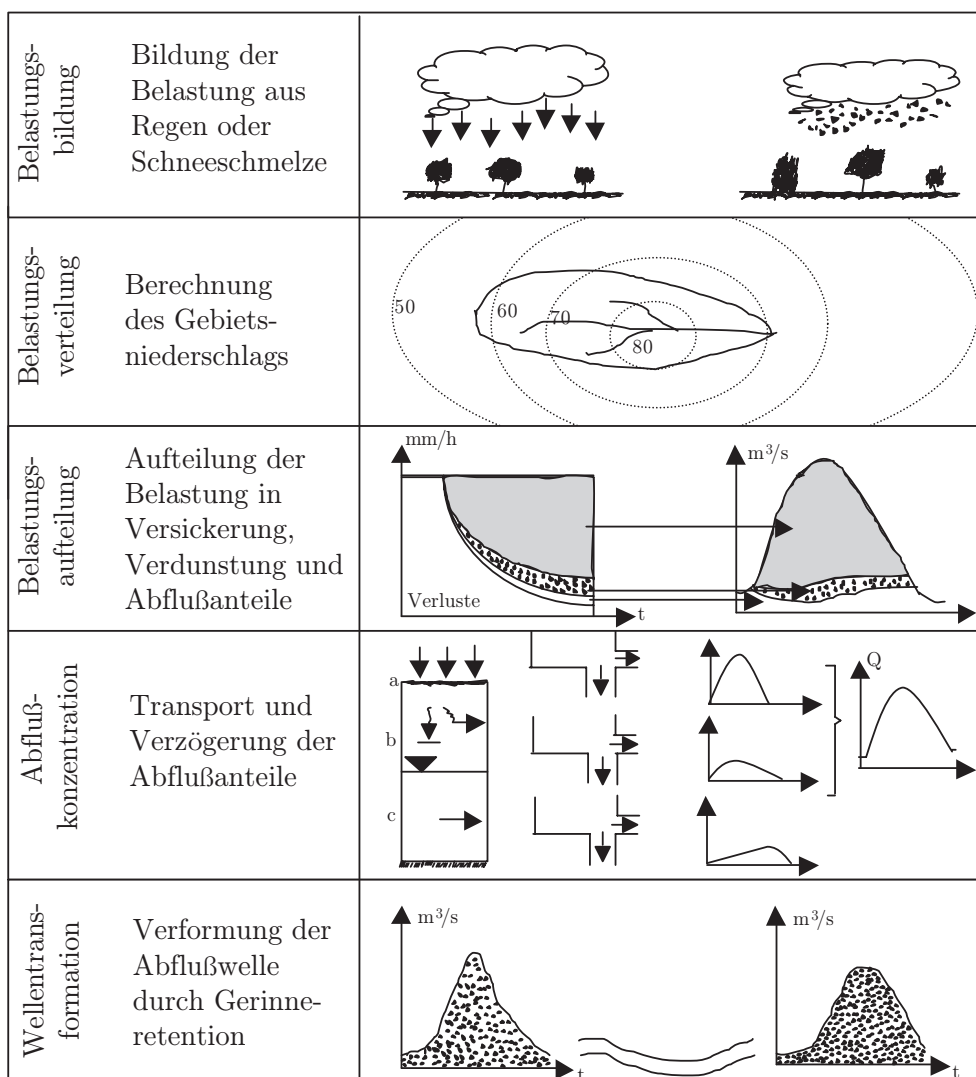
**Belastungsbildung:** Schmelzsetzungsverfahren

**Belastungsverteilung:** Thiessen-Polygon und Isohyetenverfahren

**Belastungsaufteilung/Abflussbildung:** Phi-Index-Verfahren, konst. Abflussbeiwert und Horton-Ansatz

**Abflusskonzentration:** Einheitsganglinie, Einzellinearspeicher und Isochronenverfahren

**Abflusstransformation:** Modifiziertes Puls-Verfahren, Muskingum-Verfahren



**Abbildung 5.4:** Untergliederung des Wasserkreislaufs in Teilprozesse

## 5.4 Belastungsbildung

### 5.4.1 Schmelzsetzungsverfahren

Es wird angenommen, dass unterhalb einer Grenztemperatur der Niederschlag als Schnee fällt. Durch die Annahme einer Schneedecke lässt sich der Niederschlag für die Dauer der negativen Temperaturen in eine Schneehöhe akkumulieren. Wenn die Temperatur über die Grenztemperatur ansteigt, werden bis dahin feste Bestandteile durch Schmelze in den flüssigen Zustand überführt. Zunächst kann die Schneedecke das flüssige Wasser ähnlich wie ein Schwamm halten, jedoch wird die Schneedecke komprimiert. Erst wenn der Gehalt an flüssigem Wasser etwa 45% überschreitet, wird das überschüssige Wasser abgegeben (Die Schneedecke ist "reif und schmilzt").

## 5.5 Belastungsverteilung

### 5.5.1 Thiessen-Polygon-Verfahren

Alle Punkte werden den Stationen zugeordnet, denen sie am nächsten liegen. Dazu werden die Stationen untereinander verbunden. Die Mittelsenkrechte auf diesen Verbindungslinien stellt dann die Trennlinie zwischen den Teilflächen dar. Das Verfahren ist in Abbildung 5.5(a) dargestellt. Das Verfahren ist bereits sehr alt und hat sich immer dann als sinnvoll erwiesen, wenn die Verteilung der Stationen im Gebiet relativ gleichmäßig ist und orographische Einflüsse wie unregelmäßiges Relief und Luv/Lee- Effekte gering sind. Das Gebietsmittel berechnet sich als gewichtetes Mittel:

$$N_m = \frac{\sum (N_i \cdot A_i)}{\sum A_i} \quad (5.7)$$

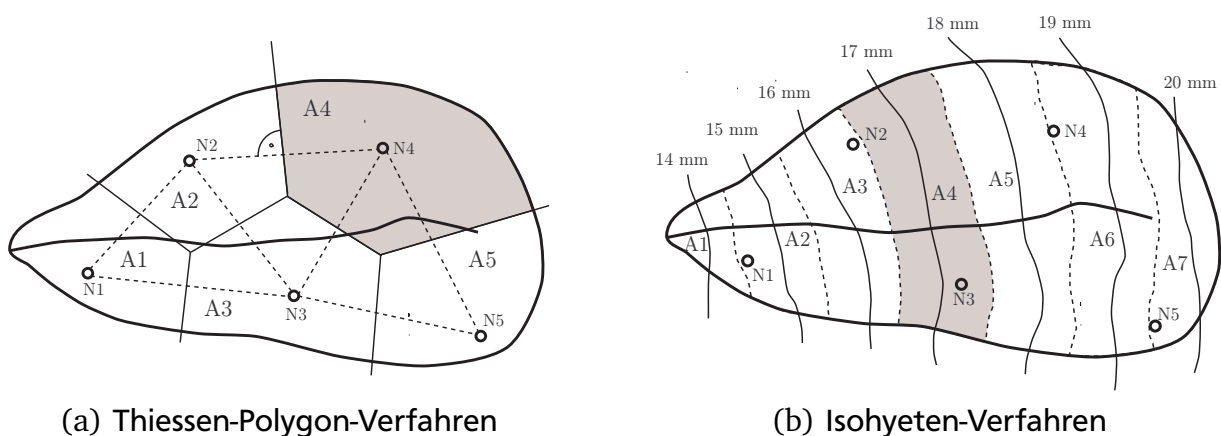


Abbildung 5.5: Verfahren zur Belastungsverteilung

---

## 5.5.2 Isohyeten-Verfahren

---

Auf der Grundlage der Stationsmessungen werden Linien gleichen Niederschlags (Isohyeten) ermittelt. Zwischen diesen Linien werden jeweils die halben Flächen der oberen und der unteren Isohyete zugeordnet. Das Gebietsmittel wird dann ebenfalls als gewichtetes Mittel entsprechend Gleichung 5.7 bestimmt. Mit diesem Verfahren lassen sich u.a. topografische Einflüsse, sofern diese bekannt sind, in der räumlichen Niederschlagsverteilung berücksichtigen. Diese Methode eignet sich somit für orographische Niederschläge im Gebirge. Das Verfahren ist in Abbildung 5.5(b) dargestellt.

---

## 5.6 Belastungsaufteilung/Abflussbildung

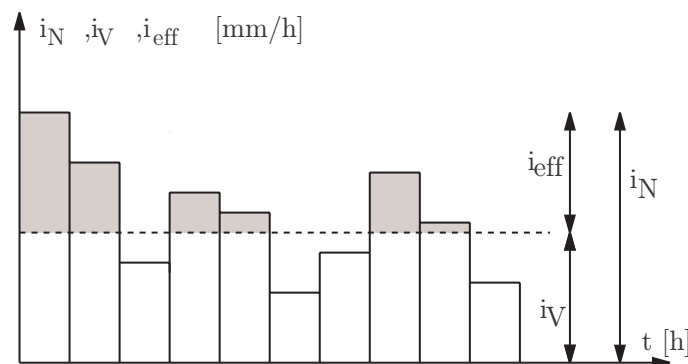
---

---

### 5.6.1 Phi-Index-Verfahren

---

Das Phi-Index-Verfahren wurde in der Vergangenheit häufig angewendet, geht jedoch von der äußerst unrealistischen Annahme einer konstanten Verlustrate aus. Dabei beschreibt die Verlustrate im Wesentlichen die Summe der Interzeptions- und Infiltrationsrate. Die Annahme bedeutet, dass unabhängig von der Dauer und der Intensität des Niederschlagsereignisses und damit unabhängig von der Bodenfeuchte die Rate unveränderlich bleibt. Das Verfahren ist in Abbildung 5.6 erläutert.



**Abbildung 5.6:** Das Phi-Index-Verfahren

Für die Verlustrate  $i_V(t)$  gilt hier:

$$i_{eff} = \begin{cases} i_N(t) - i_V(t) & \text{mit } i_V(t) = \text{konstant} \quad \text{für } i_N(t) > i_V(t), \\ 0 & \text{mit } i_V(t) = i_N(t) \quad \text{für } i_N(t) \leq i_V(t). \end{cases} \quad (5.8)$$

Das Phi-Index-Verfahren kommt bevorzugt auf versiegelten Flächen zur Anwendung.

## 5.6.2 Abflussbeiwertverfahren

Der Abflussbeiwert  $\Psi$  bezeichnet das Verhältnis des Effektivniederschlags  $N_{eff}$  zum Gesamtniederschlag  $N_{ges}$

$$\Psi = \frac{N_{eff}}{N_{ges}} = \frac{\int i_{eff}(t)dt}{\int i_{ges}(t)dt} \quad (5.9)$$

Der Abflussbeiwert ist abhängig von zahlreichen Parametern, u.A. von der Niederschlagsintensität und -dauer, von der Geländeneigung, der Bodenart, der Vegetation, der Landnutzung, sowie von der Anfangsbodenfeuchte zu Beginn eines Niederschlagsereignisses. Insofern ist der Abflussbeiwert kein zeitlich invariabler Gebietswert. Es wird jedoch oft vereinfachend ein konstanter Abflussbeiwert angenommen.

## 5.6.3 Horton-Verfahren

Das Horton-Verfahren beruht auf der Auswertung von Infiltrationsmessungen. Als geeignete Funktion für die Infiltrationsrate ergibt sich nach Abbildung 5.7 eine e-Funktion. Es wird angenommen, dass die Verlustrate der Infiltrationsrate  $i_V(t)$  entspricht:

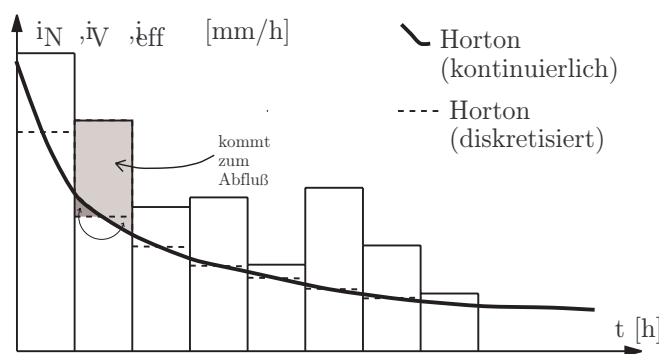
$$i_V(t) = (i_{V0} - i_{Vc}) \cdot e^{-\frac{t}{k}} + i_{Vc} \quad (5.10)$$

$i_{V0}$  = Infiltrationsrate zu Beginn des Ereignisses [mm/h]

$i_{Vc}$  = Infiltrationsrate bei Sättigung des Bodens [mm/h]

$k$  = Retentionskonstante [h]

In Gleichung 5.10 kann im Exponent wahlweise auch  $(-t \cdot k)$  stehen. In diesem Fall muss die Retentionskonstante  $k$  die Einheit [1/h] aufweisen.



**Abbildung 5.7:** Verlustrate nach dem Horton-Verfahren

Das Horton-Verfahren liefert für zeitlich konzentrierte Ereignisse gute Ergebnisse. Für alle langfristigen Betrachtungen der Wasserbilanz sind Modellansätze mit ereignisabhängigen Parametern ungeeignet; statt dessen müssen dann Ansätze mit einem "Gedächtnis" für die hydrologische und meteorologische Vorgeschichte verwendet werden.

Wird die Anfangsinfiltrationsrate  $i_{V0}$  an die Anfangsbodenfeuchte gekoppelt, so lässt sich der Ansatz von Horton in ein kontinuierliches Modell mit einem Gedächtnis umformen.



---

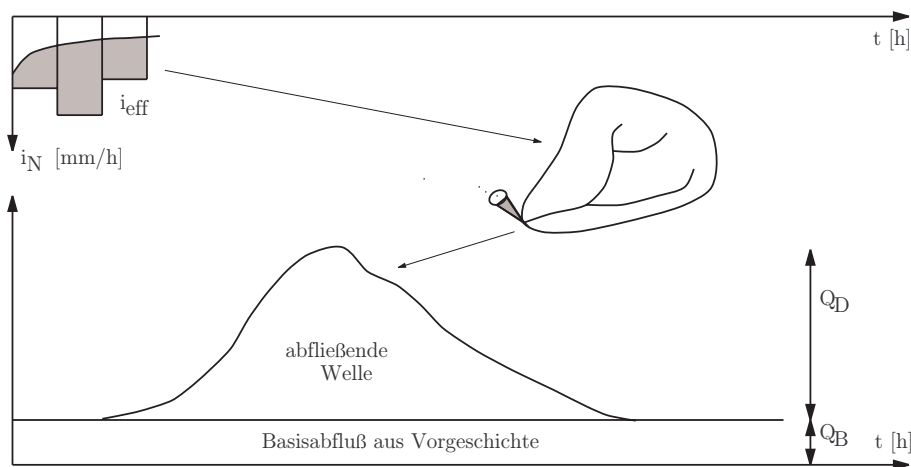
## 5.7 Abflusskonzentration

---

### 5.7.1 Grundlagen

---

Bei den meisten in der Praxis angewendeten Verfahren wird angenommen, dass ein linearer Zusammenhang zwischen effektivem Niederschlag und Direktabfluss besteht und dass dieser Niederschlag (wie in Belastungsbildung und -aufteilung bestimmt) gleichmäßig verteilt über der betrachteten Einzugsgebietsfläche fällt. Zur Analyse des Zusammenhangs zwischen Effektivniederschlag und Direktabfluss ist es zunächst notwendig, den Basisabfluss, resultierend aus langfristig gespeicherten Niederschlagsanteilen, vom Gesamtabfluss zu separieren (Ganglinienseparation). In einfachster Form kann dies durch Abzug eines konstanten Basisabflusses erfolgen wie in Abbildung 5.8 dargestellt.



**Abbildung 5.8:** Ganglinienseparation (idealisiert)

Die Übertragung der Niederschlagsrate [mm/h] in den Abfluss [ $m^3/s$ ] erfolgt durch Integration des Niederschlags über die Einzugsgebietsfläche.

$$Q(t) = \frac{1}{3,6} \cdot \int_0^A i_{\text{eff}}(t - \tau(x, y)) dA + Q_B \quad (5.11)$$

1/3,6 ist ein Umrechnungsfaktor für Zeit- und Flächendimensionen.  $\tau$  ist die Übertragungszeit zur Berücksichtigung der Übertragung der Niederschlagsrate am Ort  $x, y$  auf der Fläche  $A$  bis zum Kontrollquerschnitt (z.B. Pegel) für den Abfluss. Die Übertragungszeit beinhaltet die Fließzeit und die Verzögerungszeit aufgrund der Retention, hervorgerufen durch Unregelmäßigkeiten des Einzugsgebietes.

---

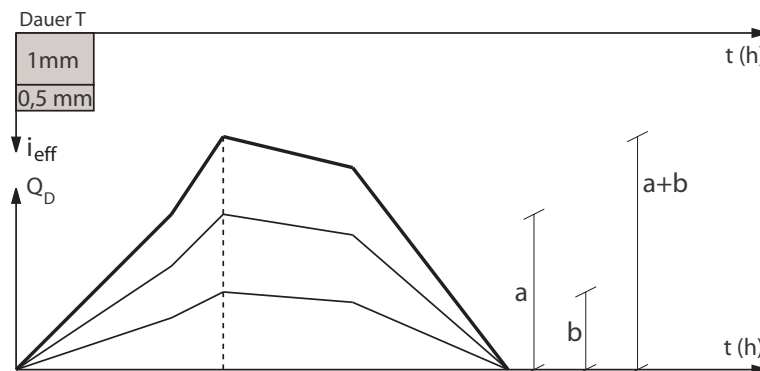
### 5.7.2 Einheitsganglinienverfahren

---

Das Einheitsganglinienverfahren dient zur Übertragung einer effektiven Niederschlagsganglinie in eine Direktabflussganglinie. Es wurde bereits 1947 von Sherman entwickelt und wird weiterhin häufig angewendet. Die wesentliche Annahme beinhaltet, dass ein Einheitsniederschlagsereignis (auch Einheitsimpuls) zu einer Einheitsganglinie (auch Impulsantwortfunktion) führt.

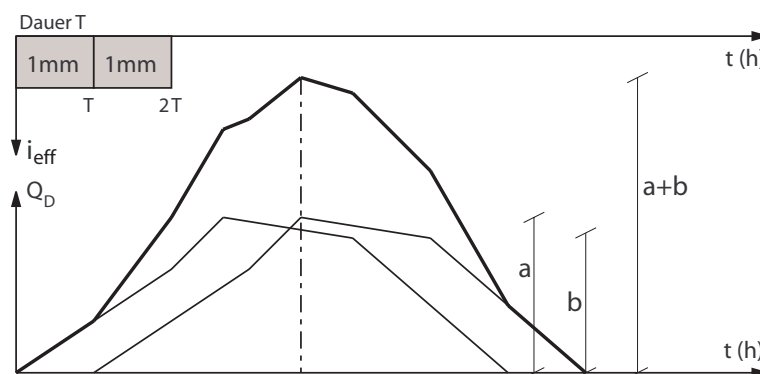
Die weiteren Annahmen sind:

- Der effektive Niederschlag fällt gleichmäßig verteilt über das Einzugsgebiet.
- Tritt in einem Zeitschritt ein Vielfaches des Niederschlagsimpulses auf, so resultiert daraus das Vielfache der Einheitganglinie (Prinzip der Linearität, siehe Abbildung 5.9).



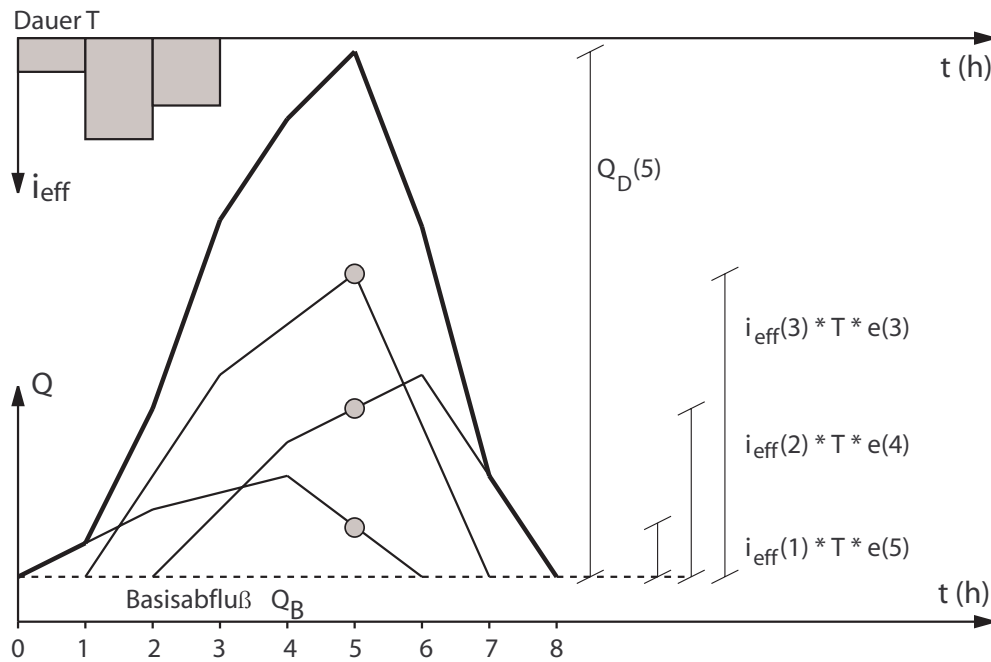
**Abbildung 5.9:** Linearitätsprinzip

- Treten in zwei Zeitschritten hintereinander Niederschlagsimpulse auf, so werden sowohl diese Impulse als auch die resultierenden Impulsantworten als unabhängig voneinander betrachtet und dürfen addiert werden (Prinzip der Superposition, siehe Abbildung 5.10).



**Abbildung 5.10:** Superpositionsprinzip

Wegen der beschriebenen Translations- und Retentionseinflüsse verteilt sich der Niederschlags-einfluss über eine längere Zeitdauer. Stellt man sich vor, dass genau 1 mm Effektivniederschlag pro Dauer T über einer Einzugsgebietsfläche fällt, so entspräche der gemessene Abfluss der Einheitganglinie, multipliziert mit dem Niederschlag (siehe Abbildung 5.11).



**Abbildung 5.11:** Berechnung der Abflussganglinie mit Hilfe der Einheitsganglinie  $e(T, t)$

Das resultierende Gleichungssystem wird für Abbildung 5.11 zu:

$$Q_D(1) = i_{eff}(1) \cdot T \cdot e(1) \quad (5.12)$$

$$Q_D(2) = i_{eff}(1) \cdot T \cdot e(2) + i_{eff}(2) \cdot T \cdot e(1) \quad (5.13)$$

$$Q_D(3) = i_{eff}(1) \cdot T \cdot e(3) + i_{eff}(2) \cdot T \cdot e(2) + i_{eff}(3) \cdot T \cdot e(1) \quad (5.14)$$

$$Q_D(4) = i_{eff}(1) \cdot T \cdot e(4) + i_{eff}(2) \cdot T \cdot e(3) + i_{eff}(3) \cdot T \cdot e(2) \quad (5.15)$$

$$Q_D(5) = i_{eff}(1) \cdot T \cdot e(5) + i_{eff}(2) \cdot T \cdot e(4) + i_{eff}(3) \cdot T \cdot e(3) \quad (5.16)$$

$$Q_D(6) = i_{eff}(2) \cdot T \cdot e(5) + i_{eff}(3) \cdot T \cdot e(4) \quad (5.17)$$

$$Q_D(7) = i_{eff}(3) \cdot T \cdot e(5) \quad (5.18)$$

Um den Gesamtabfluss zu berechnen, ist der Basisabfluss hinzuzuaddieren.

Die Einheitsganglinie lässt sich aus diesem Gleichungssystem ermitteln. Nach Belastungsaufteilung und Ganglinienseparation liegen zeitsimultane effektive Niederschlagswerte und Direktabflusswerte vor. Setzt man diese in das Gleichungssystem ein, so können die Ordinaten der Einheitsganglinie sukzessive, beginnend mit der ersten Gleichung bestimmt werden. Hier soll angenommen werden, dass das Gleichungssystem bestimmt ist. In der Praxis müssen die Ordinaten so bestimmt werden, dass die Abweichungen zwischen der mit der Einheitsganglinie

bestimmten Abflussganglinie und der gemessenen Ganglinie minimal werden (z.B. Minimum der Summe der Fehlerquadrate).

$$e(1) = \frac{Q_D(1)}{i_{eff}(1) \cdot T} \quad (5.19)$$

$$e(2) = \frac{Q_D(2) - i_{eff}(2) \cdot e(1) \cdot T}{i_{eff}(1) \cdot T} \quad (5.20)$$

$$\cdot = \dots \quad (5.21)$$

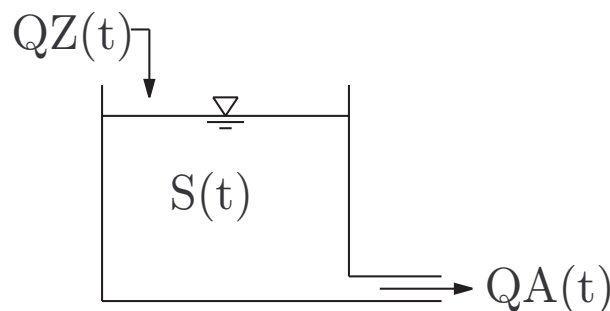
$$\cdot = \dots \quad (5.22)$$

$$\cdot = \dots \quad (5.23)$$

Die so ermittelte Einheitsganglinie kann nun mit extremen historischen oder synthetischen Niederschlagsereignissen belastet werden, um damit extreme Abflussereignisse zu berechnen.

### 5.7.3 Einzellinearspeicherverfahren

Wie bereits früher erläutert, werden in der Hydrologie sehr häufig lineare Modellansätze verwendet. Dabei finden u.a. der Einzellinearspeicher und daraus zusammengesetzte komplexere Modelle Anwendung.



**Abbildung 5.12:** Das Prinzip des Einzellinearspeichers

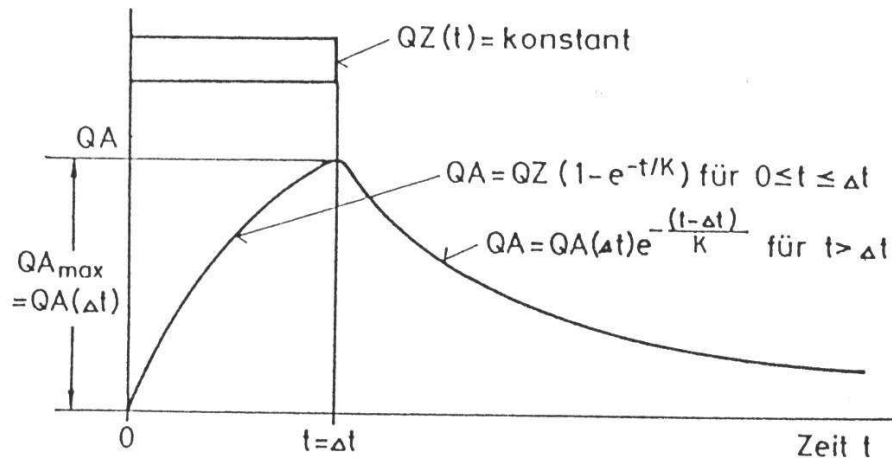
Die Lösung für den Einzellinearspeicheransatz ist bereits in Kapitel 5.2 kurz erläutert worden. Abbildung 5.12 erläutert das Prinzip des Einzellinearspeichers. Der Abfluss aus dem Speicher ist stets proportional zum Speicherinhalt ( $S = k \cdot QA$ ). Der Faktor  $k$  wird als Speicherkonstante bezeichnet und ist ein Maß für die Verweilzeit des Wassers im Speicher (Retention). Die Speicherkonstante beschreibt sozusagen, wie schnell sich der Speicher entleert.

Zur Berechnung des Abflusses aus einem Speicher wird oftmals die gebietscharakteristische Übertragungsfunktion  $u(T, t)$  genutzt. Diese ergibt sich aus der Lösung der DGL für den Einzellinearspeicher. Für einen Einheitsimpuls  $QZ$  gilt

$$u(T, t) = \begin{cases} 1/T \cdot (1 - e^{-t/k}) & \text{aufsteigender Ast } (t \leq T), \\ 1/T \cdot (1 - e^{-T/k}) \cdot e^{-(t-T)/k} & \text{abfallender Ast } (t \geq T). \end{cases} \quad (5.24)$$

Der Direktabfluss  $Q_D$  ergibt sich damit zu

$$Q_D(t) = QA(t) = i_{eff} \cdot T \cdot u(t, T) \cdot A_E \quad (5.25)$$



**Abbildung 5.13:** Abflussganglinie aus einem Einzellinearspeicher [5]

Abbildung 5.13 zeigt exemplarisch die Abflussganglinie aus einem Einzellinearspeicher bei konstantem Zufluss  $QZ$  über ein Zeitintervall der Dauer  $T = \Delta t$ .

Wie die Retentionseigenschaften des jeweiligen Einzugsgebietes sind, lässt sich anhand des abfallenden Astes der Direktabflussganglinie ermitteln. Zeichnet man den abfallenden Ast der Direktabflussganglinie im logarithmischen Maßstab, so ergibt sich in den meisten Fällen in der Tat ein stückweise linearer Verlauf, was auf eine zutreffende Annahme hindeutet. Die Retentionskonstante  $k$  lässt sich aus Messungen durch Auflösung folgender Gleichung leicht bestimmen.

$$k = \frac{-(t - t_0)}{\ln \frac{Q_D(t)}{Q_D(t_0)}} \quad (5.26)$$

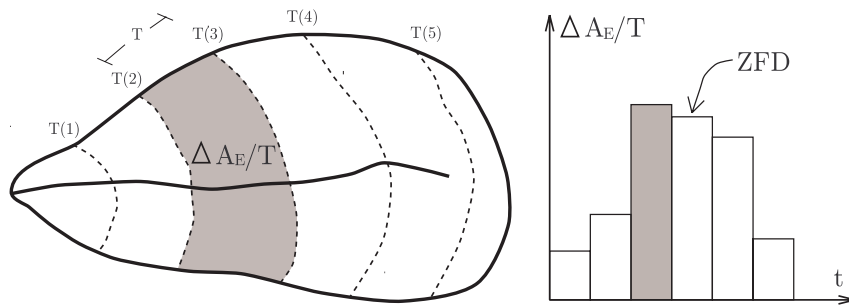
Dazu ist in dem abfallenden Ast der Direktabflussganglinie ein geeigneter Abschnitt zwischen  $t_0$  und  $t$  auszuwählen, für den die Linearität sichtbar ist.

#### 5.7.4 Isochronenverfahren

Beim Isochronenverfahren wird jedem Punkt im Einzugsgebiet eine Lauf- oder Translationszeit zugeordnet, welche der Zeit entspricht, die ein Wasserteilchen benötigt, um von diesem Punkt bis zum Gebietsauslass zu gelangen. Verbindet man Linien gleicher Fließzeit, so ergeben sich sogenannte Isochronen.

Ein Blockregen mit konstanter Intensität  $i_{eff}$  [mm/T] über die Dauer  $T$  führt im Einzugsgebiet der Größe  $A_E$  zu einem einheitlichen Abflusshöhe  $h_{eff}$ . Dann fließt das Niederschlagsvolumen  $\Delta A_E \cdot h_{eff}$  im Zeitintervall  $T_2$  bis  $T_3$  durch den Gebietsauslass (hierzu siehe Abbildung 5.14).

Die Zeitflächenfunktion ist eine Übertragungsfunktion, die direkt auf das entsprechende Gebiet bezogen ist. Es gilt  $ZFD = u(t, T) \cdot A_E$ . Der Direktabfluss aus dem Gebiet berechnet sich somit, analog zum Einzellinearspeicher, nach Gleichung 5.25.



**Abbildung 5.14:** Einzugsgebiet mit Isochronen und abgeleitetes Zeitflächendiagramm (ZFD)

## 5.8 Abflusstransformation

### 5.8.1 Grundlagen

Obwohl die Abflussvorgänge in Flüssen vorwiegend in eindimensionaler Richtung verlaufen, werden die Prozesse stark durch Energie- und Massentransport quer zur Hauptfließrichtung beeinflusst. Vorländer tragen im Allgemeinen wenig zum Transport, jedoch erheblich zur Speicherung bei. Die genaueste Erfassung des instationären Abflussvorgangs erfolgt durch den Ansatz der hydrodynamischen Grundgleichungen (St.Venant'schen-Gleichungen). Diese sind aber bezüglich der erforderlichen Informationen über die Gerinnegeometrie und wegen des erheblichen numerischen Aufwands bei der näherungsweise Lösung der Gleichungen für die großskalige hydrologische Modellierung wenig geeignet. Aus diesem Grund werden in der Hydrologie bevorzugt einfache Verfahren auf der Grundlage der Kontinuitäts- oder Massenbilanzgleichung angewendet.

Hydrologische Verfahren nutzen einen Sonderfall der instationären Gerinneströmung: die Seeretention. Dadurch sind hydrologische Berechnungsansätze auf die Kontinuitätsgleichung reduziert, was den Rechengang einfach und den Rechenaufwand gering hält.

$$\frac{dV}{dt} = Q_Z(t) - Q_A(t) \quad (5.27)$$

Der Abfluss  $Q_A$  aus Seen und Speichern ist im Allgemeinen klein im Vergleich zur Speicherkapazität  $V$ . Zusätzlich besteht die Möglichkeit, den Abfluss zu beeinflussen, d.h. zu regeln. Im Falle einer ungesteuerten Abgabe aus dem Speicher durch eine kleine Öffnung ist der Abfluss eine Funktion der Wurzel des Wasserstandes  $h$  (Formel nach Toricelli, siehe Hydraulik).

Da  $V(h)$  eine nicht-lineare Funktion ist, ist auch die Funktion  $Q_A(V)$  nicht-linear. Nur für wenige Sonderfälle ergibt sich eine analytische Lösung der Speichergleichung. Eine traditionelle Lösung ist die iterative Bestimmung von  $V$  und  $Q_A$  so, dass sie gegen einen gemeinsamen Wasserstand  $h$  konvergieren. Eine effiziente Alternative zur iterativen Berechnung ist das modifizierte Puls-Verfahren, bei dem ein bereichsweise linearer Zusammenhang zwischen  $Q_A$  und  $V$  hergestellt wird. Das Verfahren kann für die Beschreibung der Seeretention verwendet werden.

Eine Berechnungsmethode für die Wellenverformung in Flussschläuchen bietet das Muskingum-Verfahren, benannt nach einem Nebenfluss des Ohio.

## 5.8.2 Modifiziertes Puls-Verfahren

Der bereichsweise lineare Zusammenhang zwischen  $V$  und  $Q_A$  wird durch eine Diskretisierung der Speichergleichung erzielt.

$$\frac{V_2 - V_1}{\Delta t} = \frac{Q_{Z1} + Q_{Z2}}{2} - \frac{Q_{A1} + Q_{A2}}{2} \quad (5.28)$$

Unbekannt in Gleichung 5.28 sind  $V_2$  und  $Q_{A2}$ . Das Volumen  $V_1$  ist aus der Anfangsbedingungen bekannt. Ist der Abfluss aus dem Speicher zunächst stationär, so gilt  $Q_{A1} \cong Q_{Z2}$ .

Formt man die Gleichung so um, dass die bekannten Größen auf der rechten und die unbekanntenen Größen auf der linken Seite stehen, so erhält man

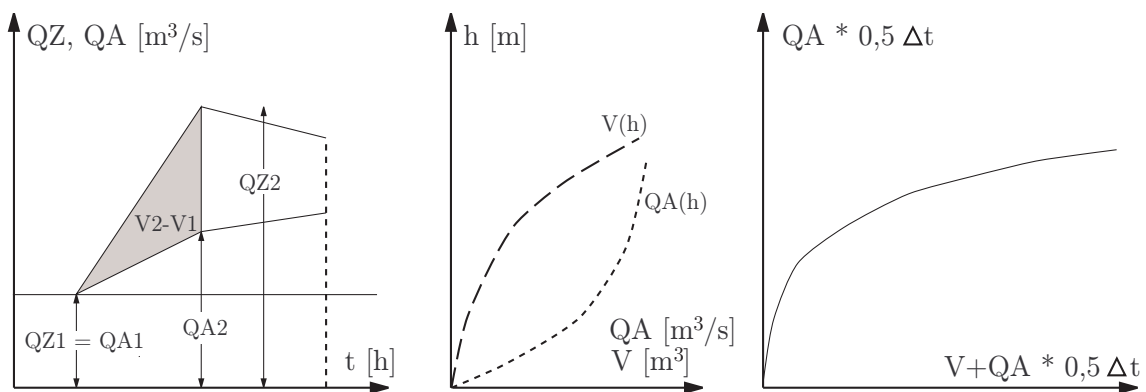
$$V_2 + \frac{Q_{A2} \cdot \Delta t}{2} = \frac{(Q_{Z1} + Q_{Z2} - Q_{A1}) \cdot \Delta t}{2} + V_1 \quad (5.29)$$

Wie aus Abbildung 5.15 (Mitte) ersichtlich ist, gibt es zu jedem Speichervolumen  $V$  einen korrespondierenden Abfluss  $Q_A$ , d.h. der Speicherinhalt und der Abfluss sind über die Speicherinhaltslinie und die Abflusskurve eindeutig miteinander verknüpft. Das Problem ist über diese Beziehung  $Q_A(V)$  zu lösen.

Für das gewählte Zeitintervall  $\Delta t$  können zwei Funktionen aufgestellt werden (für korrespondierende Wasserstände  $h$ ), welche  $Q_A$  und  $V$  miteinander verknüpfen.

$$\frac{Q_{A2} \cdot \Delta t}{2} \quad \text{und} \quad V_2 + \frac{Q_{A2} \cdot \Delta t}{2} \quad (5.30)$$

Die beiden ermittelten Hilfsfunktionen werden entsprechend Abbildung 5.15 (rechts) gegeneinander aufgetragen.



**Abbildung 5.15:** Modifiziertes Puls-Verfahren

Die rechte Seite von Gleichung 5.29 kann für den ersten Zeitschritt berechnet werden. Mit der entsprechenden linken Seite kann dann im Diagramm in Abbildung 5.15 (rechts)  $Q_{A2}$  graphisch oder numerisch eindeutig bestimmt werden. Mit  $Q_{A2}$  wird dann der Endspeicherinhalt  $V_2$  berechnet. Die Endzustände werden dann zu Anfangszuständen im nächsten Zeitschritt.

### 5.8.3 Muskingum-Verfahren

Das Muskingum-Verfahren ist ein erweiterter linearer Speicheransatz. Neben dem bekannten linearen Zusammenhang zwischen Speicherung und Abfluss wird auch die Differenz zwischen Zu- und Abfluss gewichtet berücksichtigt (siehe auch Abbildung 5.16).

Für das Verfahren gilt folgende Arbeitsgleichung.

$$S(t) = k \cdot Q_A(t) + k \cdot X \cdot (Q_Z(t) - Q_A(t)) \quad (5.31)$$

Die Speicherkonstante  $k$  und der dimensionslose Formbeiwert  $X$  müssen über den Vergleich der Berechnungen mit gemessenen Wellenverformungen bestimmt werden.

Der Parameter  $X$  liegt für natürliche Abflussverhältnisse zwischen 0 und 0,5. Wenn  $X = 0$ , dann entspricht das Muskingum-Verfahren dem des Einzellinearspeichers. Wenn  $X$  den Wert 0,5 annimmt, dann wird eine reine Translation der Hochwasserwelle erzeugt.

Nach Einsetzen von Gleichung 5.31 in die Speichergleichung und anschließender Umformung folgt die Arbeitsgleichung des Muskingum-Verfahrens.

$$Q_A(t + \Delta t) = Q_A(t) + C_1 \cdot (Q_Z(t) - Q_A(t)) + C_2 \cdot (Q_Z(t + \Delta t) - Q_Z(t)) \quad (5.32)$$

mit

$$C_1 = \frac{\Delta t}{k(1-X) + 0,5 \cdot \Delta t} \quad \text{und} \quad C_2 = \frac{0,5 \cdot \Delta t - k \cdot X}{k(1-X) + 0,5 \cdot \Delta t}$$

Die Parameter  $k$  und  $X$  werden aus gemessenen Zufluss- und Abflussganglinie ermittelt. Dazu steht ein halbgraphisches, iteratives Verfahren zur Verfügung. Zunächst wird Gleichung 5.32 nach  $k$  aufgelöst.

$$k = \frac{0,5 \cdot \Delta t \cdot ((Q_Z(t + \Delta t) + Q_Z(t)) - (Q_A(t + \Delta t) + Q_A(t)))}{X \cdot (Q_Z(t + \Delta t) - Q_Z(t)) + (1 - X) \cdot (Q_A(t + \Delta t) - Q_A(t))} \quad (5.33)$$

Dann werden für mehrere geschätzte Formbeiwerte  $X$  der Zähler und Nenner von Gleichung 5.33 ausgerechnet, jeweils aufsummiert und graphisch gegeneinander aufgetragen. Für unterschiedliche  $X$  erhält man unterschiedliche Schleifen (siehe Abbildung 5.17).

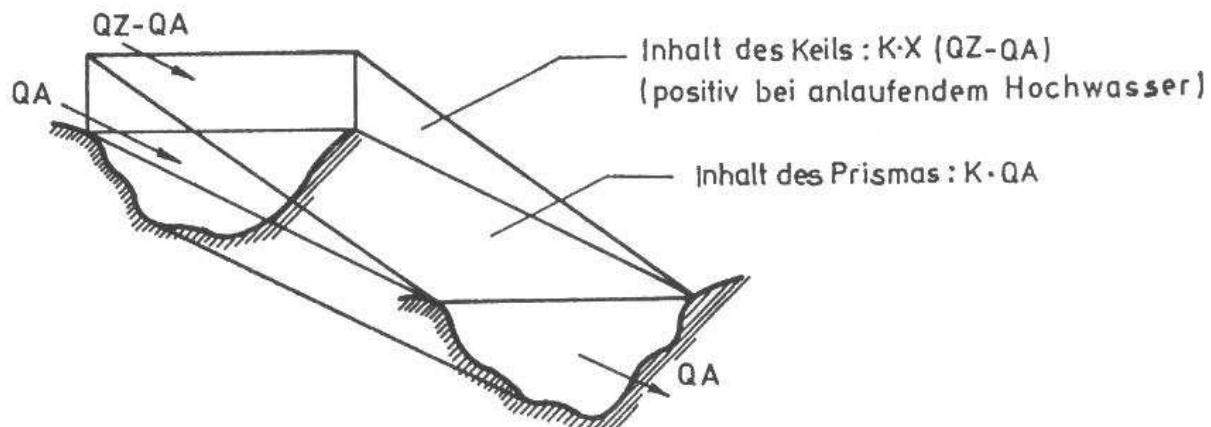
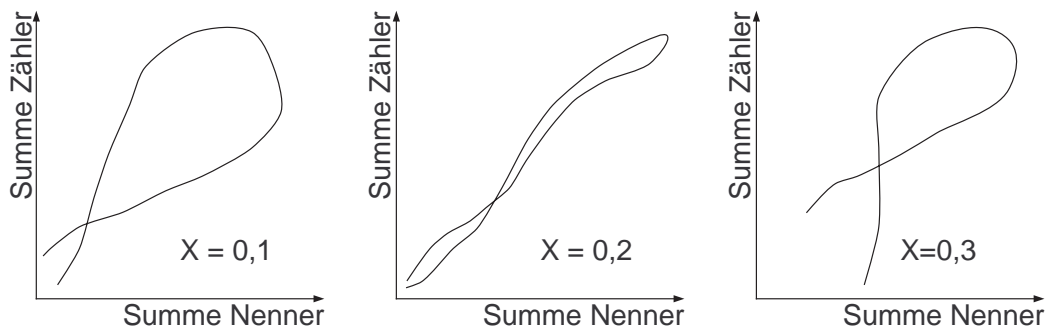


Abbildung 5.16: Das Muskingum-Verfahren [5]





**Abbildung 5.17:** Graphische Ermittlung der Parameter  $X$  und  $k$  beim Muskingum-Verfahren

Zur Ermittlung des maßgeblichen Formbeiwerts  $X$  wird diejenige Schleife ausgewählt, bei der aufsteigender und abfallender Ast am dichtesten zusammenliegen. Die mittlere Steigung der ausgewählten Schleife entspricht der Speicherkonstanten  $k$ . Die so ermittelten Parameter  $k$  und  $X$  können nicht auf andere Flussabschnitte übertragen werden, und sind somit nur für den untersuchten Flussabschnitt zwischen gemessener Zulauf- zu gemessener Abflussganglinie gültig.

Für die Parameter  $k$  und  $X$  gelten einige Einschränkungen:

- Für die Speicherkonstante gilt:  $k \geq \Delta t$ ). Dies ist erforderlich um die Ordinaten der Abflussganglinie hinreichend genau zu erfassen.
- Damit bei der Abflussberechnung keine Werte geringer als der stationäre Abfluss herauskommen, müssen die Parameter  $C_1$  und  $C_2 \geq 0$  sein. Dies kann über die Bedingung  $X \leq \Delta t / (2 \cdot k)$  eingehalten werden.

Nach Bestimmung von  $k$  und  $X$  für einen Gerinneabschnitt kann jedwede Zuflussganglinie in die entsprechende Abflussganglinie transformiert werden. Es ist darauf zu achten, dass zwischen Zuflusspegel und Abflusspegel keine maßgeblichen seitlichen Zuflüsse vorherrschen, da ansonsten die Kontinuitätsgleichung nicht gewahrt ist.

## 5.9 Komplexe Modelle

Für bestimmte Bereiche des Bauingenieurwesens waren und sind Teilmodelle für die separate Abbildung des Hochwasserabflussgeschehens ausreichend. Immer häufiger wird es jedoch erforderlich, die verschiedenen Komponenten der Wasserbilanz im Zusammenhang zu sehen. So ist z.B. für die gesicherte Beurteilung von Maßnahmen zur Rückführung von Naturgewässern in einen naturnahen Zustand nicht der Spitzenabfluss allein, sondern der Gesamtverlauf des Abflusses von Bedeutung. Auch im Rahmen von Umweltverträglichkeitsuntersuchungen sind komplexe Betrachtungsweisen unabdingbar. Als weiteres Beispiel sei die Beeinflussung der Grundwasserträger durch Siedlungsmaßnahmen und Entnahmen im Verhältnis zur natürlichen Grundwasserneubildung zu nennen. Wie bereits früher angedeutet, ist für die Gesamtbilanz die Kenntnis der Beziehungen zwischen Energie- und Wasserhaushalt wesentlich.

Um den hydrologischen Kreislauf umfassend darstellen zu können, müssen einzelne hydrologische Verfahren zu komplexen Modellen zusammengefasst werden. Dazu müssen einzelne Teilmodelle (Interzeption, Schneeakkumulation, -setzung und schmelze, Abflussbildung,

---

-konzentration und -transformation, Bodenspeicher, Grundwasser usw. ) zu einem Gesamtmodell zusammengefügt werden. Die Struktur eines komplexen Modells ist beispielhaft in Abbildung 5.18 dargestellt.

Es gibt zahlreiche unterschiedliche Herangehensweisen zur Erstellung eines komplexen hydrologischen Modells. Einige werden im Rahmen der Vorlesung Ingenieurhydrologie II näher erläutert.

Auch weitere Teilmodelle z.B. zur Berechnung der potentiellen und aktuellen Verdunstung können im Rahmen dieser Vorlesung nicht näher beschrieben werden. Die Behandlung der Ansätze von Penman und Haude erfolgt deshalb in Ingenieurhydrologie II. Weitergehende Verfahren, insbesondere die Berechnung der aktuellen Verdunstung über die Bodenfeuchte werden in den Vertiefungsveranstaltungen besprochen.

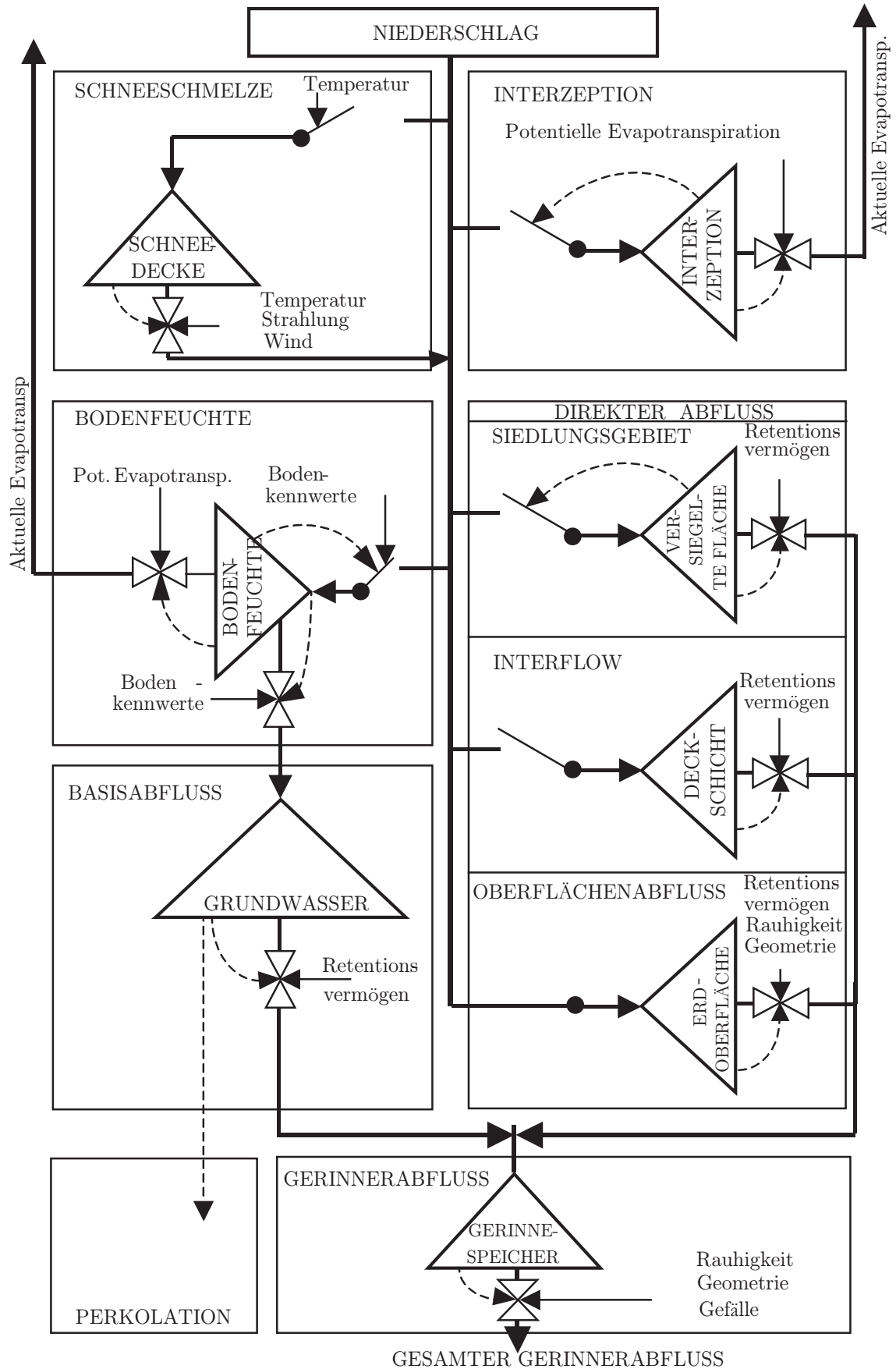


Abbildung 5.18: Struktur eines komplexen Wasserbilanzmodells



---

## 6 Statistische Auswertungen

---

Messgrößen werden in der Hydrologie zunächst einer Datenprüfung unterzogen. Die Prüfung bezieht sich auf Konsistenz und Homogenität. Daten sind konsistent, wenn sie nicht durch Messfehler verfälscht sind (Gerätefehler, Gerätewechsel, Ablesefehler, Personalwechsel etc.). Daten sind homogen, wenn sich das durch die Messungen beschriebene hydrologische System in der Zeit nicht wesentlich verändert hat. Die geprüften Zeitreihen werden einer statistischen Analyse unterzogen, wobei in Primärstatistik (statistische Momente) und Häufigkeitsanalysen unterschieden wird. Die Extrapolation der durch kontinuierliche mathematische Funktionen angeglichenen empirischen Häufigkeitsverteilungen wird mit Extremwertanalyse bezeichnet.

---

### 6.1 Konsistenz und Homogenität

---

Messfehler werden in systematische und zufällige Fehler unterschieden. Systematische Fehler führen zu einer immer gleichgerichteten Verfälschung des Messwertes (konstant oder proportional). Sie sind meistens mit dem gewählten Messprinzip verbunden. Zufällige Fehler sind durch momentane Einflüsse und menschliches Versagen (Ablesung, Übertragung) bedingt. Grobe Fehler können durch subjektive Prüfung auf Plausibilität erkannt und korrigiert werden. Geringe zufällige Fehler können kaum identifiziert werden. Systematische Fehler können durch Überprüfung der Datengewinnung selbst erkannt werden. Ihre Korrektur kann durch Verfeinerung des Messprinzips oder die systematische Veränderung der Messdaten bewirkt werden. Eindeutig falsche, aber nicht korrigierbare Daten müssen ausgesondert werden. Wesentliche Fehler im Bereich der Hydrologie entstehen durch die unzureichende Bestimmung der Wasserstandsabflussbeziehung im Niedrig- und Hochwasserbereich. Eine andere beachtliche Fehlerquelle ist die systematische Mindermessung des Niederschlags durch Verdunstungs- und Spritzwasserverluste, die je nach Jahreszeit und Gerätetyp bis zu 10 % betragen können.

Vor der weiteren Verarbeitung sollten hydrologische Daten immer einer visuellen Überprüfung unterzogen werden. Dabei können bereits grobe Fehler und Übertragungsfehler bei der Digitalisierung von Messaufschriften und handgeschriebenen Tabellen gefunden und korrigiert werden. Sind die Daten benachbarter Stationen gleichzeitig verfügbar, empfiehlt sich eine gleichzeitige graphische Darstellung, da sich regional im Allgemeinen Ähnlichkeiten einstellen.

Erst, wenn alle Möglichkeiten zur Korrektur von Inkonsistenzen ausgeschöpft sind, sollten statistische Tests (im Gegensatz zur hydrologischen Prüfung der Messungen) zur Prüfung der Homogenität durchgeführt werden.

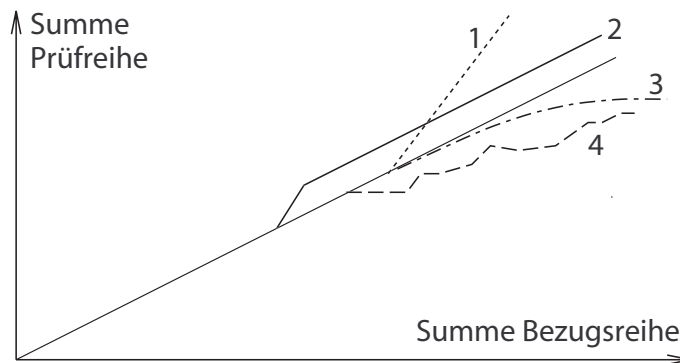
---

#### 6.1.1 Doppelsummenanalyse

---

Zur Prüfung der Homogenität sind mehrere hydrologische Tests möglich. Eine der bekanntesten und einfachsten Verfahren ist die Doppelsummenanalyse. Dabei wird eine zeitlich fortlaufend aufsummierte zu prüfende Zeitreihe einer ebenso aufsummierten Bezugszeitreihe graphisch gegenübergestellt. Die Bezugszeitreihe muss selbst konsistent und homogen sein und mit der zu prüfenden Zeitreihe eng genug korrelieren (lineare Beziehung). Sind diese Voraussetzungen erfüllt, so stellt sich die Doppelsummenfunktion als Gerade dar, wie in Abbildung 6.1 dargestellt.

Jede signifikante Abweichung von dieser Geraden deutet auf eine Inhomogenität der Prüfzeitreihe hin.



**Abbildung 6.1:** Doppelsummenanalyse

Die Beeinflussung durch einen linearen Knick (1) deutet auf eine einmalige bleibende Beeinflussung hin, die durch einen Sprung (2) auf eine einmalige Beeinflussung. Ein linearer Trend (3) zeigt eine graduierlich zunehmende Beeinflussung an, während eine kontinuierliche willkürliche Beeinflussung (4), z.B. durch den Bau und die Steuerung eines Speichers keine Systematik mehr erkennen lässt. Die Doppelsumme ist jedoch nicht nur bei der Homogenitätsprüfung, sondern auch bei der Konsistenzprüfung ein hilfreiches Verfahren.

## 6.2 Statistische Analyse einer Einzelreihe

Die beobachteten Glieder der Wasserbilanzgleichung ( $N, A, V, S$ ) lassen sich in jeder zeitlichen Auflösung als Ganglinien darstellen, die statistisch analysiert werden können. Es ist generell üblich, auch kontinuierliche Ganglinien zu diskretisieren (5 Minutenmittel, Stunden- und Tagesmittel bzw. -summen). Für diese diskreten Zeitreihen werden die statistischen Momente (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe und Wölbung) berechnet.

Diese Werte werden klassiert und für die Klassen die jeweiligen Häufigkeiten berechnet. Eine äußerst wichtige Darstellungsform von Häufigkeiten ist die ranggeordnete Häufigkeitsverteilung, die sogenannte Dauerlinie. Die Ableitung der Dauerlinie aus der Ganglinie ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Sie wird im Wesentlichen für Wasserstände und Abflüsse ermittelt.

Eine hilfreiche Quelle für hydrologische Daten sind die Gewässerkundlichen Jahrbücher. In ihnen sind wesentliche Daten repräsentativer Messstellen aufgeführt und ersten Auswertungen unterzogen. Die meisten Auswertungen sind in Tabellenform gegeben, untergliedert in Tageswerte, Hauptwerte, Dauerwerte und Extremwerte.

Abbildung 6.3 zeigt für eine Reihe von Messstellen die Hauptwerte MHQ, MQ und MNQ. Diese Darstellung wird hydrologischer Längsschnitt genannt.

Die Hydrologie muss die zur Planung und zum Betrieb wasserbaulicher Anlagen und wasserwirtschaftlicher Systeme erforderlichen Bemessungsdaten liefern. Naturgemäß werden diese Anlagen und Systeme häufig für extreme Situationen des Wasserhaushalts ausgelegt. Daher ist in der Analyse hydrologischer Zusammenhänge auf der Basis der vorliegenden Stichprobe von zumeist wenigen Dekaden auf die Erwartungswerte seltener Ereignisse zu schließen.

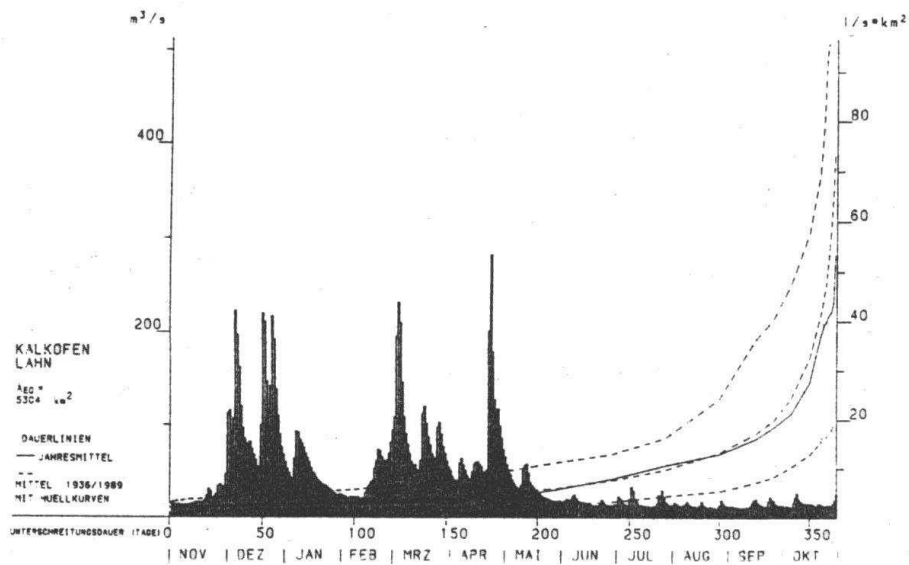


Abbildung 6.2: Abflussganglinie und Dauerlinie [1]

Die Häufigkeit eines Bemessungsereignisses wird beschrieben durch das Wiederkehrintervall  $T_n$ .  $T_n$  ist die Zeitspanne, in der der Erwartungswert einer Bemessungsgröße, z.B. der Hochwasserabfluss, im langjährigen statistischen Mittel erreicht oder überschritten wird.

**Beispiele:**

- Bemessung von Kanalnetzen für ein 1-jährliches, 15 Minuten dauerndes Niederschlagsereignis
- Bemessung einer Hochwasserentlastung eines Speichers für ein 500-jährliches Hochwasserabflussereignis

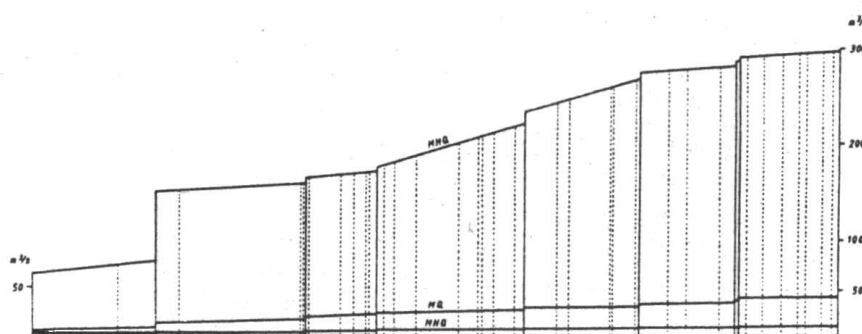


Abbildung 6.3: Hydrologischer Längsschnitt der Lahn [1]

Es muss betont werden, dass es sich bei dem Wiederkehrintervall um ein statistisches Mittel handelt, d.h. das entsprechende Ereignis tritt in der Realität in sehr unregelmäßigen zeitlichen Abständen auf.

Um zu einer Abschätzung der Extremwerte zu kommen, wird aus der Stichprobe eine Serie von gemessenen Extremwerten entnommen. Es wird in jährliche Serien und partielle Serien unterschieden.

- Jährliche Serie: Verwendung der pro Jahr jeweils höchsten Werte aus  $n$  Jahren
- Partielle Serie: Verwendung der  $i$  höchsten Werte aus Gesamtzeitraum von  $n$  Jahren ( $i \geq n$ )

### 6.2.1 Plotting-Positions-Verfahren

Eine erste Abschätzung der Jährlichkeit beobachteter Höchstwerte kann über die Berechnung der empirischen Wahrscheinlichkeit nach dem Plotting-Position-Verfahren erfolgen. Dazu werden die  $n$  Werte der Größe (dem Rang nach) sortiert. Der größte Wert erhält den Rang  $m = 1$ , der zweitgrößte  $m = 2$ , u.s.w.. Die empirische Überschreitungswahrscheinlichkeit  $P_{UE}$  berechnet sich zu

$$P_{UE} = \frac{m}{n + 1} \quad (6.1)$$

Für die Werte der Stichprobe gilt damit  $0 < P_{UE} < 1$ , d.h. keinem Wert der Stichprobe wird die Überschreitungswahrscheinlichkeit 1 (nie unterschreitbar) oder 0 (nie überschreitbar) zugeordnet.

Die empirische Unterschreitungswahrscheinlichkeit  $P_U$  berechnet sich aus

$$P_U = 1 - P_{UE} \quad (6.2)$$

#### Beispiel:

Das höchste beobachtete Ereignis einer jährlichen Serie von 10 Jahren erhält demnach die Überschreitungswahrscheinlichkeit  $P_{UE} = 1/11 = 0,091$ . Mit  $T_n = 1/P_{UE}$  wird das Wiederkehrintervall zu 11 Jahren ermittelt (hierzu siehe auch Tabelle 6.1).

Jahr	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
HQ	200	301	209	330	250	290	205	304	266	288
Rang	10	3	8	1	7	4	9	2	6	5
$P_{UE}$		0,273		0,091				0,182		0,455
$T_n$		3,7		11				5,5		2,2

**Tabelle 6.1:** Bestimmung des Wiederkehrintervalls  $T_n$

### 6.2.2 Statistische Parameter

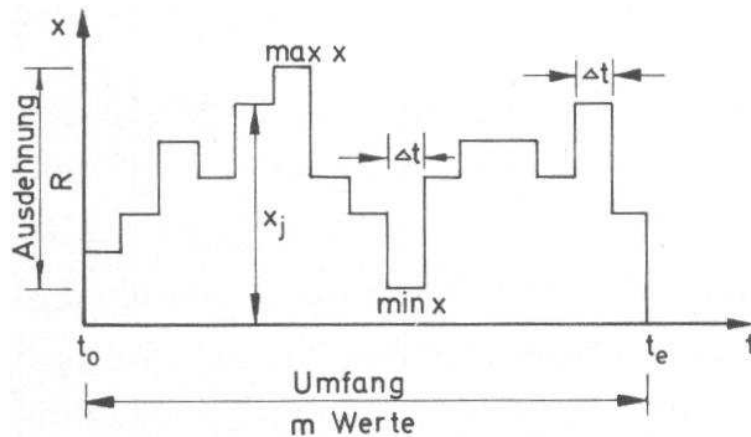
Im Allgemeinen wird eine Stichprobe einer weitergehenden statistischen Analyse unterzogen. Dazu werden zunächst einige statistische Parameter für die Stichprobe ermittelt.

Als Umfang einer Zeitreihe wird die Zeitspanne  $n \cdot \Delta t = t_e - t_0$  bezeichnet. Die Ausdehnung bzw. Variationsbreite  $R$  einer Zeitreihe beschreibt die Spanne vom kleinsten bis zum größten  $x_i$ -Wert. Hierzu siehe auch Abbildung 6.4.

Das mittlere Verhalten wird durch das arithmetische Mittel (Mittelwert)  $\bar{x}$  beschrieben.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (6.3)$$



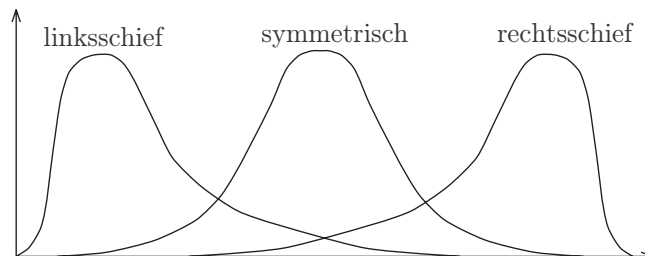


**Abbildung 6.4:** Zeitreihe einer diskreten statistischen Variablen [6]

Die Varianz oder Streuung einer Stichprobe  $s^2$  ist die Summe der Abweichungsquadrate der einzelnen Stichprobenelemente von ihrem arithmetischen Mittel, dividiert durch die um 1 verminderte Anzahl der Elemente. Die Wurzel aus der Varianz ist die Standardabweichung der Stichprobe  $s$ .

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6.4)$$

Mit der Schiefe  $a$  wird die Abweichung der Verteilung der Werte von einer symmetrischen Verteilung bewertet:  $a > 0$ : linksschief;  $a < 0$ : rechtsschief (siehe Abbildung 6.5).



**Abbildung 6.5:** Formen von Verteilungsfunktionen

### 6.2.3 Häufigkeitsanalyse und Verteilungsfunktion

Um zu Häufigkeitsaussagen zu kommen, wird die Stichprobe in eine ganzzahlige Anzahl  $k$  von Intervallen (Klassen) gleicher Größe  $\Delta x$  unterteilt. Als eine Schätzformel für die notwendige Anzahl von Klassen in Abhängigkeit der vorhandenen Werte  $n$  gilt  $k = 1 + 3,3 \cdot \log n$ . Die Klassenanzahl sollte jedoch in jedem Fall  $k \geq 5$  sein. Jede Klasse wird durch den  $x$ -Wert in der Klassenmitte gekennzeichnet. Werte, die sich am unteren Rand einer Klasse befinden, zählen zu dieser Klasse.

Die Anzahl der Werte je Klasse wird als absolute Häufigkeit bezeichnet. Trägt man die absoluten Häufigkeiten über  $x$  auf, so ergibt sich die Häufigkeitsverteilung.



---

Der Zentralwert oder Median  $\tilde{x}$  bestimmt sich als der  $x$ -Wert mit gleicher Unter- wie Überschreitungshäufigkeit bzw. gleicher Unter- wie Überschreitungsdauer. Er kann aus der Summenhäufigkeitslinie bei  $SU(x) = SO(x) = 0,5$  abgelesen werden.

Der Normalwert oder Modalwert  $\hat{x}$  ist der häufigste Wert einer Stichprobe, d.h. er beschreibt die Lage des Scheitelpunktes einer Häufigkeitsverteilung oder Häufigkeitsdichte. Es zählt der Wert der Klassenmitte.

Um von der zumeist recht begrenzten Stichprobe auf lange Wiederkehrintervalle schließen zu können, wird die klassierte Häufigkeitsverteilung durch kontinuierliche mathematische Dichtefunktionen verschiedenen Typs angenähert. Diese lassen sich dann in den Bereich geringer Wahrscheinlichkeiten (lange Wiederkehrintervalle) extrapolieren.

Für die praktische Anwendung hat der DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.) für extreme Niedrig- und Hochwasserereignisse entsprechende Richtlinien entwickelt. Der prinzipielle Ablauf der Berechnungen wird im Folgenden erläutert.

### Beispiel:

Hochwasserwahrscheinlichkeit nach der PEARSON III Verteilungsfunktion. Ablauf zur Berechnung extremer hydrologischer Merkmale:

1. Berechnung der für die Verteilungsfunktion erforderlichen Parameter für die Pearson III-Verteilung:
  - Mittelwert  $HQ$
  - Variationskoeffizient  $c_v(HQ) = \text{Standardabweichung} / \text{Mittelwert}$
  - Schiefekoeffizient  $c_s(HQ) = \text{Schiefe} / \text{Standardabweichung}^3$
2. Wahl der Überschreitungswahrscheinlichkeiten  $P_{UE}$  bzw. Wiederkehrintervalle  $T_n$
3. Entnahme von Beiwerten  $k(P_{UE}, c_s(HQ))$  aus Tabelle (DVWK)
4. Berechnen der Hochwasserscheitelabflüsse für gewählte  $P_{UE}$ , bzw.  $T_n$  mit der Formel

$$HQ_n = \overline{HQ} \cdot [k(P_{UE}, c_s(HQ)) \cdot c_v(HQ) + 1]$$

5. Eintragen in Wahrscheinlichkeitspapier (halblogarithmisch,  $HQ$  absolut,  $P_{UE}$  bzw.  $T_n$  logarithmisch)
6. Überprüfung mit Anpassungstest (z.B.  $\chi^2$ -Test oder Kolmogorov-Smirnov-Test)

---

## 6.3 Zusammenhangsanalyse zwischen zwei und mehreren Reihen

---

Wenn aus einer einzelnen Messreihe die benötigten Informationen für die gestellte Aufgabe nicht unmittelbar ableitbar sind, werden sie über eine oder mehrere benachbarter Messreihen gleicher oder funktional verbundener Art abgeleitet. In der statistischen Analyse geschieht dies insbesondere durch Korrelations- und Regressionsanalysen.

**Korrelationsanalyse:** Feststellung und Bewertung des Zusammenhangs zwischen zwei oder mehr Messreihen.

**Regressionsanalyse:** Bestimmung einer (zumeist linearen) Funktion (z.B. jährliche Abfluss- und Verdunstungshöhe in Abhängigkeit von der jährlichen Niederschlagshöhe).

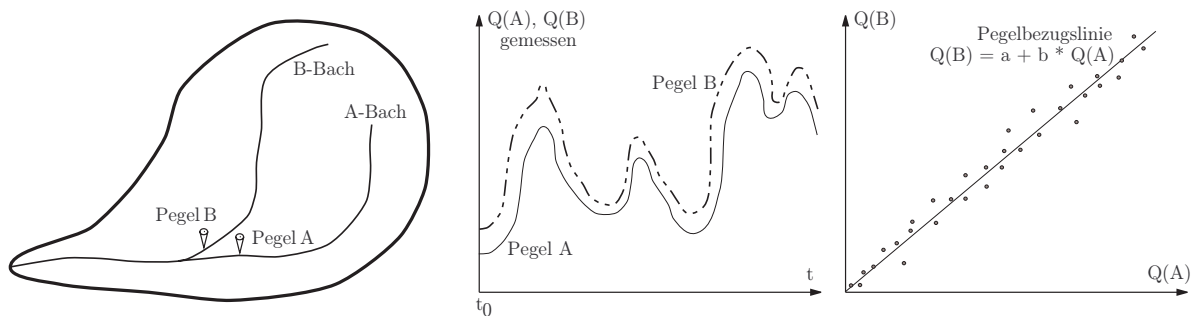
Der Bewertungsmaßstab für den Zusammenhang zwischen Messreihen ist der Korrelationskoeffizient ( $-1 \leq r \leq 1$ ). Je näher  $|r|$  an 1 reicht, desto signifikanter ist der Zusammenhang. In der Literatur sind nur wenige Bewertungsmaßstäbe aufgeführt. In der Hydrologie sollte jedoch bei Korrelationskoeffizienten  $< 0,7$  nicht mehr von einem Zusammenhang der untersuchten Messreihe ausgegangen werden.

Ist jedoch der Zusammenhang zwischen Messreihen als signifikant bestimmt worden, kann der funktionale Zusammenhang durch Regressionsfunktionen beschrieben werden.

**Auffüllen von Messreihen:** Sind an einer Messstelle Messlücken vorhanden, so lassen sich diese durch Verwendung der Messungen einer Nachbarstation mit deutlichem Zusammenhang auffüllen.

**Verlängern von Messreihen:** Ist eine Messstelle für eine wasserwirtschaftliche Planungsaufgabe erst kurzfristig eingerichtet worden, so kann an dieser Stelle eine lange Messreihe abgeleitet werden, wenn mit einer langjährig betriebenen Nachbarstation ein deutlicher Zusammenhang besteht.

**Pegelbezugslinien:** Regressionsfunktionen zwischen benachbarten Pegeln. Läuft ein Modaupegel in Ober-Ramstadt erst seit einem Jahr, in Eberstadt aber seit 20 Jahren, so kann bei signifikantem Zusammenhang eine 20-jährige Funktion in Ober-Ramstadt abgeleitet werden. Die folgenden Abbildungen erläutern die Vorgehensweise.



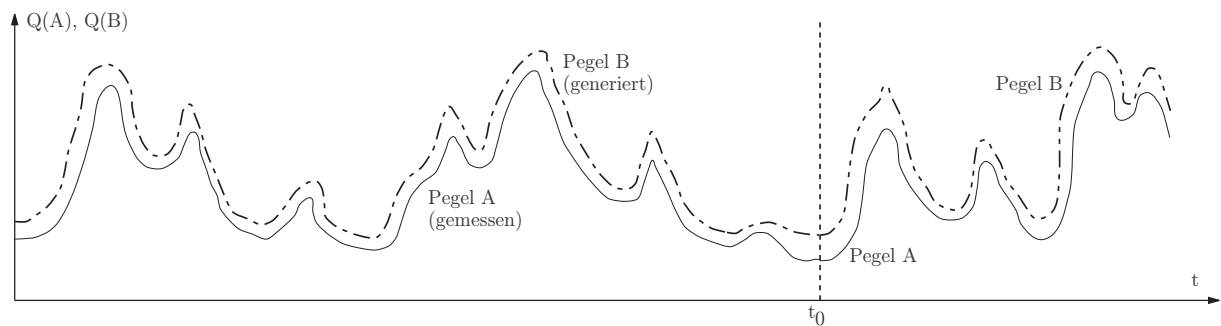
**Abbildung 6.8:** Einzugsgebiet mit zwei benachbarten Pegeln und Pegelbezugslinien

Pegel A wird bereits über einen langen Zeitraum betrieben, Pegel B nur über einen kurzen Zeitraum (ab dem Zeitpunkt  $t_0$ ). Für den Zeitraum, für den an beiden Pegeln Messungen vorliegen, wird eine Regressionsanalyse durchgeführt (siehe Abbildung 6.8 rechts). Mit Hilfe dieser Regressionsanalyse wird die kurze Zeitreihe aufgefüllt, d.h. Pegel B =  $f$ (Pegel A) (siehe Abbildung 6.9).  $y_i = y$  ist dabei die Datenreihe der Zielgröße und  $x_i = x$  die Datenreihe der Einflussgröße. Der Zusammenhang zwischen Ziel- und Einflussgröße kann bei der linearen Regression mit der folgenden Formel beschrieben werden:

$$y_i = a + b \cdot x_i \tag{6.6}$$

Darin enthalten sind die Regressionskoeffizienten  $a$  und  $b$  mit folgender Lösung:

$$a = \bar{y} - b \cdot \bar{x} \quad \text{und} \quad b = \frac{s_{xy}}{s_x^2} \quad \text{mit} \quad s_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})$$



**Abbildung 6.9:** Verlängerung einer kurzen Zeitreihe am Pegel B durch eine Pegelbezugslinie

Den Term  $s_{xy}$  bezeichnet man als Kovarianz. Die Regressionskoeffizienten  $a$  und  $b$  beschreiben den *quantitativen* Zusammenhang zwischen den beiden Zeitreihen  $x$  und  $y$ . Als *qualitatives* Beurteilungsmaß für die Güte des Zusammenhangs gilt der einfache Korrelationskoeffizient  $r$  bzw. das Bestimmtheitsmaß  $r^2$ .

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x \cdot s_y} \quad (6.7)$$

Es gilt  $0 \leq |r| \leq 1$  bzw.  $0 \leq r^2 \leq 1$ . Je näher  $|r|$  bzw.  $r^2$  an 1 liegt, desto enger ist der Regressionszusammenhang.



---

## **7 Bemessung wasserbaulicher Anlagen und Systeme**

---

Die Hydrologie ist inzwischen als wesentliche Umweltwissenschaft anerkannt. Die Ingenieurhydrologie befasst sich dabei im wesentlichen mit der Bemessung baulicher Anlagen und der Abschätzung ihrer Auswirkungen auf die Umwelt. Zu diesem Zweck werden Bemessungsgrößen vorgegeben, die vom Gesetzgeber, häufig in Absprache mit den betroffenen Berufsfachverbänden, festgelegt werden. Im Rahmen von ingenieurhydrologischen Studien sind diese Bemessungsgrößen für den Istzustand und die zu betrachtenden Planungsalternativen festzulegen. In den meisten Fällen sind die zu betrachtenden Größen Hauptwerte und Extremwerte der Abflussganglinie und des Volumens. Zur Berechnung der Bemessungsganglinie werden verschiedene Berechnungsannahmen verwendet, die im Folgenden erläutert werden.

---

### **7.1 Die Bemessung mit Einzelereignissen**

---

Sind am Ort der Planungsmaßnahme Wasserstandsganglinien mit abgesicherten Wasserstandsabflussbeziehungen vorhanden, so können die Bemessungsgrößen durch statistische Analysen direkt daraus gewonnen werden. Dies ist in den wenigsten Fällen möglich. Darüberhinaus lassen diese statistischen Ansätze die Beurteilung der Auswirkung von Baumaßnahmen nicht zu.

In den meisten Fällen wird daher zur Generierung eines Bemessungsabflussereignisses von einem Bemessungsniederschlagsereignis der gleichen Häufigkeit ausgegangen. Es wird davon ausgegangen, dass ein  $n$ -jährliches Niederschlagsereignis ein  $n$ -jährliches Abflussereignis erzeugt. Dies ist nur der Fall, wenn der dazu passende Abflussbeiwert und der geeignete Intensitätsverlauf angenommen wird. Hier sind erhebliche Unsicherheiten vorhanden. Eine regionale Absicherung der Ergebnisse ist unbedingt notwendig (Vergleich berechneter Abflüsse mit Statistiken an nahegelegenen Pegeln).

---

### **7.2 Die Bemessung mit einer partiellen Niederschlagsserie**

---

Um die Unsicherheit zu reduzieren, wird häufig mit einer ausgesuchten Serie von historischen Niederschlagsereignissen eine Serie von Abflussereignissen generiert, die dann wiederum statistisch ausgewertet werden kann. Die Unsicherheiten bei der Wahl des Abflussbeiwertes bleiben jedoch weiterhin bestehen.

---

### **7.3 Die Langzeitkontinuumssimulation**

---

Bei dieser Verfahrensweise wird mit einer kontinuierlichen Zeitreihe des Niederschlags und meteorologischen Kenngrößen eine kontinuierliche Abflussganglinie berechnet. Für diese sind die Unsicherheiten erheblich reduziert, da weder für die Abflussbeiwerte noch für die Intensitätsverläufe unsichere Annahmen getroffen werden müssen.

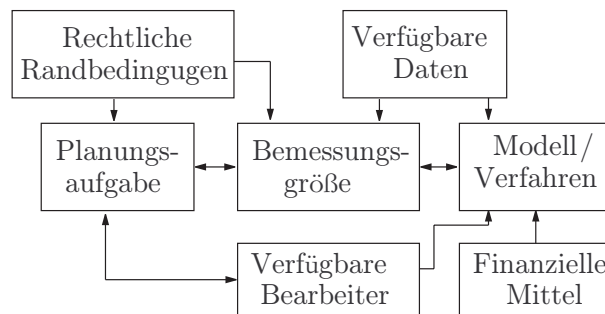
Nachteilig wirkt sich der erhöhte Bedarf an Eingangsdaten aus. Mit der zunehmenden digitalen Aufnahme geographischer, hydrologischer, meteorologischer und hydraulischer Informationen wird jedoch dieses Hindernis ständig reduziert, so dass eine stetige Zunahme dieser Bemessungspraxis zu beobachten ist.

## 7.4 Übersicht über Aufgabenstellungen

Um die Aufgaben der Ingenieurhydrologie näher zu definieren, sind auf den nachfolgenden Seiten Beispiele für wasserbauliche und wasserwirtschaftliche Planungsaufgaben aufgeführt.

Für viele der Aufgaben sind Planungsregeln der Fachverbände ausgearbeitet worden, in denen aber nur in wenigen Fällen die zu verwendenden Analyse- und Syntheseregeln beschrieben werden. Ein solches Beispiel ist die Planung von Regenwasserbehandlungsanlagen als Teil der Stadtentwässerung, die sowohl von den Fachverbänden (hier Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. DWA) und/oder den Umweltbehörden der Länder in technischen Regeln eindeutig festgelegt ist.

In der Abbildung 7.1 ist dargestellt, dass der wasserwirtschaftliche Planungsprozess von einer Vielzahl von Einflüssen bestimmt wird. Es ist in zunehmendem Maß zu beobachten, dass andere als technische Kriterien die Entscheidungsfindung beeinflussen.



**Abbildung 7.1:** Zusammenhänge der wasserwirtschaftlichen Planung



---

## 7.5 Zusammenstellung wasserwirtschaftlicher Planungsaufgaben

---

### Fließgewässer

- Bewirtschaftung
  - Altarmbewirtschaftung
  - Ausweisung von gesetzlichen Überschwemmungsgrenzen
  - Gewässerpflege (inkl. Unterhaltung)
  - Uferstrandstreifen- bzw. Auenkonzepte
  - Speicherbewirtschaftung
  - Kühlwasserentnahme und -einleitung
- Gewässerausbau
  - Renaturierung
  - Hochwasserschutz als Objektschutz wie Deichbau
  - Ufersicherung, Sohlsicherung, Sanierungen
  - Abflussverbessernde Maßnahmen (Gewässerausbau)
  - Deichsanierung und -neubau
  - Geröllschutz
  - Entnahme fester Stoffe (Sohlbaggerung)
  - Gewässerverrohrungen
  - Bühnenbau
- Bauliche Anlagen in und am Gewässer
  - Kreuzungsbauwerke
  - Wehranlagenanierung und -neubau
  - Fischtreppen
  - Messeinrichtungen für Wasserstand, Durchfluss und Gewässergüte
  - Baumaßnahmen in Überschwemmungsgebieten
  - Flusskraftwerke, Sanierung, Erweiterung und Neubau
  - Hochdruckanlagen
  - Pumpspeicherwerke
  - Hochwasserrückhaltebecken
  - Talsperren
  - Hochwasserpolder
  - Staustufen inkl. Schleusen
  - Binnenhäfen
  - Schöpfwerk

---

## Stillgewässer

- Bewirtschaftung
  - Teichanlagen mit Bewirtschaftung (ggf. HW-Schutz als durchströmter Teich mit zusätzlichem HW-Einstau)
- Gewässerausbau
  - Rekultivierung von Baggerseen
  - Auskiesung
  - Sanierung und Restaurierung von Seen
- Bauliche Anlagen in und am Gewässer
- Stillgewässer als Freizeiteinrichtungen
- Bauwerke an Kanälen

## Ortsentwässerung und Abwasserbehandlung

- Netzinterne Maßnahmen
  - Kanalsanierung, -instandsetzung und -neubau
  - Bauwerke der Ortsentwässerung
  - Abwasserpumpwerk
  - Kanalnetzbewirtschaftung und -steuerung
  - Entwässerung von Bebauungsgebieten, Verkehrsflächen und Werksgeländen
  - Messeinrichtungen in Kanalhaltungen (Durchfluss, Feststoffgehalt)
  - Brauchwasserkreisläufe der Industrie
  - Dezentrale Rückhaltung
  - Messeinrichtungen in Kläranlagen für Sauerstoff, Durchfluss, Feststoffgehalt
- Gewässereinleitungen
  - Regenwasserentlastung und Einleitung (RÜB, RÜ)
  - Regenrückhaltebecken
  - Versickerung
  - Mischwasserbehandlung
  - Kläranlagenneubau und -sanierung für kommunale, industrielle und gewerbliche Abwässer
  - Klärschlammbehandlung
  - Abwasserteiche

---

## **Wasserversorgung**

- Netzinterne Maßnahmen
  - Rohrleitungsbau und -sanierung
  - Wasserbehälter (Wasserspeicher)
  - Pumpstation (Förderanlagen)
  - Trinkwasseraufbereitungsanlagen
  - Planung und Bau von Wasserverteilungsnetzen
  - Grundwassermesseinrichtungen
- Wasserentnahmen
  - Entnahme aus oberirdischen Gewässern
  - Entnahme aus Grundwasser
  - Uferfiltratanlagen
  - Grundwasseranreicherungsanlagen
  - Quelfassungen
  - Trinkwasserschutzgebiete

## **Landwirtschaftlicher Wasserbau**

- Melioration
- Beregnung, Bewässerung
- ländlicher Wegebau
- Dränagen
- Strassengräben
- Flurbereinigungen
- Erosionsschutz

## **Gewässerschutz in der Abfallwirtschaft**

- Oberflächenentwässerung von Deponien und Altstandorten
- Deponiesickerwasserbehandlung
- Abdichtung von Deponien und Altstandorten

## **Bergbau**

- Vorflutregelung
- Sumpfungswässer
- Rekultivierung



---

## Literaturverzeichnis

---

- [1] DEUTSCHES GEWÄSSERKUNDLICHES JAHRBUCH: *Rheingebiet – Teil III, Abflußjahr 1989*. Düsseldorf : Landesamt für Wasser und Abfall Nordrhein-Westfalen, 1992
- [2] DYCK, S. ; PESCHKE, G.: *Grundlagen der Hydrologie*. Verlag für Bauwesen, 1995
- [3] HAASE, M.: *Raumbezogene Datenstrukturen für die hydrologische Modellierung*. Mitteilungen des Lehrstuhls und Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 1996. – Band 107
- [4] HEYER, E: *Witterung und Klima*. 2. Auflage. B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1972
- [5] MANIAK, U.: *Hydrologie und Wasserwirtschaft – Eine Einführung für Ingenieure*. Springer-Verlag, 1993
- [6] SCHRÖDER, W. ; EULER, G. ; SCHNEIDER, K.: *Grundlagen des Wasserbaus*. Werner Ingenieur Texte, 1982