

Technische Universität
Bergakademie Freiberg
Institut für Geologie
Lehrstuhl für Hydrogeologie



Vorlesungsskript zur Lehrveranstaltung

Grundlagen der Hydrologie und Hydrogeologie

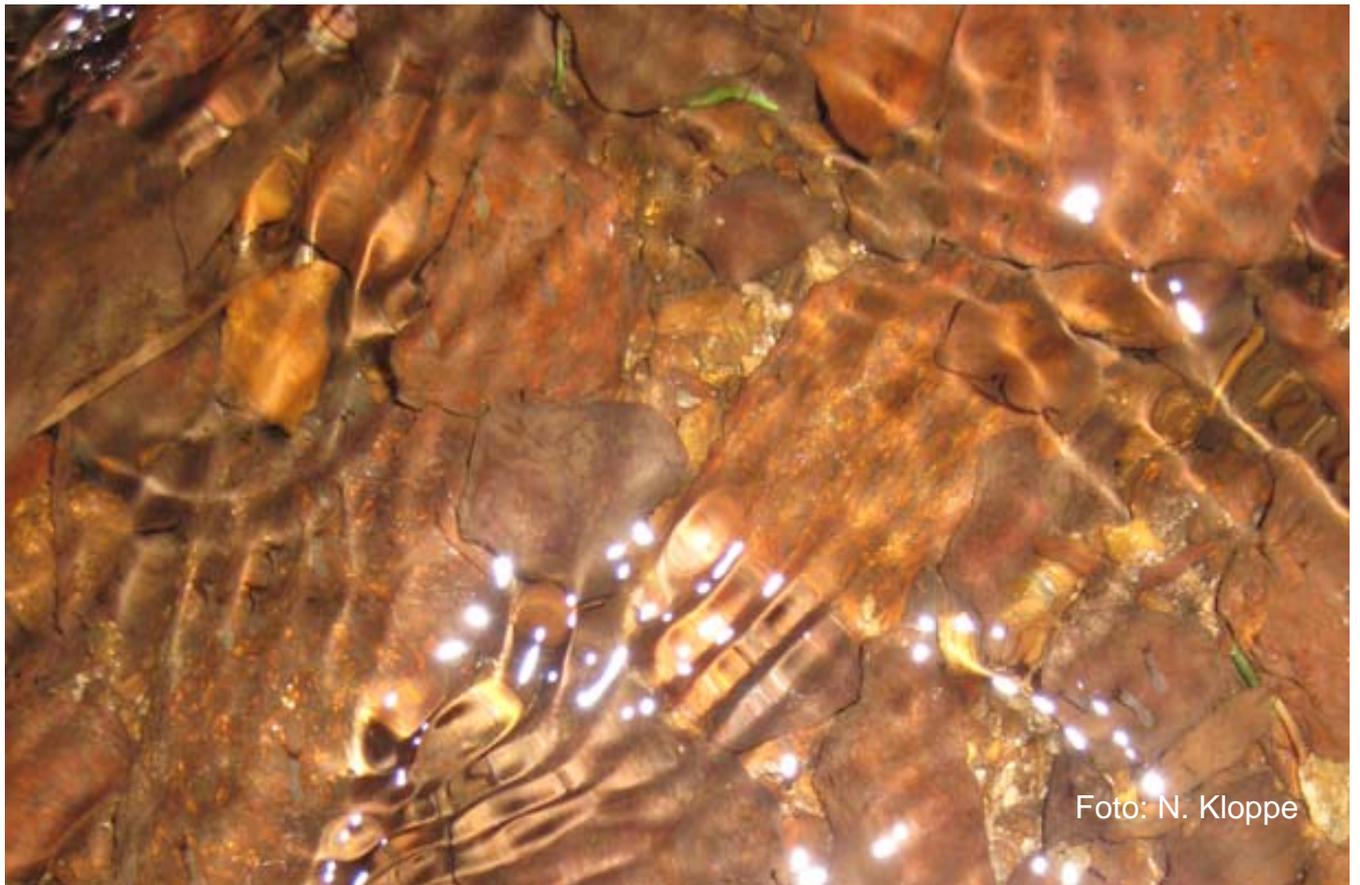


Foto: N. Kloppe

Lehrverantwortlicher: PD Dr. V. Dunger

Vorwort:

Die Lehrveranstaltung „Grundlagen der Hydrologie und Hydrogeologie“ ist Bestandteil des Moduls „Angewandte Geowissenschaften I“, das im Rahmen der Bachelorausbildung für naturwissenschaftliche Studiengänge, u. a. für Geoökologen, Geologen, Geotechniker und Mineralogen angeboten wird. Der zeitliche Umfang beträgt 2 Semesterwochenstunden Vorlesung. Für Interessenten wird jeweils im darauf folgenden Sommersemester das Modul „Anwendung hydrologischer Methoden“ angeboten, das durch eine Übungsreihe erweitert ist.

Ziel der Vorlesung „Grundlagen der Hydrologie und Hydrogeologie“ ist die Vermittlung von hydrologischen und hydrogeologischen Grundlagen. Hierbei werden vorrangig Wassermengenaspekte behandelt. Auch wenn es sich bei der Lehrveranstaltung um eine Grundlagenvorlesung handelt, so heißt dies nicht, dass es an Praxisorientierung mangelt. In den Vorlesungen wird eine Vielzahl von Anwendungsbeispielen behandelt. Ferner sind Videobeiträge zur besseren Visualisierung der Vorlesungsinhalte integriert.

Hauptinhalte der Vorlesungen „Grundlagen der Hydrologie und Hydrogeologie“ sind:

- Gegenstand und Geschichte der Hydrologie / Hydrogeologie
- Wasserkreislauf und Wasserhaushalt
- anthropogene Einflüsse auf den Wasserhaushalt
- Niederschlagsentstehung, -arten, -messung
- anthropogene Niederschlagsbeeinflussung
- Aufbau und Schmelze einer Schneedecke
- Messung und Berechnung der Verdunstung
- Durchflussmessverfahren, Wasserstands-Durchfluss-Beziehung
- Erfassung von Abflussbildung, -konzentration und -verlauf
- unterirdische Wasserarten
- Grundwasserlagerungsverhältnisse
- Grundlagen der Grundwasserhydraulik
- Bestimmung ausgewählter hydrogeologisch relevanter Parameter
- Grundsätze der Grundwasserprobenahme
- Grundlagen der Hydrochemie und des Grundwasserschutzes

Das Vorlesungsskript soll einen Leitfaden darstellen. Es sind stichpunktartig und illustrativ die Schwerpunkte der einzelnen Vorlesungen zusammengefasst. Da es sich hierbei um ein internes Studienmaterial handelt, wurde auf detaillierte Literaturhinweise (Zitate) verzichtet. Lediglich die Bildquellen sind kenntlich gemacht. Bei der Ausarbeitung der Vorlesungsskripte ist im Wesentlichen auf folgende Literatur zurückgegriffen worden:

Baumgartner, A. und H.-J. Liebscher (1990): Lehrbuch der Hydrologie, Band 1. Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart.

Busch, K. F., L. Luckner und K. Tiemer (1993): Lehrbuch der Hydrogeologie, Band 3: Geohydraulik. Gebrüder Borntraeger Berlin, Stuttgart.

Dyck, S. u. a. (1976): Angewandte Hydrologie, Teil 1: Berechnung und Regelung des Durchflusses der Flüsse. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.

Dyck, S. u. a. (1978): Angewandte Hydrologie, Teil 2: Der Wasserhaushalt der Fußgebiete. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.

Dyck, S. und G. Peschke (1995): Grundlagen der Hydrologie. Verlag für Bauwesen, Berlin, 3. Auflage.

Hörling, Coldewey (2009): Hydrogeologie, Spektrum Akademischer Verlag.

Maidment, D. R. (1992): Handbook of Hydrology. McGraw-Hill.

Maniak, U. (2005): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 5. Auflage.

Matthess, M. (1990): Lehrbuch der Hydrogeologie, Band 2: Die Beschaffenheit des Grundwassers. Gebrüder Borntraeger Berlin, Stuttgart.

Matthess, M. (2003): Lehrbuch der Hydrogeologie, Band 1: Allgemeine Hydrogeologie, Grundwasserhaushalt. Gebrüder Borntraeger Berlin, Stuttgart.

Schröder, W., G. Euler, F. Schneider und D. Knauf (1994): Grundlagen des Wasserbaus. Werner-Verlag, Düsseldorf, 3. Auflage.

Singh, V. P. (1992): Elementary Hydrology. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Die hier angegebene Literatur kann dem interessierten Studenten zur Vertiefung und Erweiterung seines Wissens empfohlen werden. Neben der angegebenen Literatur wurden Forschungsarbeiten des Lehrstuhls für Hydrogeologie genutzt.

Ich hoffe und wünsche, dass das Skript dazu beiträgt, die Vorlesungen für den Studenten angenehmer zu gestalten und dass die Zeit, die ansonsten nur zum Mitschreiben benötigt würde, der erhöhten Aufmerksamkeit zugute kommt und damit dem besseren Verständnis dient. Für Hinweise und Vorschläge, die der Verbesserung der Vorlesungsskripte dienen, bin ich jederzeit dankbar.

Freiberg im Februar 2017

Volkmar Dunger

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einführung	5
1.1. Gegenstand der Hydrologie bzw. Hydrogeologie	5
1.2. Geschichte von Hydrologie und Hydrogeologie	7
2. Wasserkreislauf und Wasserhaushalt	10
2.1. Begriffsbestimmungen	10
2.2. Wasserdargebot und -verbrauch, Wasserhaushaltsgleichung	12
2.3. Anthropogene Beeinflussungen des Wasserhaushaltes	17
2.3.1. Überblick	17
2.3.2. Direkte Auswirkungen anthropogener Eingriffe	17
2.3.3. Indirekte Auswirkungen anthropogener Eingriffe	21
3. Der Niederschlag	22
3.1. Bedeutung und Entstehung	22
3.2. Niederschlagsarten	27
3.3. Niederschlagsmessung (punktuelle Messung)	28
3.4. Ermittlung des Gebietsniederschlages	31
3.5. Starkregen, Bemessungsregen, maximal möglicher Regen	34
3.6. Globale und saisonale Niederschlagsverteilung	40
3.7. Anthropogene Niederschlagsbeeinflussung	42
3.8. Schnee	43
4. Die Verdunstung	46
4.1. Arten und Bedeutung der Verdunstung	46
4.2. Überblick über Methoden zur Messung der Verdunstung	49
4.3. Wasserhaushaltsmethode	50
4.4. Berechnung der potentiellen Verdunstung mittels empirischer Formeln	54
4.5. Klimatische Wasserbilanz	60
4.6. Methoden zur Berechnung der realen Verdunstung	61
4.7. Interzeptionsverdunstung	68
5. Abfluss und Durchfluss	73
5.1. Definitionen, Abflusskomponenten	73
5.2. Messung des Durchflusses	74
5.2.1. Überblick über häufig angewendete Verfahren	74
5.2.2. Durchflussmessung mittels Messwehr	77
5.2.3. Durchflussermittlung mittels hydrometrischem Messflügel	78
5.2.4. Tracermessung (Verdünnungsmethode)	81
5.3. Berechnung von Fließgeschwindigkeit und Durchfluss mittels einfacher Fließformeln	84
5.4. Wasserstands-Durchfluss-Beziehung	85
5.4.1. Wasserstandsmessung	85
5.4.2. Darstellung der Wasserstands-Durchfluss-Beziehung	89
5.5. Statistische Auswertung von Durchflussdaten	89
5.5.1. Datenprüfung	89
5.5.2. Haupt- und Dauerzahlen des Durchflusses	94

5.6.	Der Abflussbildungsprozess	96
5.6.1.	Einflussgrößen auf den Abflussvorgang - morphometrische Parameter	96
5.6.2.	Einfache Ansätze zur Erfassung der Abflussbildung	101
5.6.3.	Abfluss- und Infiltrationsmodelle	105
5.7.	Abflusskonzentration und -verlauf im Gewässer	110
6.	Hydrogeologische Grundlagen	114
6.1.	Teildisziplinen der Hydrogeologie	114
6.2.	Hohlräume und unterirdische Wasserarten in der Hydrogeologie	114
6.3.	Grundwasserlagerungsverhältnisse	116
6.4.	Grundwasserhydraulik	117
6.5.	Bestimmung hydrogeologisch relevanter Parameter bezüglich der Grundwasserhydraulik	121
6.6.	Grundwasserbeschaffenheit, Grundwasserschutz	125

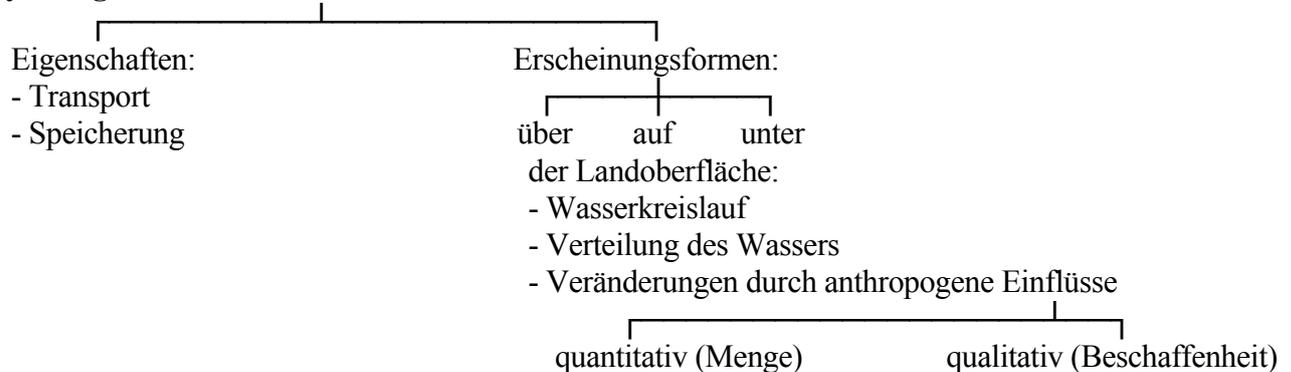
Anhang: Übungen zum Modul „Anwendung hydrologischer Methoden“ (angeboten jährlich im Sommersemester)

Grundlagen der Hydrologie und Hydrogeologie

1. Einführung

1.1. Gegenstand der Hydrologie

* **Hydrologie** = Wissenschaft vom Wasser



* **Hydrogeologie** = Wissenschaft vom unterirdischen Wasser (im engeren Sinne: Grundwasser)

* **Teilbereiche der Hydrologie und der Hydrogeologie:**

Hydrologie:

- a) Hydrologie des Festlandes:
 - Flusskunde (Potamologie)
 - Hochwasserberechnung
 - Niedrigwasserberechnung
 - Speicherwirtschaft
 - Seenkunde (Limnologie)
 - Küstenhydrologie
 - Glaziologie
 - Geohydrologie (Hydrologie des unterirdischen Wasser)
 - Wasserhaushaltslehre
 - Paläohydrologie

- b) Hydrologie der Meere (Ozeanologie)

Hydrogeologie:

- a) allgemeine Hydrogeologie (Grundlagen, Definitionen)
- b) Grundwasserlagerstättenlehre (Eigenschaften, Nutzbarkeit der Grundwasserlagerstätten)
- c) Grundwasserschutz (Fixierung von Schutzziele und Schutzgebieten)
- d) Montanhydrogeologie (Bergbausicherheit, Wasserhaltungen im Bergbau)
- e) weitere (Paläohydrogeologie, Hydraulik, Isotopenhydrogeologie, Hydrogeothermie, ...)

- zur Stellung von Hydrologie und Hydrogeologie innerhalb der Naturwissenschaften → s. Bild 1.1

* **Zielstellung der Hydrologie / Hydrogeologie:**

Schaffung von Grundlagen für:

- Planung
- Entwurf
- Durchführung

wasserwirtschaftlicher Maßnahmen zur:

- Erkundung
- Erfassung
- Erschließung
- Nutzung

der Wasserressourcen

┌ Mengenaspekt

└ Beschaffenheitsaspekt

→ hierbei Entscheidungshilfen → s. Bild 1.2

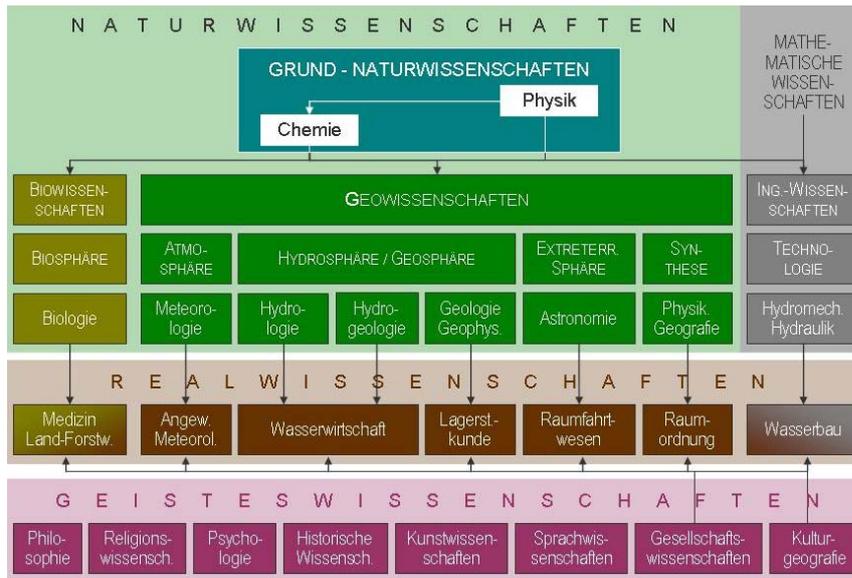


Bild 1.1:

Stellung von Hydrologie und Hydrogeologie innerhalb der Naturwissenschaften (nach BAUMGARTNER, LIEBSCHER, 1990)

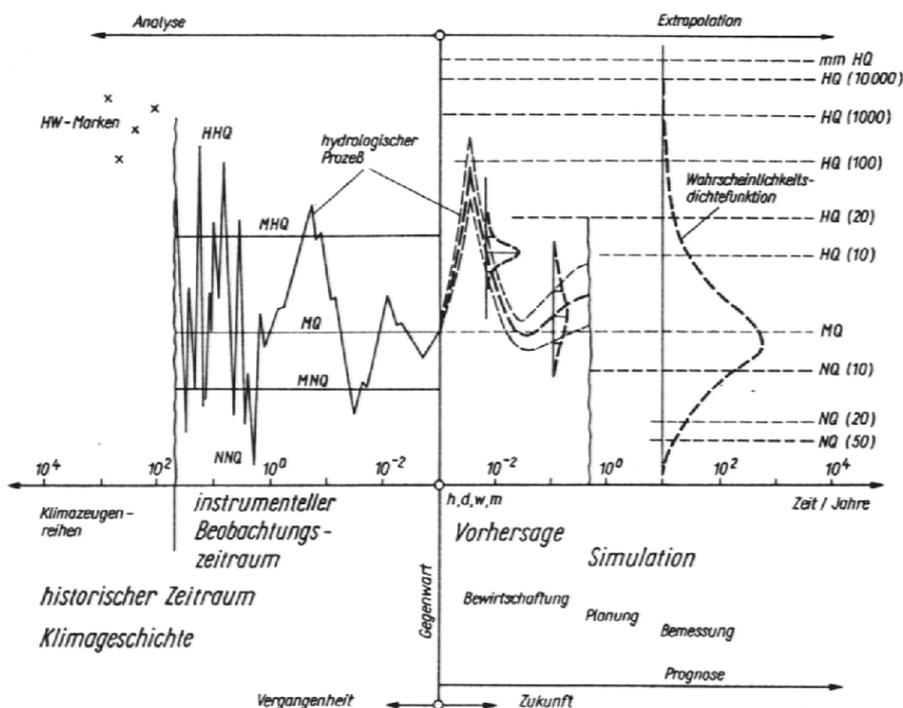


Bild 1.1:

Hydrologische Informationen für die Planung, Bemessung und Bewirtschaftung von wasserwirtschaftlichen Systemen (aus DYCK, PESCHKE, 1995)

* vorrangige Aufgaben von Hydrologen und Hydrogeologen:

- **Erforschung des Wasserkreislaufes/Wasserhaushaltes:** Einfluss von Klima, Boden, Vegetation, Veränderung der Umwelt durch den Menschen auf den Wasserkreislauf (Veränderungen vor allem in Bezug auf die Verdunstung, Abfluss und Grundwasserspeisung)
- **hydrologische Prognosen/Vorhersagen:** Wasserstand, Durchfluss, Hoch- und Niedrigwasser, Schneeschmelze, Eisbildung, Grundwasserspeisung (sog. Grundwasserneubildung)
- **Bemessungsaufgaben:** Planung und Dimensionierung wasserwirtschaftlicher, bergbaulicher, verkehrstechnischer, landwirtschaftlicher, kommunaler Anlagen
- **Gewässerschutz:** Veränderung von Wassermenge/-beschaffenheit infolge menschlicher Nutzung

* **Hauptarbeitsgebiete der Hydrologie / Hydrogeologie:**

- Beobachtung und Messung hydrologisch-hydrogeologischer Prozesse
- Prozessanalyse und Entwicklung neuer Methoden
- Anwendung der Ergebnisse von a) und b) für praktische Belange (z.B. für Vorhersagen, für Bemessungsaufgaben und in Bezug auf den Gewässerschutz → s. o.)

1.2. Geschichte der Hydrologie / Hydrogeologie

- Verhältnis des Menschen zum Wasser begründet durch Mangel und Überschuss (dokumentiert u.a. in allen Weltreligionen (Bibel: Sintflut), Mythen und Legenden)
- Nutzung des Wassers (und teilweise hydrologische Messungen) stand vor der Erklärung der Zusammenhänge/Vorgänge (z.B. des hydrologischen Kreislaufes, s. auch Bild 1.3)
- große Kulturen waren immer zugleich an die Lösung der Wasserprobleme gebunden (Wasserfassung, -speicherung, -verteilung, -entsorgung, Be- und Entwässerung, Hochwasserschutz)

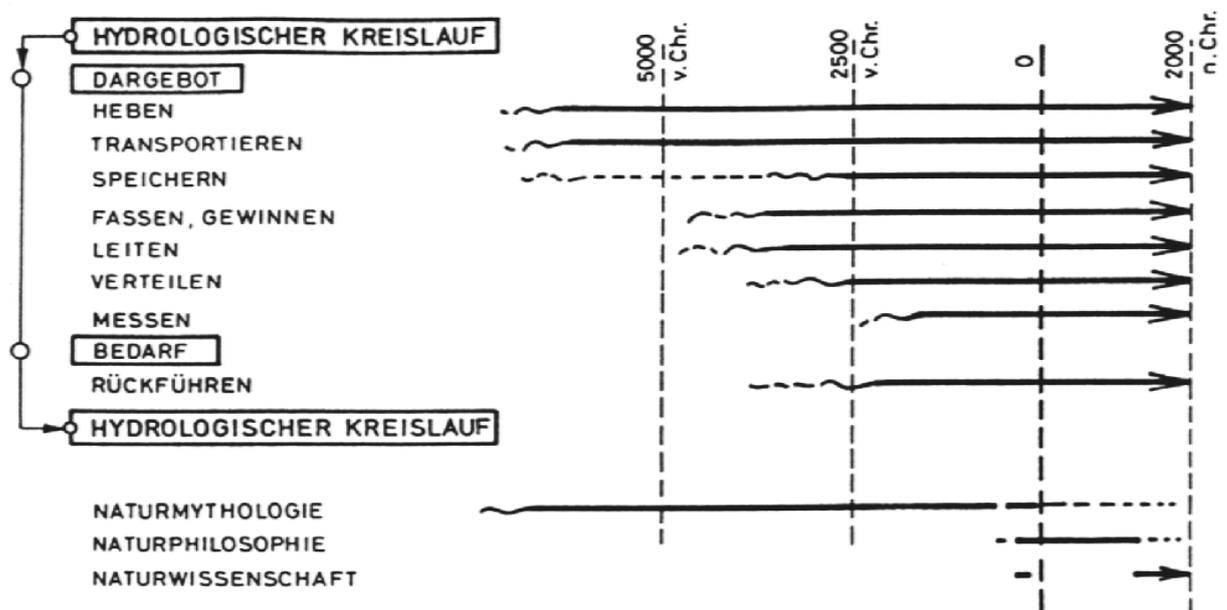


Bild 1.3: Das Verhältnis Mensch-Wasser in der Menschheitsgeschichte (aus BAUMGARTNER, LIEBSCHER, 1990)

Mesopotamien (Zweistromland):

- Probleme:
 - regelmäßiges Auftreten von Hochwasser (April-Juni, für Ackerbau günstig)
 - außerordentlich geringes Talgefälle (ca. 1 : 26 000) → große Überschwemmungsgebiete
 - Schwebstoffführung und Überflutung der Felder stark abhängig vom Wasserstand
- Notwendigkeit einer straffen zentralistischen Staatsform (sog. "Wasserzivilisation", Sumerer, um 3000 v. Chr.)
- in Chaldäischer Zeit (620-540 v. Chr.) 40 000 km² Land bewässert, große Probleme mit Versalzung der Böden, Ursachen nicht erkannt → Wanderung entlang der Flüsse, Anbau unempfindlicherer Pflanzen (Gerste statt Weizen)
- Zerstörung der Anlagen nach 1258 (Herrschaft der Mongolen) → Rückgang der Bevölkerung von ca. 25 Mio. (100 n. Chr.) auf 1,5 Mio. (1913)

Ägypten:

- jährliches Nilhochwasser (Juli-September) = Grundlage des Wohlstandes Ägyptens
- Wasserstandsschwankungen von 1 m → Katastrophen
 - enges Netz von Wasserstandsmessstellen (älteste erhaltene Wasserstandsmarken und Aufzeichnungen ca. 2900 - 2500 v. Chr.), ununterbrochene Wasserstandsaufzeichnungen des Pegels Roda (bei Kairo) von 715 - 1890 → längste erhaltene Messreihe der Welt, Messprinzip mittels Schacht (prinzipiell kein Unterschied zu modernen Messeinrichtungen)
 - geeichte Pegel, sog. "Nilometer" mit Einteilung (schlechtester Nil, Hunger-Nil, heiterer Nil, sicherer Nil, vorzüglicher Nil, ausnahmsweise hoher Nil)
 - wahrscheinlich ältestes Hochwassermeldesystem (Ruderbootmelder)

Indus-Tal:

- bereits ca. 3500 - 1500 v. Chr. außerordentlich hohes Niveau auf dem Gebiet des Wasserbaus, der Wasserversorgung und Abwasserbehandlung
- Wasserversorgung meist aus Brunnen, Transport durch Kanäle und Leitungen in die Häuser
- Entsorgung (Bäder und Spültoiletten) durch Kanalisation (Kanäle, Sammler) → hoher Standard, der selbst durch das Römische Reich nicht erreicht worden ist (ca. 2000 Jahre später)

Persien, Armenien (Hochlandkulturen):

- Nutzung von Grundwasser für die Wasserversorgung → Nutzung von Quellen und Brunnen → Transport des Wassers durch Qanate (Freispiegelkanäle), ca. 1000 (... 1500) v. Chr.
- maximale Länge der Qanate: ca. 80 km, Transportleistung: im Mittel 2 000 m³/d (bis 35 000 m³/d)
- Gesamtqanatanzahl Persiens: 40 000 - 50 000 mit in Summe ca. 1 000 m³/s (entspricht dem 3-fachen Durchfluss der Elbe in Dresden)

Theorie des Wasserkreislaufes:

- eine der ältesten Fragen der Menschheit: wo kommt das Wasser her?
- **3 Lehrmeinungen** (s. auch Bild 1.4):
 - *meteorogener Wasserkreislauf* → begründet wahrscheinlich von XENOPHANES (570 - 475/470 v. Chr.) → Erklärung des Wasserkreislaufes, wie sie heute noch in jedem modernen Lehrbuch stehen könnte, weitere Vertreter: DIOGENES, HIPPOKRATES (Verdunstungsexperimente)
 - *Salzwasseraufstieg aus den Meeren* → begründet von THALES (ca. 624 - 546 v. Chr.) "Die Erde ruht auf dem Wasser der Meere.", weitere Vertreter: HIPPOKRATES, PLATON
 - *Wasserentstehung aus der Luft* (Kondensation) → entwickelt von ARISTOTELES (385 - 322 v. Chr.) → maßgebende Lehrmeinung bis etwa 1600

Römisches Reich:

- wenige wissenschaftliche Leistungen, dafür jedoch großartige ingenieurtechnische Leistungen → Wasserbauten, Wasserversorgung (Aquädukte zur Versorgung Roms → Wasserverbrauch Roms: ca. 1000 l / Einwohner und Tag, zum Vergleich: Deutschland 122 l / EW d - Jahr 2007)

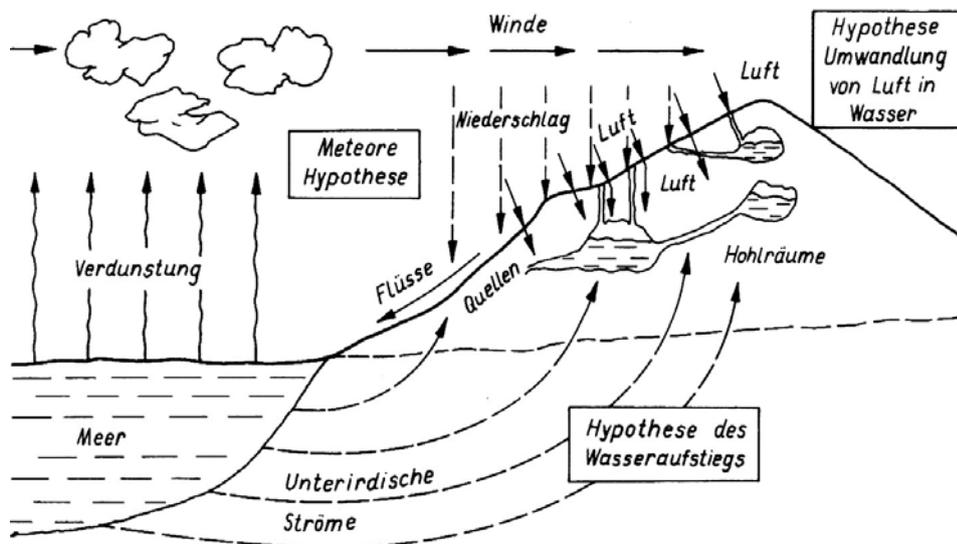


Bild 1.4:

Hypothesen zum Wasserkreislauf der Erde (aus DYCK, PESCHKE, 1995)

Mittelalter:

- Stagnation und teilweiser Rückschritt auch auf dem Gebiet der Wasserwirtschaft
- wenige Ausnahmen: z.B. bergbauliche Wasserhaltung im Freiburger Raum (Freiburger Kunstgraben- und Röschensystem, erste Blütezeit um 1550)
- Nutzung des Wassers zum Heben des Erzes, des tauben Gesteins und des Grubenwassers
- System von Gräben, Röschen (Wassertransport) und Kunstteichen (Wasserspeicherung) von Freiberg bis in die Kammlagen des Erzgebirges
- Messung (Hydrometrie) und Bewertung der bereitgestellten Wassermengen

Hydrologie zwischen Mittelalter und Gegenwart:

- Erkennen des Prinzips der Kontinuität → LEONARDO DA VINCI (1452 - 1519)
- Beschreibung der einzelnen Größen des Wasserkreislaufes → PALISSY (1510 - 1590)
- erste quantitative Bestimmung der Wasserhaushaltsgrößen → PERRAULT (1611 - 1680), gleichzeitig Begründer der modernen Hydrologie → Beobachten und Messen anstatt zu spekulieren → Erkenntnis: nur ca. 1/3 des Niederschlages gelangen zum Abfluss
- MARIOTTE (1628 - 1684): Niederschlags- und Abflussmessungen an der Seine (um 1670) → Klarheit, dass Flüsse allein durch Niederschlag speisbar sind
- Berücksichtigung des Grundwassers in Wasserhaushaltsbetrachtungen (RAMAZZINI, 1691)
- erster Versuch einer Weltwasserbilanz durch BUFFON (1749) → allerdings Überschätzung des Abflusses um 500 %
- DALTON (1766 - 1844): erste Wasserbilanz für England und Wales sowie erste Ansätze zur Verdunstungsberechnung aus dem Wasserdampf-Sättigungsdefizit der Luft
- regelmäßige Wasserstandsmessungen in Europa:
Elbe (Pegel Magdeburg): seit 1727, Rhein (Pegel Emmerich): seit 1770, (Pegel Köln): seit 1782
- Berechnung der Fließgeschwindigkeit des Grundwassers → DARCY (1803 - 1858)
- Erweiterung des DARCY-Gesetzes auf die Brunnenanströmung → DUPUIT (1804 - 1866), THIEM (1836 - 1908)
- erste (recht genaue) Wasserbilanz für das Festland der Erde und die Weltmeere (BRUCKNER, 1905)
- Anwendung statistischer Methoden in der Hydrologie → HAZEN (1930)
- Verwendung analoger und mathematischer Modelle zur Beschreibung hydrologischer bzw. hydrogeologischer Prozesse (breiter Einsatz der Computertechnik in der Hydrologie und Hydrogeologie)

2. Wasserkreislauf und Wasserhaushalt

2.1. Begriffsbestimmungen

- * **Wasserkreislauf** = - globaler und regionaler Transport und Speicherung von Wasser
 - Weg des Wassers umfasst Atmosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre
 - Rotor: Sonnenenergie
 - globaler Wasserkreislauf → s. Bild 2.1
 - regionaler Wasserkreislauf → s. Bild 2.2
- * **Wasserhaushalt** = - Zusammenwirken der Wasserhaushaltselemente Niederschlag, Verdunstung, Abfluss und Speicheränderung in einem Gebiet

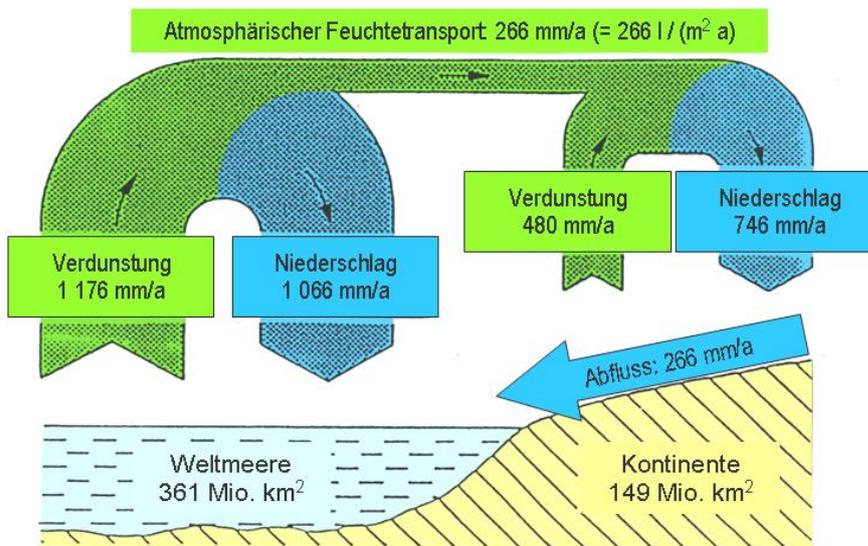


Bild 2.1:

Schematische Darstellung des globalen Wasserkreislaufes (nach BAUMGARTNER, LIEBSCHER (1990))

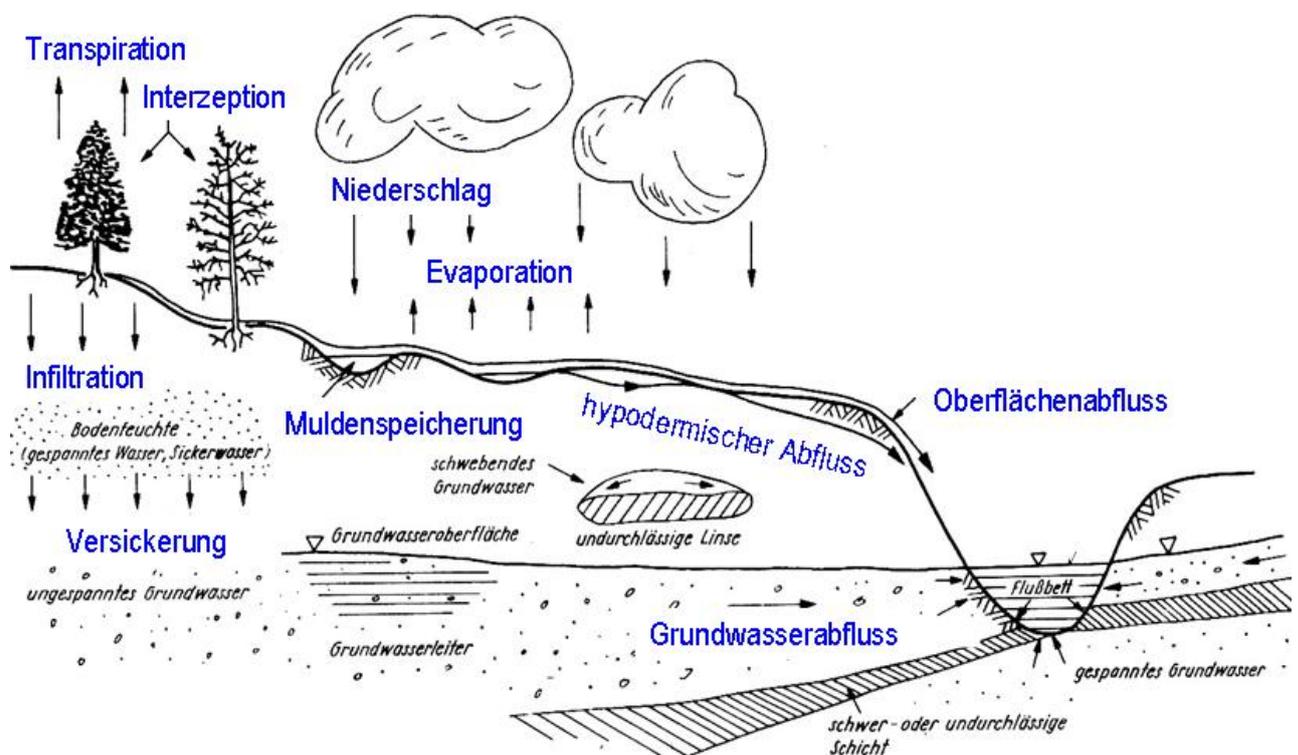


Bild 2.2: Darstellung des regionalen Wasserkreislaufes (nach DYCK U. A., 1976)

* **Charakterisierung des Zusammenwirkens der Wasserhaushaltsgrößen** (vgl. Bild 2.2):

- Auftreffen des *Niederschlages* (fest, flüssig) auf Boden, Pflanzen, Schnee, freie Wasserflächen und auf versiegelte (wasserundurchlässige) Flächen
- Rückhalt des Niederschlages auf der Pflanzendecke (*Interzeption*) → *Interzeptionsverdunstung*
- *Infiltration* des auf den Erdboden fallenden Niederschlages
- Bildung von *Oberflächenabfluss* auf der Bodenoberfläche bei schlechten Infiltrationsbedingungen
- *oberirdische Abflüsse* zu Seen und zum Meer
- vertikale *Versickerung* des infiltrierten Wassers in tiefere Bodenschichten bzw. ins Grundwasser (*Grundwasserneubildung*)
- *Speicherung* von Wasser in der Schneedecke, in Oberflächenspeichern (z. B. Seen), in den Pflanzen, im Boden und im Grundwasser
- Wasserentzug durch Pflanzenwurzeln (*Transpiration*) bzw. durch den Boden selbst (*Evaporation*)
- *Grundwasserabflüsse* in die Vorflut, in Seen bzw. ins Meer

* **Verbindung von Wasser-, Energie- und Stoffhaushalt:**

► *Darstellung des Zusammenhanges* → s. Bild 2.3

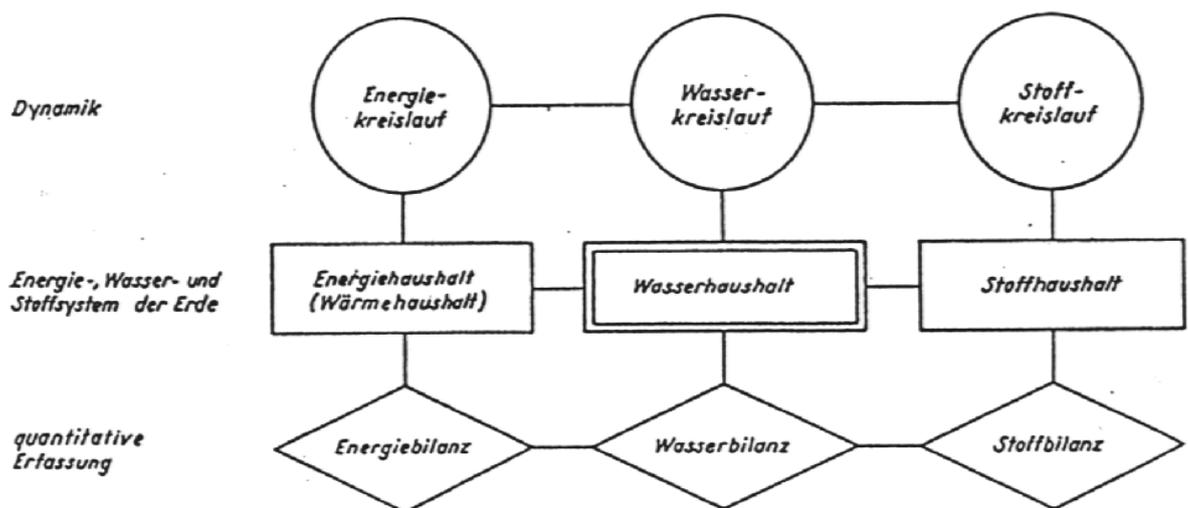


Bild 2.3: Verknüpfung von Wasser-, Energie- und Stoffhaushalt (aus DYCK, PESCHKE, 1995)

► **Schlussfolgerungen:**

- oftmals integrierte Betrachtung von Wasser-, Energie- und Stoffhaushalt notwendig → vgl. Abschnitt 2.4
- Wasserhaushaltsbetrachtungen werden durch Eingriffe des Menschen zunehmend komplizierter (→ vgl. hierzu ebenfalls Abschnitt 2.4):
 - Industrialisierung, Urbanisierung (Versiegelung der Bodenoberfläche)
 - Be- und Entwässerungen, Bodenbearbeitung, Flussbegradigungen
 - künstliche Wasserflächen, Wasserüberleitungen
 - Wasserentnahmen und Abwassereinleitungen, bergbauliche Wasserhaltungen
 - Wärme-, Gas- und Staubeintrag in die Atmosphäre
- Eingriffe des Menschen in den Wasser-, Energie- und Stoffkreislauf zeigen unterschiedlich rasch Wirkung

2.2. Wasserdargebot und -verbrauch, Wasserhaushaltsgleichung

* globales Wasserdargebot:

- Aufspaltung des gesamten Wasservolumens der Erde → s. Bild 2.4
- Untersetzung der Weltwasserbilanz → s. Tabelle 2.1

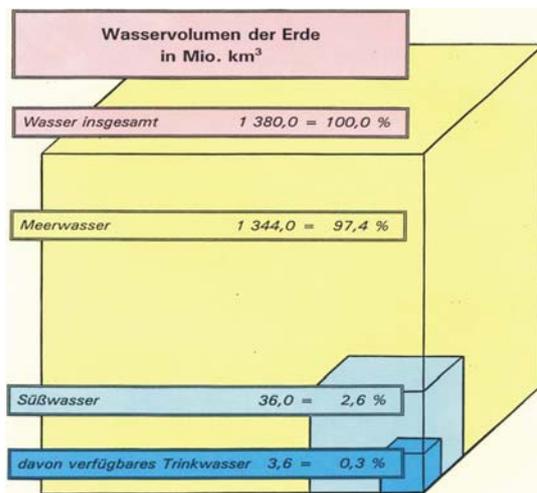


Bild 2.4:

Wasservolumen der Erde

Tabelle 2.1: Die Wassermengen der Erde

Teil der Hydrosphäre	Bezugsfläche km ²	Menge km ³	Anteil der Weltvorräte in %	
			bezogen auf Gesamtvorrat	bezogen auf Süßwasser- vorrat
1. Weltmeer	361 300 000	1 338 000 000	96,5	—
2. Unterirdisches Wasser Vorrangig unter- irdisches Süßwasser	134 800 000	23 400 000 ¹⁾	1,7	—
3. Bodenfeuchte	82 000 000	16 500	0,001	0,05
4. Gletscher, ständig liegende Schneedecke, unterirdisches Eis in Dauerfrostböden	16 227 500	24 364 100	1,766	69,56
5. Seen	2 058 700	176 400	0,013	—
Süßwasser	1 236 400	91 000	0,007	0,26
Salzwasser	822 300	85 400	0,006	—
6. Wasser in Sumpf- gebieten	2 682 600	11 470	0,0008	0,03
7. Wasser in Flußbetten	148 800 000	2 120	0,0002	0,006
8. Biologisches Wasser	510 000 000	1 120	0,0001	0,003
9. Wasser in der Atmosphäre	510 000 000	12 900	0,001	0,04
Gesamte Wasservorräte	510 000 000	1 385 984 610	100	—
Süßwasser	148 800 000	35 029 210	2,53	100

*

* **potenzielles Wasserdargebot der Kontinente im Vergleich:**

- Zahlenwerte → vgl. Tabelle 2.2

Tabelle 2.2: Potentielles Wasserdargebot der einzelnen Kontinente

Kontinent (einschließlich Inseln)	Abfluss [km ³ /a]	Bevölkerung (1980) [Mio. Einwohner]	Abfluss [m ³ je Einw. und Jahr]
Europa	3 210	686	▶ 4 700
Asien	14 410	2 742	5 200
Afrika	4 570	499	9 200
Nordamerika	8 200	383	21 400
Südamerika	11 760	535	46 700
Australien (incl. Tasmanien)	348	15	23 200
Ozeanien	2 040	9	227 700
Antarktis	2 310	-	-
Landflächen insgesamt	46 800	4 586	10 200

* **Wasserbilanz Deutschlands im Vergleich zur Weltwasserbilanz:**

- Zahlenwerte → vgl. Tabelle 2.3

Tabelle 2.3: Werte der Wasserbilanzen für Deutschland im Vergleich zur Weltwasserbilanz (Werte in mm/a)

	Welt (Landfl.)	Deutschland	Westdeutschland	Ehem. DDR
Niederschlag	746	803	837	628
Verdunstung	480	510	519	479
Gesamtabfluss	266	293	318	149
davon Grundwasserabfluss	?	112	?	70

* **Wasserverbrauch:**

- Wasserverbrauch: bis in die 70-er Jahre (Alte Bundesländer) bzw. 80-er Jahre (ehem. DDR) progressiv steigend, danach gedämpft steigend, heute sinkend → s. Tabelle 2.4

Tabelle 2.4: Entwicklung des Wasserverbrauches (vor 1990 nur Westdeutschland)

	1970	1980	1987	1990	1999	2004	2007
Wasserverbrauch [l / Einw. u. Tag]	118	140	143	147	128	126	122

- Verwendungszwecke des Wassers im Haushalt und deren Anteile:

- WC: 27 %
- Körperpflege (Bad/Dusche): 36 %
- Wäschewaschen: 12 %
- Geschirrspülen: 6 %
- Raumeinigung, Autopflege, Garten: 12 %
- Essen, Trinken: 4 %
- Kleingewerbe: 9 %

- Vergleich zu anderen europäischen Ländern → s. Tabelle 2.5
- Anteile der Wasserreservoirs an der öffentlichen Versorgung → s. Tabelle 2.6

Tabelle 2.5: Kommunalen Pro-Kopf-Wasserverbrauch in l/(EW d) ausgewählter europäischer Länder

Land	1985	2007
Belgien	108	120
Österreich	129	162
Großbritannien	130	149
Frankreich	141	156
Spanien	145	270
Niederlande	157	130
Luxemburg	172	170
Dänemark	191	139
Italien	220	213
DDR	245	-
Schweiz	263	237

Tabelle 2.6: Anteile der verschiedenen Wasserreservoirs an der öffentlichen Wasserversorgung

Wasserressource	Anteil in %
Grundwasser	70
Uferfiltrat (durch Flusswasser angereichertes Grundwasser)	8
See- und Talsperrenwasser	12
Flusswasser (direkte Flusswasserentnahme)	1
angereichertes Grundwasser (durch künstliche Versickerung)	9

- täglicher Wasserverbrauch für ausgewählte Verbraucher (Bevölkerung, öffentliche Einrichtungen, Industrie- und Landwirtschaftszweige) → s. Tabelle 2.7

Tabelle 2.7: Mittlerer täglicher Wasserverbrauch für ausgewählte Verbraucher

Verbraucher	Bezugsgröße	Wasserverbrauch
Wohnung ohne Bad und WC	1 Einwohner	60 l / EW * d
Wohnung mit WC und Dusche	1 Einwohner	140 l / EW * d
Wohnung mit WC und Bad	1 Einwohner	160 l / EW * d
Einfamilienhaus	1 Einwohner	150 l / EW * d
Verwaltungsgebäude	1 Beschäftigter	30 l / EW * d
Schule	1 Schüler	15 l / EW * d
Ärztelhaus	1 Patient	10 l / EW * d
Krankenhaus	1 Bett	600 l / EW * d
Gaststätte	1 Gast	230 l / EW * d
Hotel	1 Bett	400 l / EW * d
Hallenbad	1 Besucher	180 l / EW * d
Braunkohlenhydrierwerk	1 t Benzin	30 000 l / t * d
Stahl- und Walzwerk	1 t Roheisen	65 000 l / t * d
Papierfabrik	1 t Feinpapier	70 000 l / t * d
Wäscherei	1 t Wäsche	30 000 l / t * d
Brauerei	1 t Bier	12 000 l / t * d
Brennerei	1 t Schnaps	30 000 l / t * d
Molkerei	1 t Milch	3 000 l / t * d
Schweinehaltung (Gülle)	1 Großvieheinheit	100 l / GVE * d
Rinderhaltung	1 Großvieheinheit	55 l / GVE * d
Geflügelhaltung	1 Großvieheinheit	70 l / GVE * d

*** Wasserpreise:**

- Wasserpreis ergibt sich aus den Kosten für (s. auch Beispiel im Bild 2.5):
 - die Förderung und Aufbereitung des Rohwassers
 - die Verteilung über Rohrnetze bis zum Verbraucher (einschließlich Rohrleitungsverlusten)
 - die Reinigung der Abwässer in Klärwerken bzw. die Überleitung der Abwässer

Preise für die Trinkwasserversorgung ab 01.01.2009
(inklusive gesetzlicher Mehrwertsteuer)

Grundpreise Trinkwasser:

- bei Abnahmemenge bis 2,5 m³/h: 147,66 EUR/Jahr
- bei Abnahmemenge bis 6,0 m³/h: 354,38 EUR/Jahr
- bei Abnahmemenge bis 10,0 m³/h: 590,64 EUR/Jahr
- für Zähleranschluss 50 mm Durchmesser: 885,96 EUR/Jahr
- für Zähleranschluss 65 mm Durchmesser: 1 476,60 EUR/Jahr
- für Zähleranschluss 80 mm Durchmesser: 2 362,56 EUR/Jahr
- für Zähleranschluss 100 mm Durchmesser: 3 543,84 EUR/Jahr

Mengenpreise Trinkwasser:

- bis 36 500 m³/a: 1,72 EUR/m³
- ab 36 500 m³/a: Sonderkonditionen möglich

Preise für die Abwasserentsorgung ab 01.01.2009
(inklusive gesetzlicher Mehrwertsteuer)

Grundpreise Abwasser:

- bei Abnahmemenge bis 2,5 m³/h: 123,00 EUR/Jahr
- bei Abnahmemenge bis 6,0 m³/h: 295,20 EUR/Jahr
- bei Abnahmemenge bis 10,0 m³/h: 492,00 EUR/Jahr
- für Zähleranschluss 50 mm Durchmesser: 738,00 EUR/Jahr
- für Zähleranschluss 65 mm Durchmesser: 1 230,00 EUR/Jahr
- für Zähleranschluss 80 mm Durchmesser: 1 968,00 EUR/Jahr
- für Zähleranschluss 100 mm Durchmesser: 2 952,00 EUR/Jahr

Mengenpreise Abwasser in Abhängigkeit vom Versorgungsgebiet:

- bei Reinigung in öffentlicher Kläranlage: 3,19 - 4,25 EUR/m³
- Entsorgung aus abflussloser Grube: 20,54 EUR/m³

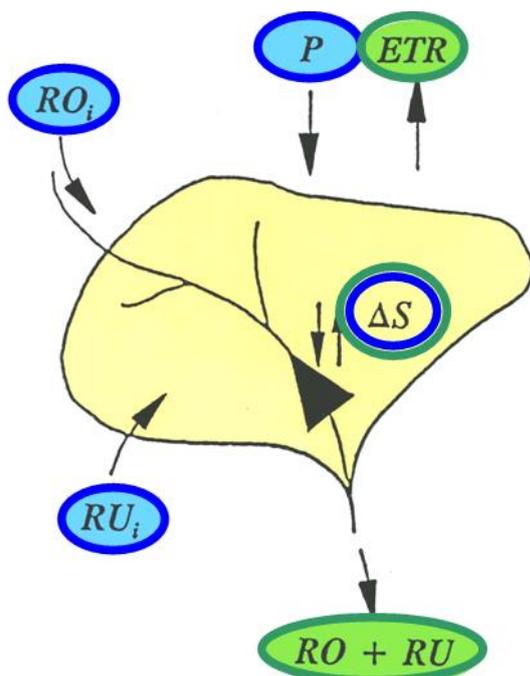
Bild 2.5:

Auszug aus den Tarifblättern Trink- und Abwasser des Wasserzweckverbandes Freiberg

*** allgemeine Wasserhaushaltsgleichung:**

Für ein beliebiges Gebiet (→ s. Bild 2.6) gilt die Wasserhaushaltsgleichung:

$$P + RO_i + RU_i = RO + RU + ETR \pm \Delta S \tag{2.1}$$



- P - Niederschlag auf das Gebiet
- RO_i - oberirdischer Zufluss in das Gebiet
- RU_i - unterirdischer Zufluss in das Gebiet
- RO - oberirdischer Abfluss aus dem Gebiet
- RU - unterirdischer Abfluss aus dem Gebiet
- ETR - reale Verdunstung des Gebietes
- ΔS - Speicheränderung (oberirdisch, Boden, Grundwasser)

Einkommenseite
Wasserhaushaltliche Einnahmen

Ausgabenseite
Wasserhaushaltliche Verluste

Bild 2.6:

Wasserhaushalt eines Gebietes (vereinfacht und schematisiert)

* Vereinfachungen der Wasserhaushaltsgleichung:

- bei Wasserhaushaltsbetrachtung über lange Zeitabschnitte (Jahrzehnte): $\Delta S \rightarrow 0$
- bei Bilanzierung für ein abgeschlossenes Einzugsgebiet: $RO_i + RU_i = 0$

$$P = ETR + RO + RU \quad (2.2)$$

(Symbole \rightarrow s. Gleichung 2.1)

► Erklärung des Begriffes Einzugsgebiet:

- Horizontalprojektion der Gesamtfläche, aus dem das infolge Niederschlag gebildete Wasser dem Auslasspunkt (niedrigster Punkt) zufließt
- Einzugsgebiet wird begrenzt durch die Wasserscheide
- ermittelbar aus topographischen Karten unter Nutzung der Höhenlinien (s. Bild 2.7)
- Wasserscheiden verlaufen senkrecht zu den Höhenlinien, beginnend am Auslasspunkt
- in Abhängigkeit von den geologischen Gegebenheiten ist zwischen ober- und unterirdischem Einzugsgebiet zu unterscheiden (s. ebenfalls Bild 2.7)

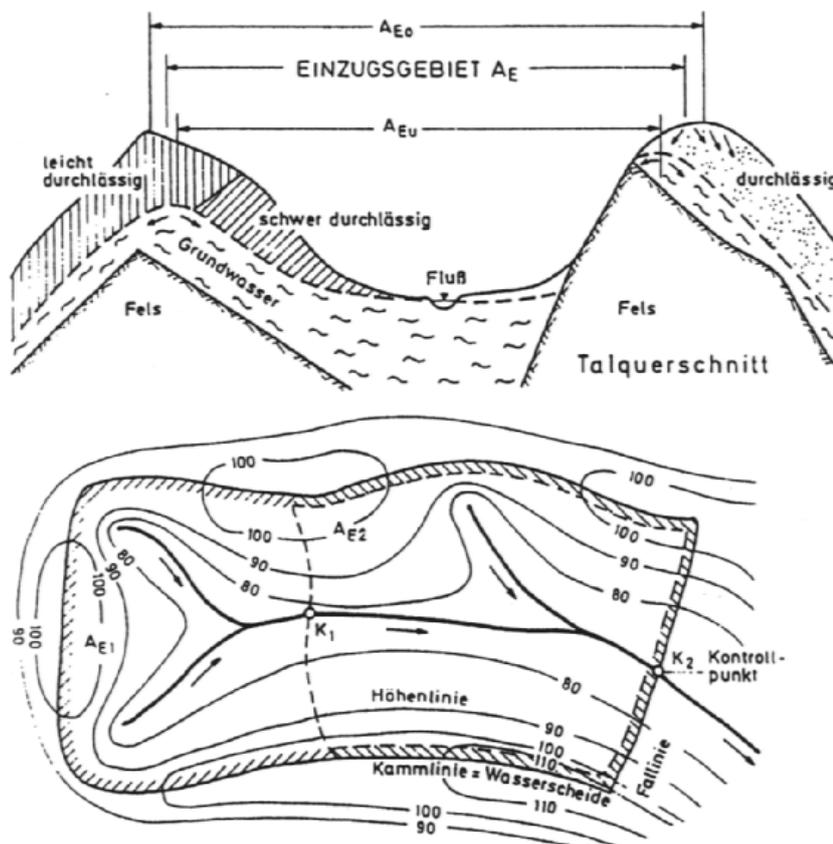


Bild 2.7:

Einzugsgebiet mit ober- und unterirdischen Wasserscheiden (aus SCHRÖDER, U.A., 1994)

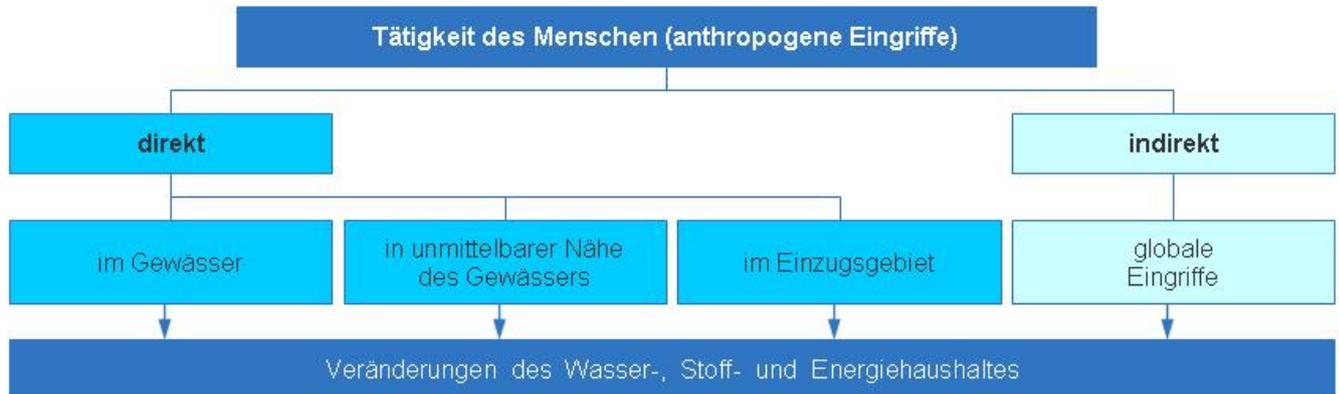
* Quantifizierung des Wasserhaushaltes u.a. notwendig für:

- die Bilanzierung der Wassermengen und Stofffrachten (ggf. Schadstofftransport) eines Gebietes
- die Ermittlung der Grundwasserneubildung und der Verdunstung
- die Berechnung von Beregnungsmengen für die Landwirtschaft
- einen komplikationsarmen Betrieb wasserwirtschaftlicher Anlagen (z. B. Talsperren)

→ Aufstellen einer Wasserbilanz für ein abgeschlossenes Einzugsgebiet → Übung 1

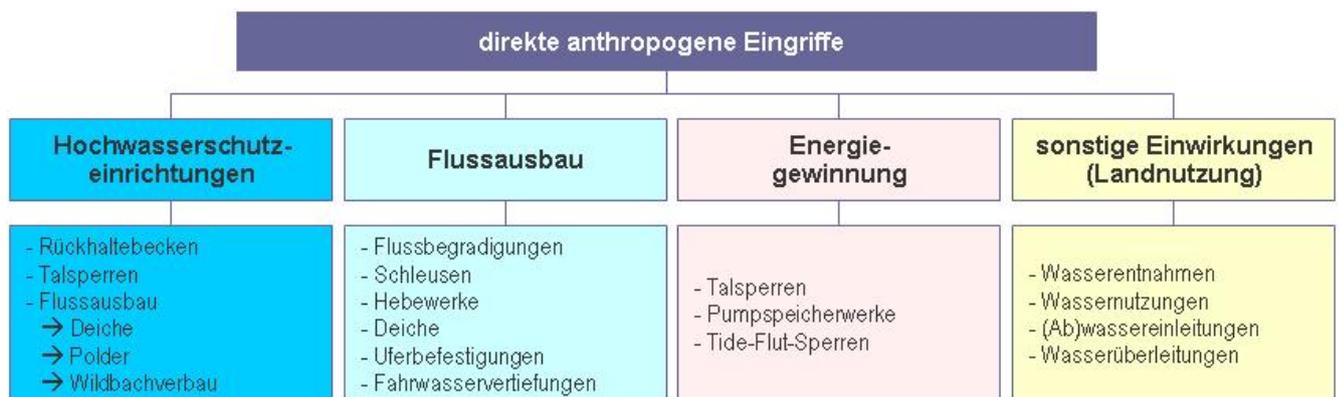
2.3. Anthropogene Beeinflussungen des Wasserhaushaltes

2.3.1. Überblick



2.3.2. Direkte Auswirkungen anthropogener Eingriffe

* Arten direkter anthropogener Eingriffe:



* Auswirkungen auf den Wasserhaushalt:



*** Beispiele für direkte Auswirkungen menschlicher Tätigkeiten auf den Wasserhaushalt:**

► **Klassischer (wasserbaulicher) Flussausbau (Flussbegradigungen und Eindeichungen):**

- Ziele, Maßnahmen und hydrologische Auswirkungen → s. Bild 2.8



Bild 2.8:

Ziele, Maßnahmen und hydrologische Auswirkungen von Flussbegradigungen und Eindeichungen (Auswahl)

→ mannigfaltige Auswirkungen

► **Stauwerke (Speicherseen, Talsperren):**

- Erhöhung der Verdunstung
- ggf. Erhöhung der Versickerung und der Grundwasserneubildung im Bereich des Staukörpers
- Vergleichmäßigung des Durchflusses
- Verminderung des Fließgefälles (→ 0) → Verminderung der Erosion (→ 0) → Erhöhung der Sedimentation → Gefahr des Verlandens des Speichers
- Auswirkungen auf den Stoffhaushalt (→ vgl. z. B. Modul Limnologie)

► **Wildbachverbauung:**

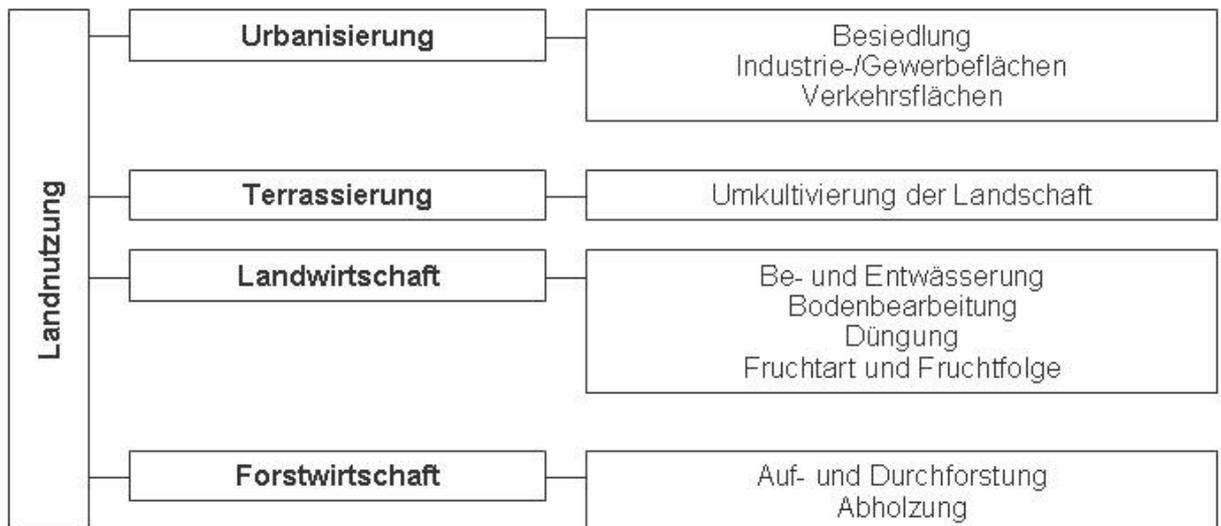
- Anlegen von Sohlschwellen
- Uferbefestigungen
 - Erosionsverminderung (für $Q < Q_A$ mit Q - Durchfluss, Q_A - projektierter Ausbaudurchfluss)
 - Erhöhung der Sedimentation
 - Veränderungen der Gewässerökologie

► **Wasserüberleitungen (z. B. für Bewässerungszwecke):**

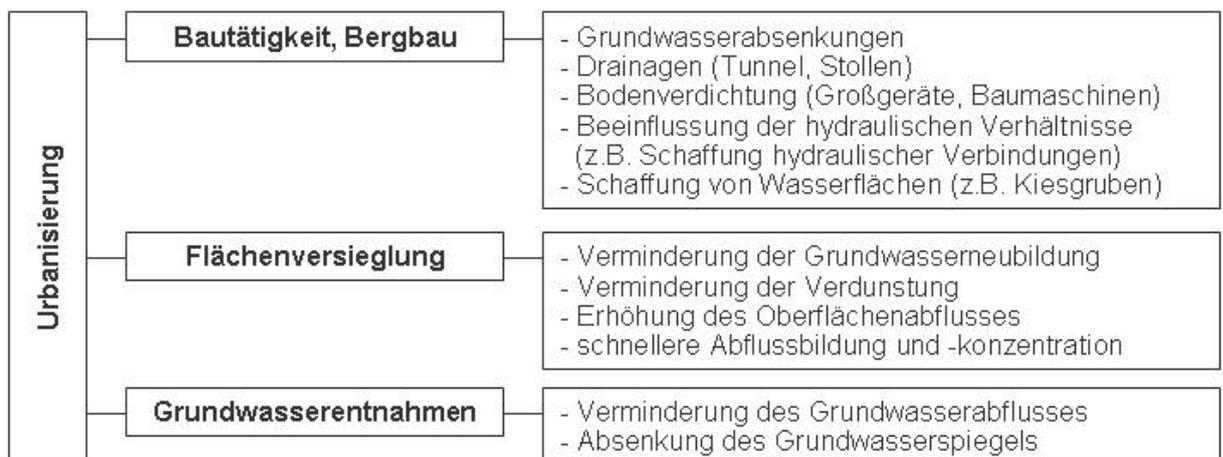
- Beispiele: Karakum-Kanal, Aralsee
 - Erhöhung der Verdunstung
 - Verminderung des Abflusses → erhöhte Stoffkonzentrationen im Gewässer
 - erhöhte Gefahr der Versalzung der Böden und des Grundwassers (besonders bei unsachgemäßer Bewässerung über Kanäle und Verregner)
- Mitte bis Ende des 20. Jahrhunderts weitere z. T. gigantische Eingriffe in den Wasserhaushalt durch Wasserüberleitungen weltweit

► **Veränderungen infolge Landnutzung:**

• *Überblick:*



• *Auswirkungen der Urbanisierung:*



• *Auswirkungen der Terrassierung:*

- Veränderung der Gefälleverhältnisse
- meist Verminderung des Oberflächenabflusses
- meist Erhöhung der Versickerung und der Verdunstung

• *Auswirkungen der Landwirtschaft:*

a) Be- und Entwässerung:

Bewässerung:

- Erhöhung der Verdunstung
- ggf. Erhöhung des Oberflächenabflusses, der Versickerung und der Grundwasserneubildung
- sofern das Beregnungswasser aus dem gleichen Einzugsgebiet stammt → Verminderung des Gebietsabflusses
- ggf. Versalzung der Böden

Entwässerung:

- Erhöhung des Abflusses
- Verminderung der Verdunstung
- Verminderung der Versickerung und der Grundwasserneubildung
- meist Absenkung des Grundwasserspiegels
- meist Verkleinerung des Durchflussscheitels bei Hochwasser (Grund: höheres Speichervermögen des Untergrundes)

b) Bodenbearbeitung → s. Bild 2.9:

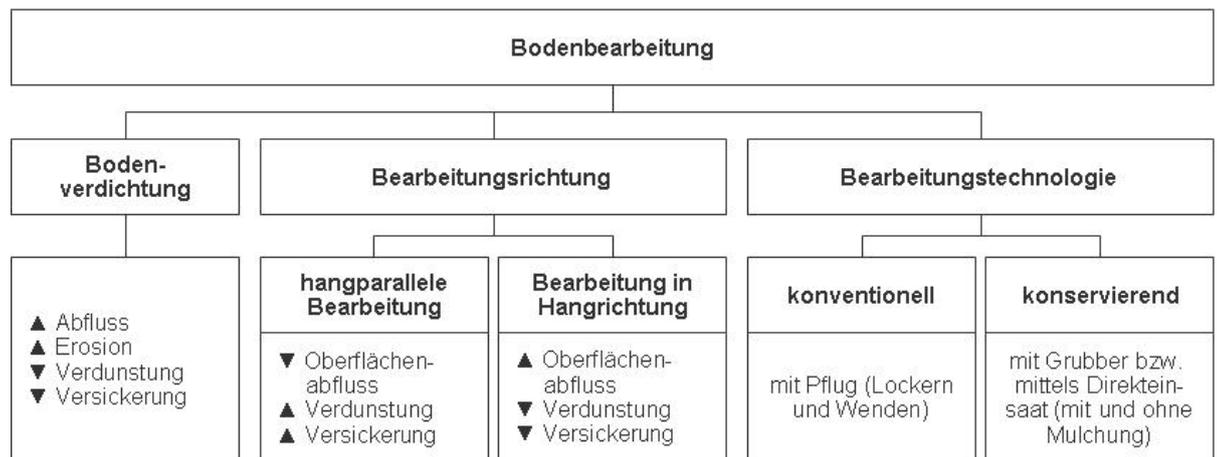


Bild 2.9: Auswirkungen der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung auf den Wasserhaushalt

c) Düngung:

- Erhöhung der Biomasseproduktion
- Erhöhung der Verdunstung und der Wasserspeicherkapazität auf und in der Biomasse
- Minderung bzw. Verzögerung des Oberflächenabflusses

d) Fruchtarten und Fruchtfolge:

- saisonale Veränderungen der Verdunstung und des Abflusses infolge des spezifischen Wasserverbrauches der verschiedenen Pflanzen
- saisonaler Effekt besonders ausgeprägt bei Fruchtfolge

● *Auswirkungen der Forstwirtschaft:*

- hohe Biomasseproduktion
- gute Wasserspeichereigenschaften
- gute Infiltrations- und Versickerungsbedingungen
- höhere Verdunstungswerte als urbanisierte oder landwirtschaftlich genutzte Gebiete
- thermische Ausgleichswirkung
 - Vergleichmäßigung des Wasserhaushaltes
 - Dämpfung der Abflussbildung (insbesondere des Oberflächenabflusses)
 - Verzögerung des Schneeschmelzprozesses
 - geringere Erosionsgefahr
 - i. d. R. günstige Auswirkungen auf den Stoffhaushalt

- vollständige Umkehr der wasserhaushaltlichen Situation bei Waldsterben/Abholzung Ursachenvielfalt für Waldsterben → vgl. auch Vorlesungen im Rahmen des Moduls Luftverschmutzung und Klimaschutz):
 - Ausfilterung toxischer Gase (besonders in Kamm- und Staulagen)
 - Ozon und andere photochemische Folgeprodukte
 - Freisetzung von Metallen/Schwermetallen im Boden infolge Bodenversauerung (Tonmineralzerstörung → Al, Lösung adsorbierter Schwermetalle → z. B. Cd, Pb)
 - Nährstoffmangel
 - Wasserentzug infolge Urbanisierung und Bewirtschaftung
- Maßnahmen zur Eindämmung des Waldsterbens:
 - Verringerung der Schadstoffemissionen (insbesondere SO₄, NO_x, NH₃ und O₃)
 - Überwachung der Schadstoffemissionen (Verdichtung Messnetz, Sünderbestrafung)
 - forstwirtschaftliche Maßnahmen (Stärkung Waldökosysteme, rauchresistente Baumarten)
 - Waldschadensforschung (Ursachenforschung, integrale Ökosystem-/Umweltforschung)

2.3.3. Indirekte Auswirkungen anthropogener Eingriffe

* Auswirkungen globaler anthropogener Eingriffe:

- Klimaveränderungen ("global change", Treibhauseffekt) → s. Modul Meteorologie/Klimatologie
 - Veränderungen des Wärmehaushaltes der Erde
 - Veränderungen des Wasserhaushaltes der Erde
 - Veränderungen des Wasserhaushaltes kleinerer regionaler Einheiten
- Emission von Stoffen (z. T. Schadstoffen)
 - Beeinflussung von Atmosphäre, Lithosphäre und Hydrosphäre
 - Wasserbeschaffenheitsprobleme (vgl. u. a. Module Limnologie, Gewässerschutz, Grundwasserbeschaffenheit, Grundwasserschutz, ...)
- sonstiges (u. a. Freisetzung von Wärme)

* Prognostizierte Auswirkungen globaler Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt:

- Tendenz der Niederschlagserrhöhung auf Grund höherer Temperaturen und folglich einer höheren Verdunstung in den Tropen
- Zunahme der Niederschläge in weiten Teilen der höheren Breiten der Nordhemisphäre
- Trend zu geringeren Niederschlägen in semiariden Gebieten

* Prognostizierte Auswirkungen für Deutschland und Sachsen:

- Niederschlagserrhöhungen im Westen und Süden (Gebiet der alten Bundesländer)
- geringere Niederschläge in den Tieflandgebieten im Osten (vor allem Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Sachsen)
- Trend der Niederschlagsabnahme im Osten betrifft vor allem verdunstungsaktives Sommerhalbjahr (teilweise Rückgänge von > 50 % bis 2100 prognostiziert)
- Folgen insbesondere für Ostdeutschland:
 - Zunahme der theoretisch möglichen Verdunstung infolge höherer Temperaturen
 - Zunahme der Wasserknappheit vor allem in den Sommermonaten
 - geringere Abflüsse (betrifft auch die Grundwasserneubildung)

3. Der Niederschlag

3.1. Bedeutung und Entstehung

* Bedeutung:

- Niederschlag = Ausscheiden des in der Luft enthaltenen Wasserdampfes (fest, flüssig)
- für die Hydrologie wichtigstes Klimatelement
- Einnahmegröße für den Wasserhaushalt

* Niederschlagsentstehung:

► Voraussetzungen für die Niederschlagsbildung:

- Sättigung der Luft mit Wasserdampf (relative Luftfeuchte = 100 %)
- Vorhandensein von Kondensations- bzw. Gefrierkernen (Phasenübergang)
- Tröpfchen-/Eispartikelwachstum (abhängig von der Stärke der i.d.R. vertikalen Luftbewegung)

► Sättigung der Luft mit Wasserdampf:

- Luft vermag in Abhängigkeit von der Temperatur immer nur eine bestimmte Maximalmenge an Feuchtigkeit (Wasserdampf) aufzunehmen (→ vgl. Tabelle 3.1)

Tabelle 3.1: Maximale absolute Feuchte der Luft (bezogen auf Meereshöhe)

Temperatur [°C]	- 20	- 10	± 0	+ 10	+ 20	+ 30
Absolute Sättigungsfeuchte [g Wasser/m ³ Luft]	0,9	2,2	4,9	9,4	17,3	30,4

- Feuchteaufnahmefähigkeit sinkt mit der Temperatur (vgl. Tabelle 3.1)
- Sättigung der Luft ist praktisch immer das Resultat der Abkühlung der Luft (bei Abkühlung wächst die rel. Luftfeuchte, bis 100 % erreicht werden → Erreichen des sog. Taupunktes)
- weitere Abkühlung → Ausscheiden des überschüssigen Wasserdampfes → Bildung von Wassertröpfchen bis etwa - 5 °C ... - 15 °C (Kondensation) oder Eiskristallen unter - 15 °C (Resublimation)

► Vorhandensein von Kondensations- bzw. Gefrierkernen:

- winzige Partikel in der Atmosphäre (Durchmesser: 0,0001 ... 20 µm)
- großer Durchmesser → hohe Sinkgeschwindigkeit → schnelles Verlassen der Atmosphäre
- Kondensationskerne immer in ausreichender Anzahl vorhanden:
ca. 100 / cm³ Luft bei reinster Atmosphäre (Inseln, hohe Berge fernab von Emittenten)
ca. 1 000 000 / cm³ Luft in stark verunreinigter Luft (in Ballungsräumen)

► Wachstum/Größe der Wassertröpfchen:

- direkter Zusammenhang zwischen (vertikaler) Luftbewegung und Tropfengröße:
→ Nebel (sehr geringe Luftbewegung): Tropfengröße 5 - 15 µm
→ Sprüh- bzw. Nieselregen (geringe vertikale Luftbewegung): < 0,5 mm (< 500 µm)
→ Regen (bei hoher vertikaler Luftbewegung): bis 5 mm (kaum größer, da dann Eisstadium)
→ Graupel (bei hoher vertikaler Luftbewegung): bis 5 mm
→ Hagel (bei extrem hoher vertikaler Luftbewegung):
- in gemäßigten Breiten 5 - 50 mm
- in den Tropen: 100 - 120 mm keine Seltenheit ($d_{\max} \approx 170$ mm, Nebraska/USA, 2003)

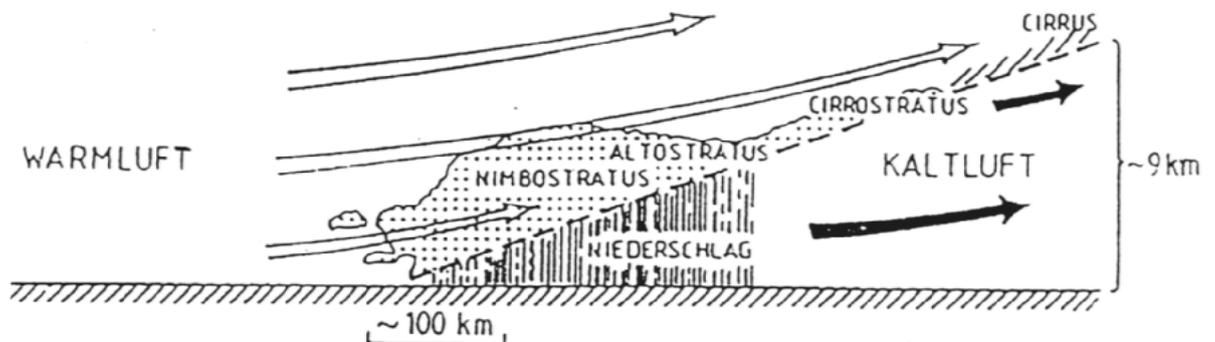
► **Prozesse der Wolken- und Niederschlagsbildung:**

- a) *Ausstrahlung infolge fehlender Bewölkung:*
- verursacht eine nächtliche Abkühlung der bodennahen Luftschicht
 - Bildung von Bodennebel → abgesetzter Niederschlag (vgl. Abschnitt 3.2)
- b) *Abkühlung über einer kalten Unterlage:*
- Abkühlung über Schnee, kaltem Wasser, kaltem Boden
 - Nebelbildung → abgesetzter Niederschlag (vgl. Abschnitt 3.2)
- c) *Mischung kalter und warmer Luft:*
- Mischungsnebel → abgesetzter Niederschlag (vgl. Abschnitt 3.2)
- d) *Abkühlung von aufsteigenden Luftmassen bis zum Erreichen der Sättigung:*
- fallender Niederschlag (vgl. Abschnitt 3.2)
 - wegen der vergleichsweise zum abgesetzten Niederschlag höheren Niederschlagsmengen hydrologisch besonders bedeutsam
 - Ursachen für ein Aufsteigen von Luft (Mitteleuropa):
 - zyklonale Niederschläge
 - orographische Abkühlung
 - konvektive Abkühlung

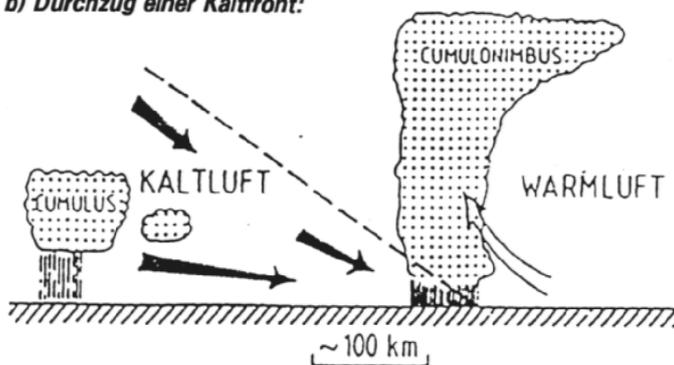
► **zyklonale Niederschläge:**

- Verlagerung von Tiefdruckgebieten und der dazugehörigen Frontensysteme (vgl. Bild 3.1)
- für die gemäßigte Klimazone maßgebende Niederschlagsart

a) **Durchzug einer Warmfront:**



b) **Durchzug einer Kaltfront:**



Erklärung der Wolkentypen:

Cirrus	Federwolke
Cirrostratus	Schleierwolke
Altostratus	mittelhohe Schichtwolke
Nimbostratus	tiefe Schichtwolke
Cumulus	Haufenwolke
Cumulonimbus	hochreichende Schauer- bzw. Gewitterwolke

Bild 3.1: Wettererscheinungen beim Durchgang einer Zyklone (aus BAUMGARTNER, LIEBSCHER, 1990)

- Frontensysteme gekennzeichnet durch **Warm-** und **Kaltfront**
- Charakteristik **Warmfrontniederschlag**:
 - lang anhaltend
 - geringe bis mittlere Intensität
 - dennoch in der Summe oft ergiebig
 - hydrologisch relevant z.B. für Hochwasserentstehung bei lang anhaltender Überregnung größerer Einzugsgebiete (ca. > 10 000 km²)
- Charakteristik **Kaltfrontniederschlag**:
 - kurze Dauer (Schauer, Gewitter)
 - i.d.R. höhere Niederschlagsintensitäten als Warmfrontniederschlag
 - hydrologisch relevant z.B. für Hochwasserentstehung kleiner Einzugsgebiete (< 500 km²), selten für mittlere und große Einzugsgebiete

► **orographisch bedingte Niederschläge:**

- Aufsteigen und Abkühlung der Luft, hervorgerufen durch Geländeerhebungen (Gebirge)
- Entstehung von Niederschlägen auf der Luvseite der Gebirge → Stauniederschläge (s. Bild 3.2)
- hydrologisch relevant z.B. für die Hochwasserentstehung im Oberlauf der Flüsse, besonders dann, wenn eine Überlagerung durch ein zyklonales Frontensystem besteht

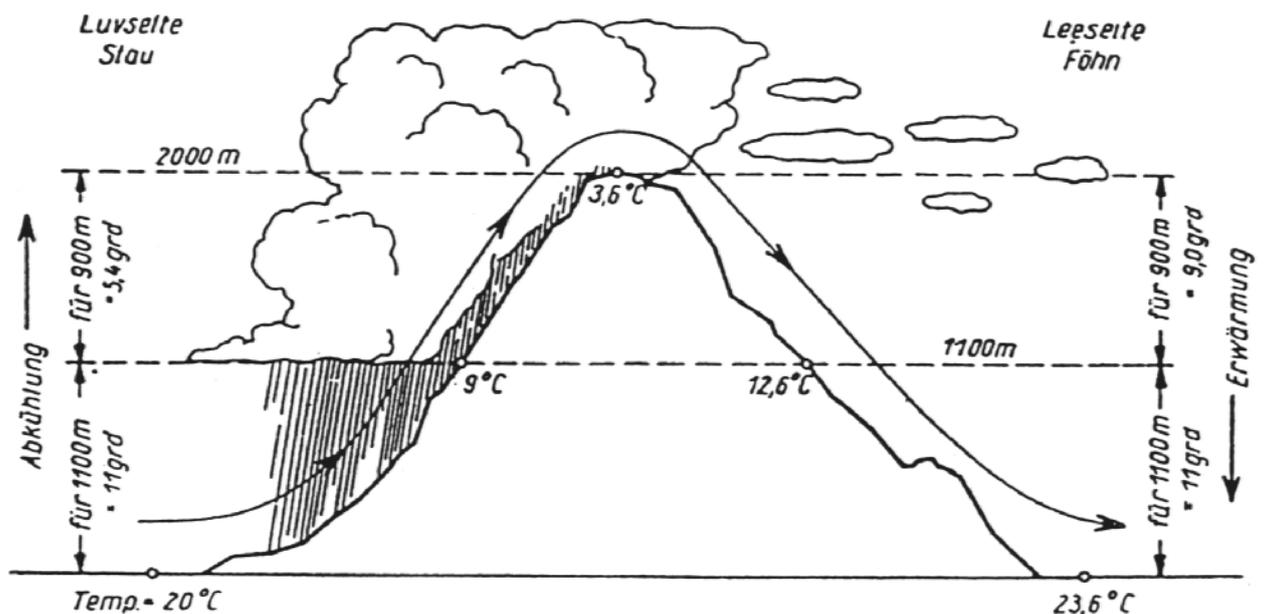
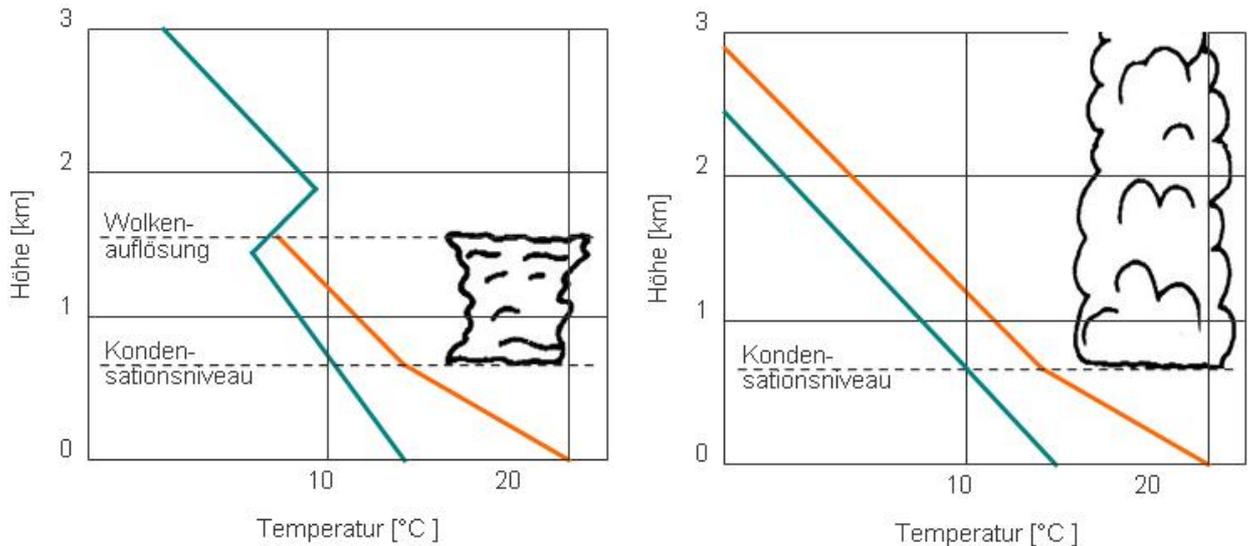


Bild 3.2: Wolken-, Niederschlags- und Temperaturverhältnisse auf der Luv- bzw. Leeseite eines Gebirges (aus HEYER, 1975)

► **konvektive Abkühlung:**

- hervorgerufen durch aufsteigende Luftmassen über einer erhitzten Oberfläche → Bildung von Wolken und Niederschlag
- Art von Wolken und Niederschlag abhängig vom Zustand der Atmosphäre (stabile bzw. labile Schichtung, vgl. Bild 3.3), insbesondere bei labiler Schichtung starke Niederschläge möglich



a) (feucht)stabile Luftschichtung

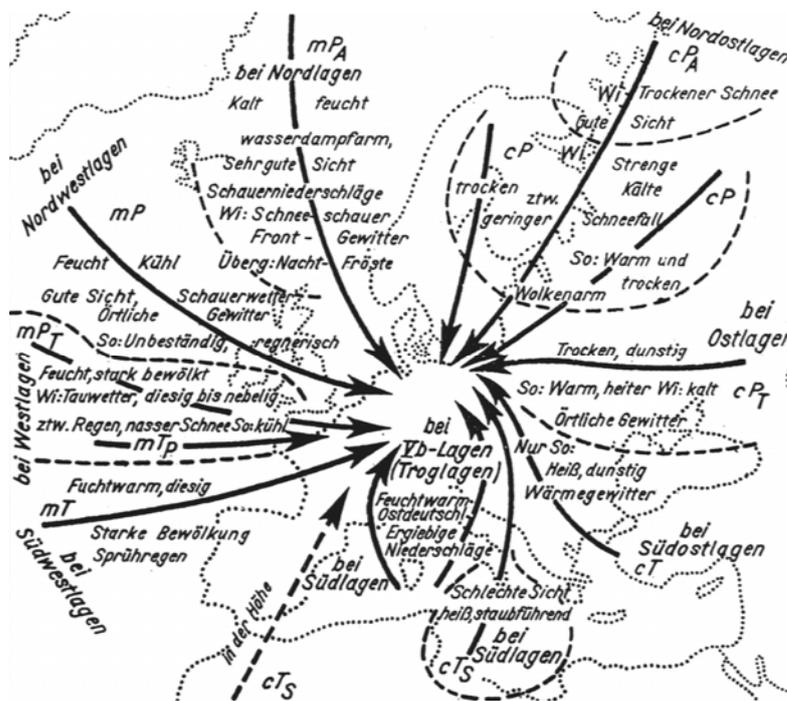
b) (feucht)labile Luftschichtung

- tatsächlicher Temperaturverlauf (tatsächlicher Zustand der Atmosphäre, sog. **Zustandskurve**)
- adiabatischer (theoretischer, physikalisch bedingter) Temperaturgradient (sog. **Adiabate**):
 Abkühlung trockener Luft (relative Luftfeuchte RLF < 100 %) um 1 °C je 100 m Höhenzunahme
 Abkühlung wasserdampfgesättigter Luft (RLF = 100 %) um 0,6 °C je 100 m Höhenzunahme

Bild 3.3: Wolkenbildung in Abhängigkeit vom Zustand der Atmosphäre (nach HEYER, 1975)

*** hydrologisch relevante Wetterlagen (bezüglich des Niederschlages):**

- ▶ bestimmte Wetterlagen (Hoch- und Tiefdruckverteilung über Europa) bedingen die Verlagerung bestimmter Luftmassen, die durch charakteristische Eigenschaften (kalt, warm, feucht, trocken) gekennzeichnet sind (s. Bild 3.4 sowie Tabelle 3.2)



- P Polarluft
- T Tropikluft
- A Arktis
- S Sahara
- c kontinental
- m maritim

Bild 3.4:

Wetterlagen und Luftmassenströme nach Mitteleuropa (nach SCHREIBER, 1957)

► **ausschlaggebende Faktoren für die Eigenschaften einer Luftmasse:**

- das Entstehungsgebiet
- der Verlagerungsweg der Luftmasse

Tabelle 3.2: Entstehung, Verlagerungsweg und Eigenschaften der Luftmassen in Mitteleuropa

Gattung	Bezeichnung	Benennung	Luftmasse	Wetterkartenbezeichnung	Ursprungsgebiet	Weg	Eigenschaften	
P	P _A	Arktische Polarluft	cP _A	Nordsibirische Polarluft	Arktis	Nordsibirien	Osteuropa	extrem kalt
			mP _A	Arktische Polarluft		Arktis	Nordmeer (östlich Island)	sehr kalt, feucht
	P	Polarluft	cP	NE-europäische Polarluft		NE-Europa	Osteuropa	kalt
			mP	Grönländische Polarluft		Arktis	Grönlandmeere (westlich Island)	kalt, feucht
	P _T	Rückkehrende (gealterte) Polarluft	cP _T	Rückkehrende Polarluft		Arktis	SE-Europa	trocken
			mP _T	Erwärmte Polarluft		Arktis	Azorenraum (Atlantik südlich 50° N)	feucht
T	T _A	Gemäßigte (Tropik-)Luft	cT _P	Festlandsluft	Gemäß. Zone	Mitteleuropa	–	–
			mT _P	Meeresluft		NE-Atlantik	England	feucht, mild
	T	Tropikluft	cT	Asiatische Tropikluft	Tropen und Subtropen	Naher Osten (südlicher Balkan)	SE-Europa	trocken
			mT	Atlantische Tropikluft		Azorenraum	W-Europa	feucht, warm
	T _S	Afrikanische Tropikluft	cT _S	Afrikanische Tropikluft		Sahara	–	trocken, heiß
			mT _S	Mittelmeer-Tropikluft		Afrika	Mittelmeer	schwül

► **Wetterlagen, die in Bezug auf Niederschlagshöhen, -dauer und Hochwasserentstehung von hydrologischer Bedeutung sind** (s. Bilder 3.4 und 3.5):

- **Nordwestlage:** bei langsamer Tiefdruckverlagerung ergiebige Sommerniederschläge (Dauerregen) → Hochwassergefahr für mittlere und große Einzugsgebiete
- **Südwestlage:** Regen, im Spätwinter oft verbunden mit Tauwetter → allgemeine Hochwassergefahr (sowohl für kleine als auch für große Einzugsgebiete)
- **Südostlage:** Gefahr kräftiger Sommergewitter, besonders im Gebirge → Hochwassergefahr für kleinere Einzugsgebiete im Mittelgebirge
- **V_b-Wetterlage (Tief über Oberitalien):**
 - lang anhaltende ergiebige Niederschläge infolge des großräumigen Aufgleitens von feucht-warmen Luftmassen des Mittelmeerraumes mit feucht-kalten Atlantik-/Nordseeluftmassen
 - Dauer-Starkregen über Ost- und Süddeutschland, im Gebirge verstärkt durch Stauererscheinungen
 - akute Hochwassergefahr besonders für ost- und süddeutschen Mittelgebirgseinzugsgebiete, aber auch für größere Einzugsgebiete (z.B. Oder, Elbe), z.B. Oderhochwasser Sommer 1997 und Elbehochwasser 2002 entstanden infolge V_b-Wetterlagen

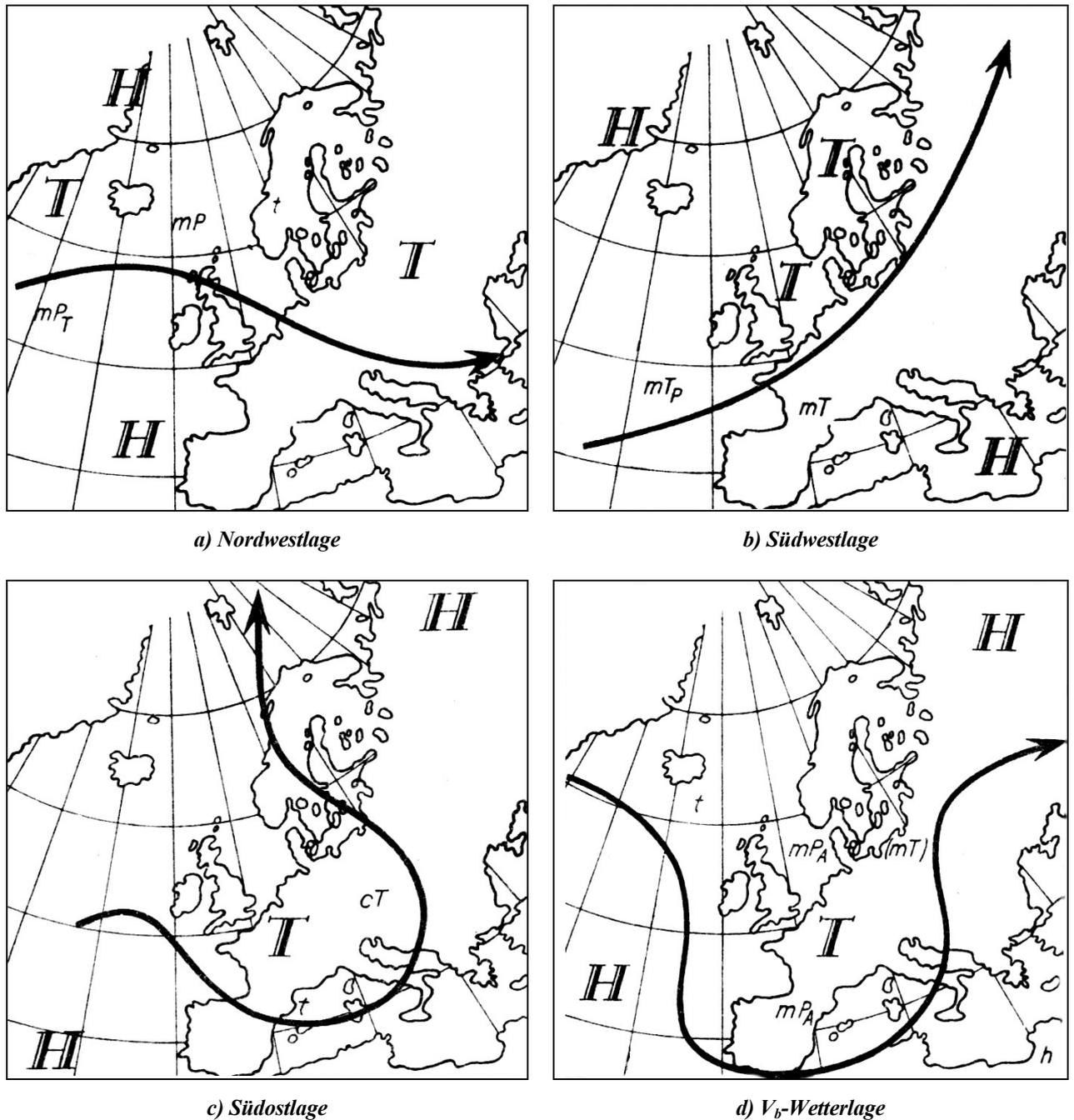


Bild 3.5: Ausgewählte Wetterlagen über Mitteleuropa mit hydrologischer Relevanz (aus HEYER, 1975)

3.2. Niederschlagsarten

* Charakterisierungsmöglichkeiten der Niederschlagsarten:

- vielfältige Charakterisierungsmöglichkeiten
- hydrologisch gebräuchliche Möglichkeiten der Charakterisierung:
 - a) nach dem Aggregatzustand und der Erscheinungsform
 - b) nach dem Entstehungsprozess
 - c) nach der Dauer und der Intensität
 - d) nach dem Flächenbezug

*** Systematisierung der Niederschlagsarten:**

- Systematisierung s. Tabelle 3.3

Tabelle 3.3: Systematik Niederschlagsarten

Aggregatzustand und Erscheinungsform			
fest	flüssig	gemischt (fest + flüssig)	unterkühlt (flüssig, aber bei Auftreffen auf den Boden sofort gefrierend)
Entstehungsprozess			
Fallender Niederschlag		Abgesetzter/abgefangener Niederschlag	
<ul style="list-style-type: none"> - Sprühregen ($d < 0,5$ mm) - Regen ($d = 0,5 \dots 5$ mm) - Schnee ($T_{\text{Wolke}} < -12$ °C) - Graupel ($d < 5$ mm) - Hagel ($d > 5$ mm) 		<ul style="list-style-type: none"> - Tau (Absetzen bei $T > 0$ °C) - Rauhref (T < 0 °C) - Raufrost (T < 0 °C und Wind) - Glatteis 	
Bildung in der Atmosphäre		Bildung am Erdboden	
Messung relativ unkompliziert		Messung nahezu unmöglich	
Dauer und Intensität			
Dauerregen (Landregen): <ul style="list-style-type: none"> - Definition abhängig vom Klimagebiet - Mitteleuropa: ununterbrochene Regenfälle mit einer Intensität $PI > 0,5$ mm/h über einen Zeitraum von $t > 6$ h 		Schauer: Niederschlag von kurzer Dauer und meist hoher (z.T. rasch wechselnder) Intensität	
Starkregen: <ul style="list-style-type: none"> - starke Regenfälle unterschiedlicher Dauer (Dauerregen, Schauer) und hoher Intensität - quantitative Charakterisierung → s. Abschnitt 3.5 			
Flächenbezug			
Punktniederschlag: gemessener Niederschlag einer meteorologischen Station (Punktwert)		Gebietsniederschlag: für ein bestimmtes Gebiet (z.B. Einzugsgebiet) repräsentativer Niederschlagswert → hydrologisch relevante Größe	

3.3. Niederschlagsmessung (punktuelle Messung)*** Messbarkeit des Niederschlages:**

- abgesetzter/abgefangener Niederschlag mit den derzeit üblichen Regenmessern (die hauptsächlich den fallenden Niederschlag erfassen) nicht oder nur schwer messbar (Spezialgeräte: Nebelfänger nach GRUNOW, Nebelsammler → „Auskämmen“ des Nebelniederschlages durch eine Teflonharfe) → bleibt für hydrologische Betrachtungen, bei denen die Niederschlagsmessung ohne Spezialgeräte erfolgt, meist unberücksichtigt
- fallender Niederschlag gut messbar (s.u.)

*** Arten von punktuellen Niederschlagsmessgeräten:**

- nichtregistrierende Geräte (Niederschlagssammler)
- registrierende Geräte (Niederschlagsschreiber)

*** nichtregistrierende Geräte - Niederschlagssammler:**

- **HELLMANN'scher Regenmesser**
- Messung (Auslitern) zu festgesetzten Zeiten (in Deutschland i.d.R. einmal am Tag um 7:00 Uhr MEZ oder zu 3 Zeiten: 7:00 Uhr, 14:00 und 21:00 Uhr MEZ)
- konstruktiver Aufbau (vgl. Bild 3.6):
 - Auffangfläche, Trichter, Sammelkanne
 - Auffangflächen variieren:
 - Deutschland/Österreich: Regenmesser nach HELLMANN mit 200 cm²
 - USA: Messgerät des US Weather Bureau mit 324 cm²
 - Frankreich: Französischer Wetterdienst mit 400 cm²
- spezielle Art des nichtregistrierenden Niederschlagssammlers: sog. **Totalisator**
 - konstruktiver Aufbau s. Bild 3.8
 - verwendet in schwer zugänglichen Gebieten, in denen keine tägliche Leerung/Messung möglich (Hochgebirge, Wüsten ...)
 - Messung der Gesamtniederschlagsmenge über einen längeren Zeitraum (z.B. Winterhalbjahr)
 - bei Verwendung im Gebirge meist mit Windschutzring → Reduzierung Windfehler
 - teilgefüllt mit einem Anti-Frost-Mittel (78 %-ige Kaliumchloridlösung)

*** registrierende Geräte - Niederschlagsschreiber:**

► **Niederschlagsschreiber nach dem Schwimmerprinzip:**

- konstruktiver Aufbau s. Bild 3.7
- Verwendung vorrangig in größeren Stationen
- Schreibtrommel mit täglichem oder wöchentlichem Laufwerk
- Genauigkeit (zeitliche Auflösung): 2 - 3 min (Tageslaufwerk)

→ **Auswertung von Schreiberaufzeichnungen** → s. Übung 2 (Teilaufgabe a)

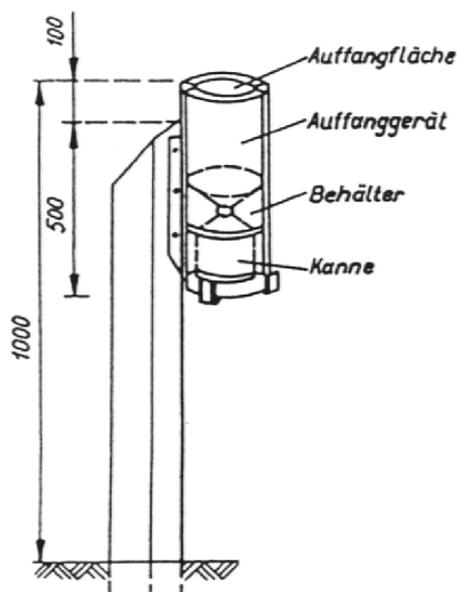
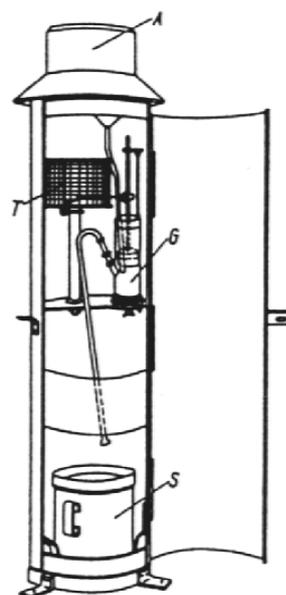


Bild 3.6: HELLMANN-Regenmesser



A - Auffanggefäß mit Trichter
G - Schwimmergefäß mit Heberrohr
T - Schreibtrommel
S - Sammelkanne

Bilder aus DYCK, PESCHKE (1995)

Bild 3.7: Regenschreiber nach dem Schwimmerprinzip

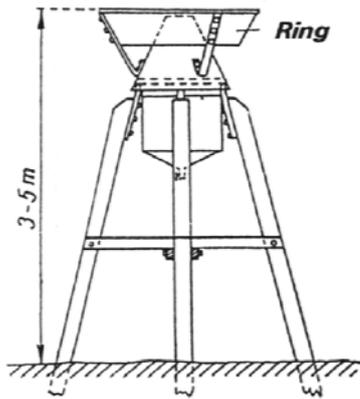


Bild 3.8:

Totalisator mit Windschutzring (aus DYCK, PESCHKE, 1995)

► Kippwaage:

- **Konstruktionsprinzip** → s. Bild 3.9:
- Verwendung oft in automatisch registrierenden (kompakten, digitalen) Stationen
- Wirkungsweise:
- Messwippe (Kunststoff, Leichtmetall) ist vertikal geteilt in 2 gleiche Teile
- instabile Lagerung über eine horizontale Achse → Schwerpunktverlagerung bei Füllung infolge Niederschlag
- Registrierung der Anzahl der Kippbewegungen → elektrischer Impuls
- Registrierung aller 0,05 mm Niederschlag (bei hoch exakten Geräten)
- **Vorteil:** unkomplizierte Digitalisierung
- **Nachteile:**
 - a) Das Kippgefäß benötigt eine (wenngleich geringe) Zeit zum Kippen, d.h. Im Falle einer hohen Regenintensität wird das Gerät während des Kippens weiter gefüllt → Das Auslaufvolumen ist folglich größer als bei geringer Regenintensität.
 - b) Nach Regenende bleibt das Kippgefäß i.d.R. teilweise gefüllt (Verdunstungsfehler)
 - c) Regenbeginn und -ende besonders im Falle geringer Regenintensität nicht genau registrierbar

Abhilfe: Messung (Auslitern) der während des Messzeitraumes (1 Tag, 1 Woche) im Sammelgefäß gespeicherten Gesamtniederschlagsmenge → Eichung (Gesamtanzahl der registrierten Impulse = Gesamtniederschlagsmenge → Eichung auf Einzelimpuls)



a – Messwippe

b – Impulsgeber

Bild 3.9:

Prinzip der Kippwaage (Foto: Dr. Friedrichs & Co.)

► Ombrometer:

- Messung der Gewichtszunahme infolge Niederschlag → positive Gewichtsänderung → $P > 0$, keine bzw. negative Gewichtsänderung → $P = 0$
- automatische Korrektur von Wind- und anderen Einflüssen
- hohe Niederschlagsintensitäten (bis 50 mm/min) messbar → derzeit genauestes Messgerät

* generelle Messfehler (unabhängig von der Art des Niederschlagsmessers):

► **Fehlerursachen:**

- Wind → Überwehung des Messgerätes (mittlere jährliche Fehlerhöhen für Mitteleuropa: Schauer- und Gewitter: < 1 %, Landregen: 1 - 5 %, Schnee und Nieselregen: 15 - 35 %)
- Benetzung der Auffangfläche und des Trichters durch Niederschlag, ehe es zum Abfluss in das Sammelgefäß kommt (für Mitteleuropa: 5 - 10 % im Jahresmittel)
- Verdunstung insbesondere aus dem Sammelgefäß aber auch von anderen Teilen (für Mitteleuropa: 1 - 3 % im Jahresmittel)

► **Schlussfolgerungen:**

- alle Fehler führen dazu, dass mit den Messgeräten zu wenig gemessen wird
- mittlerer jährlicher Gesamtfehler liegt in Deutschland bei etwa 10 % → Korrektur der Niederschlagsdaten um + 10 %, falls keine genaueren Informationen zur Messstation vorliegen
- bei Vorliegen genauerer Informationen zur Messstation → monats- und gebietsvariable Korrektur nach RICHTER empfehlenswert → vgl. Tabelle 3.4

Tabelle 3.4: Prozentuale Korrekturen der Niederschlagswerte nach RICHTER (1995)

Geb./Lage	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	
A a	20,8	23,6	20,0	16,0	12,0	10,3	10,5	10,3	11,5	13,6	16,2	18,9	
	b	17,3	17,9	15,5	13,6	10,8	9,2	9,4	9,3	10,2	11,2	12,9	14,6
	c	13,4	13,7	12,6	11,6	9,8	8,4	8,5	8,4	9,1	9,7	10,6	11,6
	d	9,5	9,6	9,4	9,4	8,5	7,3	7,5	7,3	7,8	7,8	8,0	8,4
B a	27,5	29,0	23,6	18,2	12,3	10,3	10,5	10,5	12,1	14,2	19,1	22,7	
	b	20,5	21,5	17,8	15,0	10,9	9,3	9,4	9,5	10,9	11,6	15,0	17,3
	c	15,2	15,8	14,0	12,4	9,8	8,3	8,6	8,6	9,6	10,2	12,0	13,2
	d	10,3	10,7	10,0	9,6	8,5	7,3	7,5	7,5	8,2	8,2	8,7	9,2
C a	31,6	33,5	26,9	18,3	12,5	10,4	10,8	10,5	12,6	15,5	21,8	26,5	
	b	23,3	24,5	20,3	15,1	11,1	9,8	10,0	9,5	11,5	12,7	16,8	19,8
	c	17,3	17,9	15,5	12,7	10,1	8,8	9,1	8,5	10,2	11,0	13,3	15,0
	d	11,5	11,8	10,7	10,0	8,6	7,7	8,0	7,5	8,7	8,8	9,5	10,3
D a	31,7	30,5	25,6	18,8	10,4	8,1	7,9	8,2	9,6	13,4	21,3	26,9	
	b	23,0	22,2	19,4	15,0	9,0	7,2	7,1	7,3	8,6	10,6	16,0	19,7
	c	16,2	15,7	14,3	11,9	8,0	6,5	6,3	6,6	7,7	8,8	12,1	14,4
	d	10,6	10,2	9,6	8,7	6,7	5,7	5,6	5,8	6,5	6,8	8,3	9,5

Gebietszuordnung (Geb.):

- A: westlicher Teil des Norddeutschen Tieflandes einschließlich Schleswig-Holstein und Rheintal sowie Südwestdeutschland ohne westliches Saarland und Schwarzwald
- B: mittlerer Teil des Norddeutschen Tieflandes sowie westliche Mittelgebirge von der Eifel bis zum Westharz und der Bereich zwischen Frankenhöhe, Steigerwald und Oberpfälzer Wald bis 700 m NN
- C : östlicher Teil des Norddeutschen Tieflandes und östliche Mittelgebirge bis 700 m NN
- D: Alpenvorland südlich der Donau sowie Schwäbische Alb und Bayerischer Wald bis 1000 m NN

Kennzeichnung der Stationslage (Lage): a - frei, b - leicht geschützt, c - mäßig geschützt, d - stark geschützt

- Minimierung der Fehler ferner möglich durch:
 - Verwendung von Windschutzrängen bzw. Windschutzzäunen → Minimierung Windfehler
 - bodenebener Einbau des Regenmessers → Minimierung Windfehler (Problem: Schnee)

3.4. Ermittlung des Gebietsniederschlages

* **Messung mittels Radarmethode:**

- direktes Verfahren zur Ermittlung des mittleren Gebietsniederschlages, Prinzip → s. Bild 3.10
- Niederschlagsintensität = f (Streuwinkel der Reflexionswellen)
- Entfernung des Niederschlages vom Beobachtungspunkt (Messpunkt) = f (Echolaufzeit)
- Eichung i.d.R. unter Einbeziehung punktueller Messwerte → Beispiel s. Bild 3.11

► **arithmetisches Mittel:**

- arithmetisches Mittel aller Niederschlagsstationen ($a_i = 1$ für $i = 1 \dots n$)
- Anwendung z.T. im Flachland bei gleichmäßiger Verteilung der Stationen und geringen Unterschieden der beobachteten Niederschlagshöhen
- Niederschlagsstationen in der Nähe des Untersuchungsgebietes sollten einbezogen werden

► **THIESSEN-Polygonmethode:**

- geeignete Methode für Gebiete im Flachland
- Ziel: Zuordnung einer repräsentativen Fläche um jeden Niederschlagsmesser
- Wichtung unter Berücksichtigung einer ungleichmäßigen Stationsverteilung
- Prinzip der Methode (s. auch Beispiel im Bild 3.12):
 - Einzeichnen aller Niederschlagsstationen in eine maßstäbliche Karte
 - Verbindung aller benachbarter Stationen mittels Geraden
 - Konstruktion der Mittelsenkrechten → Polygon um jede Station
 - Polygon repräsentiert Fläche, die jeder Station zuordenbar ist
 - Ermittlung der Flächeninhalte aller Polygone (Kartendigitalisierung, Planimeter)
 - Ermittlung der Wichtungsfaktoren a_i (Flächenanteile):

$$a_i = A_i / A \quad (3.2)$$

mit a_i - Wichtungsfaktor (Flächenanteil)

A_i - Polygonfläche der i -ten Niederschlagsstation

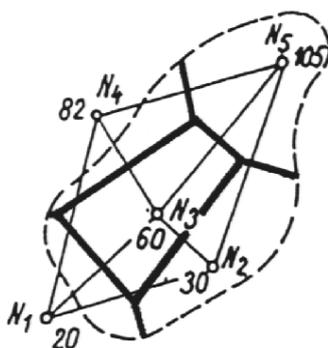
A - Gesamtfläche des untersuchten Gebietes [gleiche Maßeinheit wie A_i]

g) Multiplikation der Niederschläge P_i mit den Flächenanteilen a_i (für jede Station)

h) mittlerer Gebietsniederschlag = Addition aller $P_i * a_i$ (→ vgl. Gleichung 3.1)

- Vorteile der THIESSEN-Polygonmethode: Berücksichtigung von Stationsdichteunterschieden
- Nachteil: keine Einbeziehung des Einflusses der Geländemorphologie

→ Anwendung der THIESSEN-Polygonmethode s. Übung 2 (Teilaufgabe b) sowie Übung 3



Station	P_i [mm]	$a_i = A_i/A_E$ []	$P_{m,i}$ [mm]
(1)	(2)	(3)	(4) = (2) * (3)
N_1	20	0,11	2,2
N_2	30	0,25	7,5
N_3	60	0,28	16,8
N_4	82	0,10	8,2
N_5	105	0,26	27,3
		1,00	62,0 = P_m

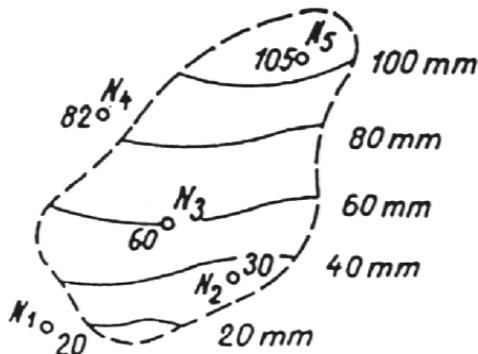
Bild 3.12:

THIESSEN-Polygonmethode

► **Isohyetenmethode (Linien gleicher Niederschlagshöhe):**

- auch im Mittelgebirge genaue Methode zur Gebietsniederschlagsermittlung
- Berücksichtigung des Einflusses der Morphologie
- Anwendung im Flachland und im Mittelgebirge
- Prinzip der Methodik (s. Bild 3.13):
 - Einzeichnen aller Niederschlagsstationen in eine maßstäbliche Karte

- b) Eintrag aller Niederschlagsmengen neben dem jeweiligen Messpunkt
- c) Verbindung aller benachbarter Stationen mittels Geraden → Dreiecksvernetzung
- d) Konstruktion der Isohyeten:
 - durch Isolinenprogramme (z.B. Surfer mittels linearer Interpolation)
 - per Hand mittels Harfe → **Anwendungsbeispiel s. Übung 3**
- e) Ermittlung der Flächengrößen zwischen den Isohyeten des Untersuchungsgebietes
- f) Ermittlung der Wichtungsfaktoren a_i (Flächenanteile, s. Gleichung 3.2)
- g) Multiplikation der Flächenanteile mit dem Mittel der jeweiligen Niederschläge der Isohyetenstufen
- h) mittlerer Gebietsniederschlag = Addition aller $P_i * a_i$



Isolyetenbereich	mittl. Niederschlag P_i [mm]	$a_i = A_i/A_E$ []	$P_{m,i}$ [mm]
(1)	(2)	(3)	(4) = (2) * (3)
< 20	18	0,04	0,7
20 ... 40	30	0,23	6,9
40 ... 60	50	0,21	10,5
60 ... 80	70	0,20	14,0
80 ... 100	90	0,20	18,0
> 100	108	0,12	13,0
		1,00	63,1 = P_m

Bild 3.13:
Isohyetenmethode

► Invers-Distanz-Methode:

- gewichtetes Mittel aller gemessenen Niederschlagswerte in der Umgebung der Stelle, für den der Niederschlag bestimmt werden soll
- Wichtung ist proportional zu den inversen Abständen der Stelle, für den der Niederschlag bestimmt werden soll, zu den Messstellen → **Anwendung der Invers-Distanz-Methode → s. Übung 3**
- Berechnungsgleichung:

$$P = \frac{P_1/d_1 + P_2/d_2 + \dots}{1/d_1 + 1/d_2 + \dots} \quad (3.3)$$

mit P - Niederschlag am unbeobachteten Punkt [mm]

P_i - Niederschlag am Beobachtungspunkt i [mm]

d_i - Abstand des unbeobachteten Punktes vom Beobachtungspunkt i [m, km]

3.5. Starkregen, Bemessungsregen, maximal möglicher Regen

* Starkregen:

- Definition abhängig vom Klimagebiet (keine weltweit einheitliche Definition)
- für Mitteleuropa gilt für Starkregen (Definition nach WUSSOW):

$$P \geq [5t - (t/24)^2]^{0,5} \quad (3.4)$$

mit P - Mindeststarkregenmenge [mm]

t - Regendauer [min]

- Umsetzung der (Un)gleichung 3.4 → s. Tabelle 3.5

Tabelle 3.5: Mindestregelmengen P und Mindestregenintensitäten PI für Starkregen verschiedener Regendauern t (für Mitteleuropa)

t [min]	5	10	15	20	30	45	60	90
P [mm]	5,0	7,1	8,7	10,0	12,2	14,9	17,1	20,0
PI [mm/min]	1,00	0,71	0,58	0,50	0,41	0,33	0,28	0,23
t [h]	2	3	4	5	10	15	20	24
P [mm]	24,0	29,0	33,2	36,6	48,7	55,6	59,3	60,0
PI [mm/min]	0,20	0,16	0,14	0,12	0,08	0,06	0,05	0,04

- mittels (Un)gleichung 3.4 bzw. Tabelle 3.5 lediglich ermittelbar, ob ein Regenereignis ein Starkregenereignis ist oder nicht
- für viele hydrologische Aufgaben reicht dies jedoch nicht aus (z.B. für die Bemessung von wasserwirtschaftlichen und sonstigen Anlagen) → genauere Informationen notwendig

* Bemessungsregen:

► Bedeutung und Merkmale des Bemessungsregens:

- Bemessungsregen interessiert für die hydrologisch-wasserwirtschaftliche Planung von:
 - Durchlässen aller Art (Brücken, Rohre)
 - Bach- und Flussquerschnitten (Dimensionierung, Gestaltung, Uferbefestigung)
 - Kanalisationen (Dimensionierung, Gefälle)
 - verkehrstechnischen, land- und forstwirtschaftlichen Anlagen (Straßen, Gräben, Wege ...)
 - Regen- und Hochwasserrückhaltebecken
- hydrologisch-wasserwirtschaftlich interessierende Merkmale des Bemessungsniederschlags:
 - Niederschlagshöhe P
 - Niederschlagsdauer P_D
 - Regenspende P_S (Regenintensität) und deren zeitlicher Intensitätsverlauf $PI(t)$
 - örtliche Niederschlagsverteilung
 - Häufigkeit des Auftretens n (Wiederkehrintervall, sog. Jährlichkeit $T = 1/n$)

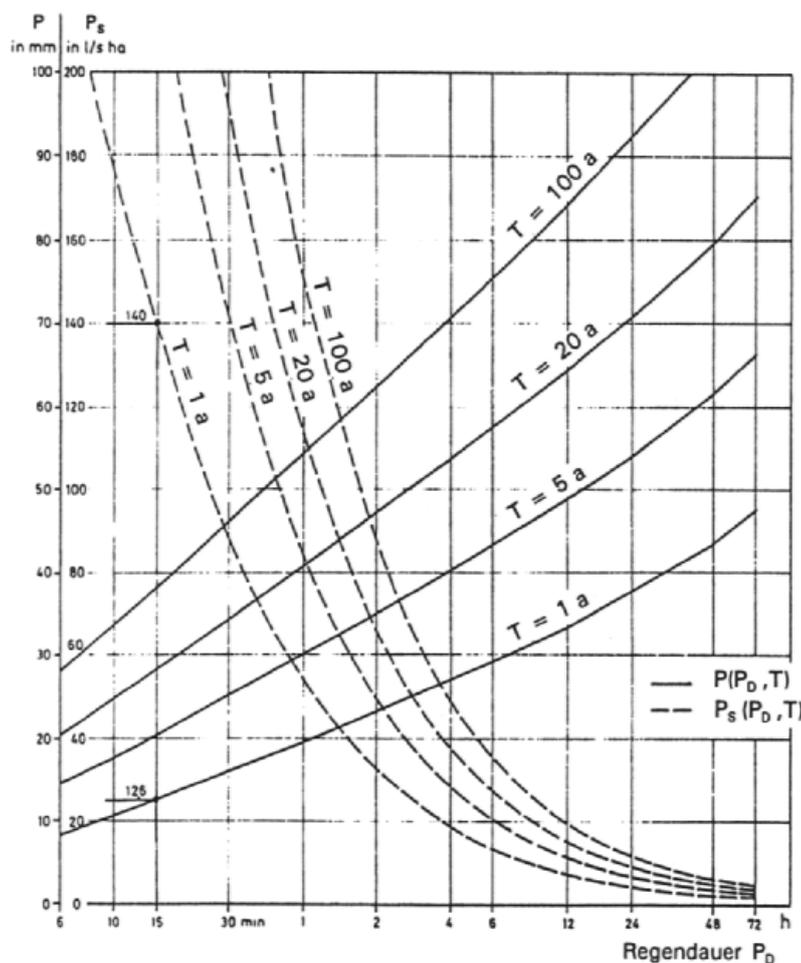
► Ermittlung des Bemessungsregens (Anwendungsbeispiel → s. Übung 4):

- Nutzung statistischer Auswertungen von Niederschlagsmessungen durch den Deutschen Wetterdienst DWD → **Niederschlagsmengen-Dauer-Häufigkeits-Beziehungen** (→ s. Bild 3.14)
- Ermittlung auf Grundlage des Starkregenatlasses KOSTRA des DWD
- für viele praktische Bemessungsfälle Niederschlagsmengen-Dauer-Häufigkeits-Beziehung nicht verfügbar (bzw. Erstellung durch DWD zu teuer)
- **Herangehensweise im Falle des Fehlens von Niederschlagsmengen-Dauer-Häufigkeits-Beziehungen bzw. KOSTRA-Starkregenwerten:**
 - Ausgangswert: Regenspende eines Niederschlags mit 15-minütiger Dauer, der statistisch gesehen 1 Mal pro Jahr auftritt → **Basisbemessungsregenspende $P_S(15,1)$** → Werte bundesweit für viele Städte und Regionen verfügbar (eine Vielzahl von Werten enthält z.B. SCHNEIDER: Bautabellen mit Berechnungshinweisen und Beispielen. 11. Auflage, Werner-Verlag, 1996)
 - Werte für viele Städte und Regionen verfügbar, weil sie u.a. für die Kanalnetzberechnung verwendet werden
 - Werte für verschiedene geographische Regionen Deutschlands → s. Tabelle 3.6

b) Umrechnung der Basisbemessungsregenspende für Dauern $\neq 15$ min und Wiederkehrintervallen $\neq 1$ a z.B. mittels REINHOLD-Formel für $T \leq 20$ a und $P_D \leq 150$ min möglich:

$$P_S(P_D, T) = P_S(15, 1) * \varphi \quad \text{mit } \varphi = 38 (T^{0,25} - 0,369) / (P_D + 9) \quad (3.5)$$

- mit $P_S(P_D, T)$ - Regenspende der Dauer P_D mit einem Wiederkehrintervall T [l / (s ha)]
- $P_S(15, 1)$ - Basisbemessungsregenspende mit einer Dauer von 15 min und einem Wiederkehrintervall von 1 Jahr [l / (s ha)]
- φ - Zeitbeiwert
- T - Wiederkehrintervall (sog. Jährlichkeit) [a]
- P_D - Regendauer [min]



P - Regenmenge
 P_S - Regenspende
 T - Wiederkehrintervall
 P_D - Regendauer

Bild 3.14:
 Niederschlagsmengen-Dauer-Häufigkeits-Beziehung für das mittlere Neckartal (nach SCHRÖDER U.A. (1994))

Tabelle 3.6: Starkregenspenden $P_S(15,1)$ für verschiedene geographische Regionen Deutschlands

Geographische Region	$P_S(15,1)$ [l/s ha]
Nordwestdeutschland	85
Nordost- und Mitteldeutschland	95
Westdeutschland	96
Sachsen und Thüringen	106
Süd- und Südwestdeutschland	119
Großstadtbereich Nord- und Ostdeutschlands	120
Großstadtbereich Süd- und Südwestdeutschlands	140

c) Umrechnung der Regenspende in Regenmenge (Niederschlagshöhe):

$$P(P_D, T) = 0,36 * P_S(P_D, T) * P_D \quad (3.6)$$

mit $P(P_D, T)$ - Bemessungsregenmenge für P_D und T [mm]
 $P_S(P_D, T)$ - Bemessungsregenspende für P_D und T [l/s ha]
 P_D - Regendauer [h]

► **maßgebende Bemessungsregendauer P_D :**

- maßgebende Bemessungsregendauer charakterisiert die Regendauer, die für das Bemessungswiederkehrintervall im betrachteten Gebiet den größten Abflusswert verursacht (sog. Abflusskonzentrationszeit T_C)
 - maßgebende Bemessungsregendauer ist nicht für alle Einzugsgebiete konstant
- maßgebende Bemessungsregendauer hängt vor allem von der Einzugsgebietsgröße und dem Gefälle ab (je größer das Einzugsgebiet und je kleiner das Gefälle, um so länger braucht der Niederschlag, um zu Abfluss zu werden, desto höher sind folglich P_D und T_C)
 - kleine, steile Gebiete reagieren schnell auf Niederschläge → P_D klein (< 1 h)
 - große, flache Gebiete reagieren z.T. wesentlich langsamer, d.h. mit deutlicher Zeitverzögerung auf Niederschläge → P_D groß (> 1 h)

- **Berechnungsansätze für P_D :**

für kleine ($A_E \leq 0,8 \text{ km}^2$) vorwiegend landwirtschaftl. genutzte Einzugsgebiete (KIRPICH-Formel):

$$P_D = T_C = 0,868 (l^3 / \Delta h)^{0,385} \quad (3.7)$$

mit P_D - maßgebende Bemessungsregendauer [h]
 T_C - Konzentrationszeit des Abflusses in einem Gebiet [h]
 l - längster Fließweg im Einzugsgebiet bis zum Gebietsauslass [km]
 Δh - Höhenunterschied von der Einzugsgebietsgrenze bis zum Gebietsauslass [m]

für Wiese und Wald (ebenfalls für kleine Gebiete: $l < 0,4 \text{ km}$), KERBY-Formel:

$$P_D = T_C = 3,03 (r * l^{1,5} / \Delta h^{0,5})^{0,467} \quad (3.8)$$

mit r - Nutzungsbeiwert (Wiese: $r = 0,3 - 0,4$, Wald: $r = 1$)
 (alle anderen Größen → s. Gleichung 3.7)

für Stadtgebiete:

$$P_D = T_C = \frac{0,552 [1,8 (1,1 - \psi(5)) l^{0,5}]}{(\Delta h / l)^{1/3}} \quad (3.9)$$

mit $\psi(5)$ - Abflussbeiwert für $T = 5 \text{ a}$ ($\psi = R / P$, Anteil Abfluss R vom Niederschlag P , vgl. auch Abschnitt 5.6.2)
 (alle anderen Größen → s. Gleichung 3.7)

- bei verschiedenen Nutzungsanteilen in einem Gebiet → Ermittlung des flächengewichteten Mittelwertes der einzelnen maßgebenden Regendauern P_D

► **Wahl des Wiederkehrintervalls des Bemessungsniederschlags:**

- Bemessungswiederkehrintervall bedeutet:
 - projektierte Anlage ist für ein Ereignis, das statistisch gesehen 1 Mal aller T Jahre (T - Wiederkehrintervall) auftritt, bemessen (dimensioniert) ist
 - projektierte Anlage ist folglich nicht für Ereignisse $> T$ bemessen (Restrisiko, sog. hydrologische Sicherheit)
- Wiederkehrintervall und damit Restrisiko richten sich nach:
 - der Bedeutung der Anlage
 - der Gefahr, die von der zu projektierenden Anlage ausgeht
 - der Funktionsdauer der Anlage
- häufig angesetzte Wiederkehrintervalle → s. Tabelle 3.7

Tabelle 3.7: Häufig angesetzte Wiederkehrintervalle für Bemessungsregen und Bemessungshochwasserwellen (für Deutschland)

Hydrologische Bemessungsaufgabe	Wiederkehrintervall T [a]
- Straßentwässerung außerhalb von Ortslagen	1
- Straßentwässerung/Kanalisation in Ortslagen	1 ... 5
- Straßentwässerung im Bereich von Unterführungen	5 ... 20
- Gewässerausbau außerhalb von Ortslagen, kleine Durchlässe	1 ... 20
- Gewässerausbau in Ortslagen	50 ... 1000
- kleine Deiche oder Regen- bzw. Hochwasserrückhaltebecken	10 ... 50
- hohe Deiche, große Rückhaltebecken oder Talsperren (große Sachschäden möglich)	100 ... 200
- hohe Deiche oder Talsperren (Menschenleben gefährdet)	200 ... 1000

► **örtliche und zeitliche Verteilung des Bemessungsniederschlags:**

- zeitliche Niederschlagsverteilung: meist als konstant während der Regendauer angenommen
- örtliche Niederschlagsverteilung: meist als konstant über das Gesamtgebiet angenommen
- Abminderung punktförmig gemessener Niederschläge (z.B. mittels HELLMANN-Regenmesser) bei Übertragung auf große Einzugsgebiete vor allem bei kurzen Niederschlagsereignissen (Schauern, Gewittern) notwendig (s. Bild 3.15), Gebiet wird nicht gleichmäßig überregnet

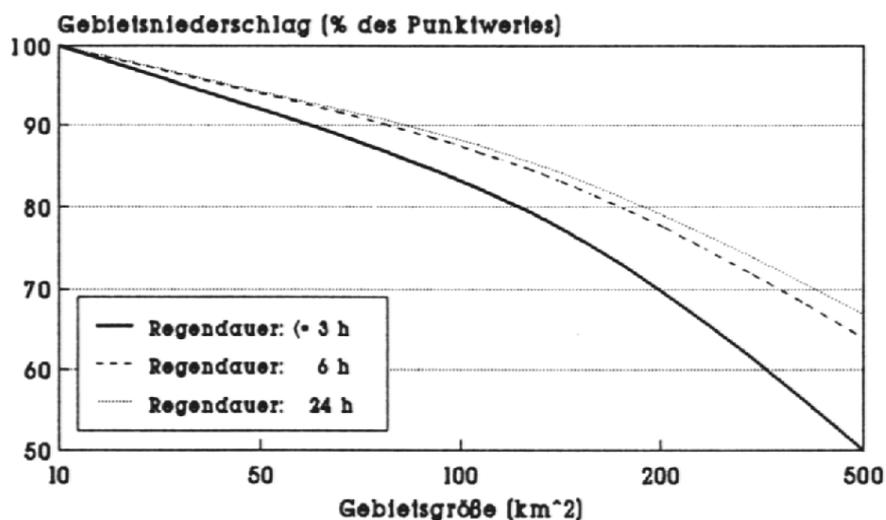


Bild 3.15: Abnahme des Gebietsniederschlags für verschiedene Regendauern und Gebietsgrößen (in % des Punktniederschlags)

*** maximal möglicher Niederschlag:**

- maximal möglicher Niederschlag mmP abhängig vom Klimagebiet
- Kenntnis des maximal möglichen Niederschlages ist von Interesse für:
 - die Berechnung maximal möglicher Hochwässer
 - eine Schadensabschätzung, hervorgerufen durch maximal mögliche Hochwässer
 - die Bemessung großer Talsperren
- Abschätzung des mmP durch die Auswertung bisher weltweit beobachteter maximaler Niederschlagsmengen in Abhängigkeit von der Niederschlagsdauer möglich (s. Bild 3.16)
- weitere Hilfen bei der Abschätzung:
 - numerische Simulation extremer Atmosphärenzustände
 - Maximierungsverfahren (Maximierung von Feuchte und Wind unter Zugrundelegung der bisher beobachteten maximalen Niederschlagsmenge für ein Klimagebiet)
 - statistische Verfahren (Extremwertverteilungsfunktionen mit oberem Grenzwert)

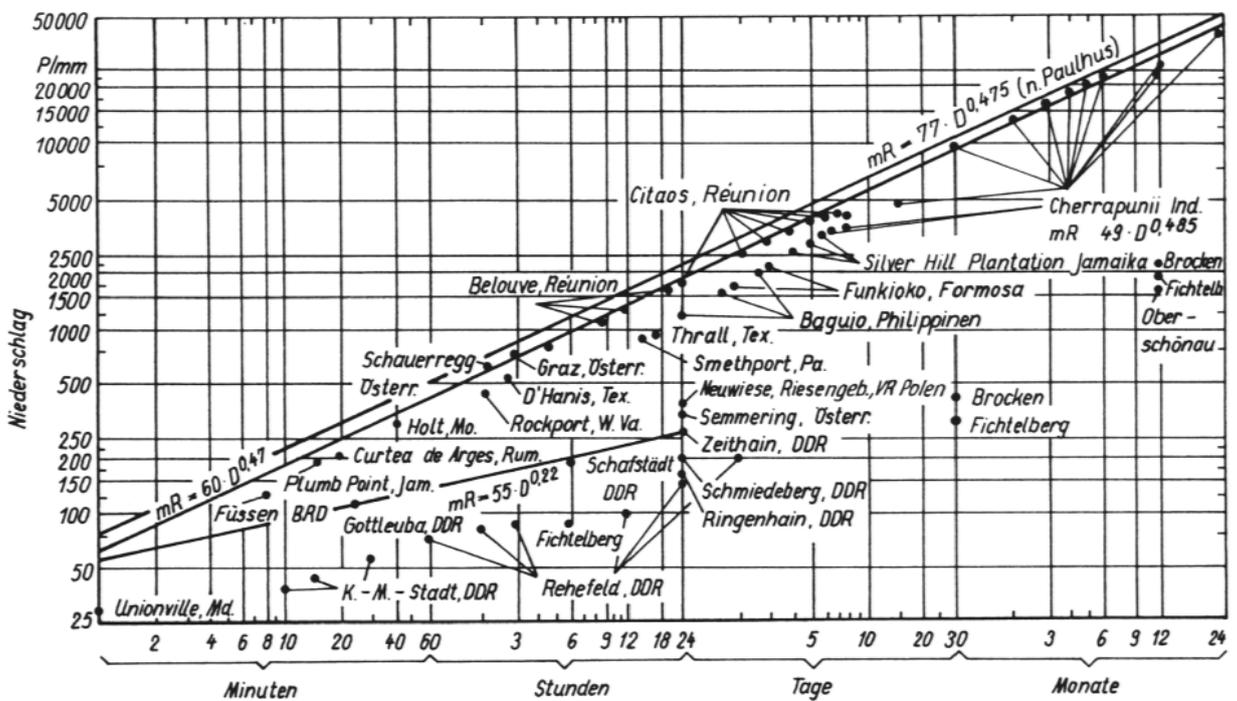


Bild 3.16: Weltweit gemessene maximale Niederschlagsmengen (aus DYCK, PESCHKE, 1995)

- Ableitung der Gleichung 3.10 aus der Geraden in Bild 3.16 für globale Betrachtung des maximal möglichen Niederschlages mmP ohne Berücksichtigung der Klimazonen:

$$mmP = 425 * P_D^{0,475} \tag{3.10}$$

mit mmP - maximal möglicher Niederschlag [mm]
 P_D - Niederschlagsdauer [min]

- für Ostdeutschland gilt in etwa (vgl. auch Bild 3.16):

$$mmP = 55 * P_D^{0,22} \tag{3.11}$$

(alle Größen → s. Gleichung 3.10)

3.6. Globale und saisonale Niederschlagsverteilung

* globale Niederschlagsverteilung:

- abhängig vom Klimagebiet
- globale Verteilung der mittleren jährlichen Niederschlagssumme → s. Bild 3.17
- Maxima in den Tropen und gemäßigten Breiten, Minima in den Subtropen und Polargebieten

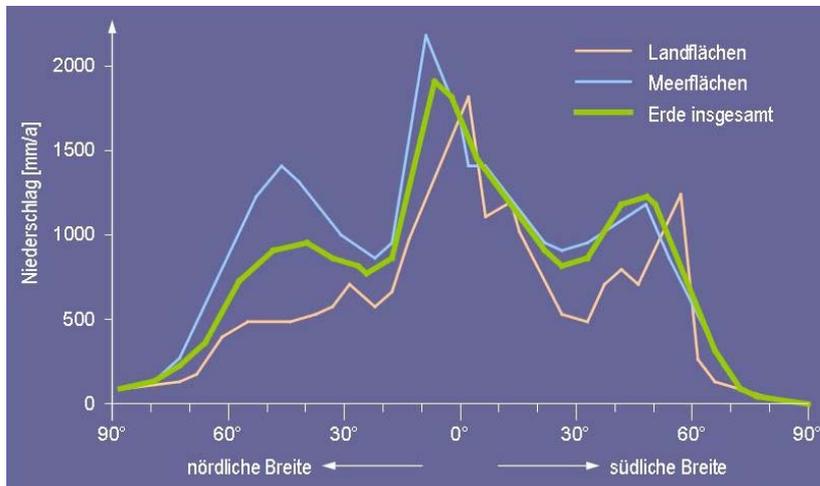


Bild 3.17:

Globale Niederschlagsverteilung
(nach MEINARDUS, 1930)

* saisonale Niederschlagsverteilung:

- saisonale Niederschlagsverteilung der gemäßigten Breiten → s. Bild 3.18

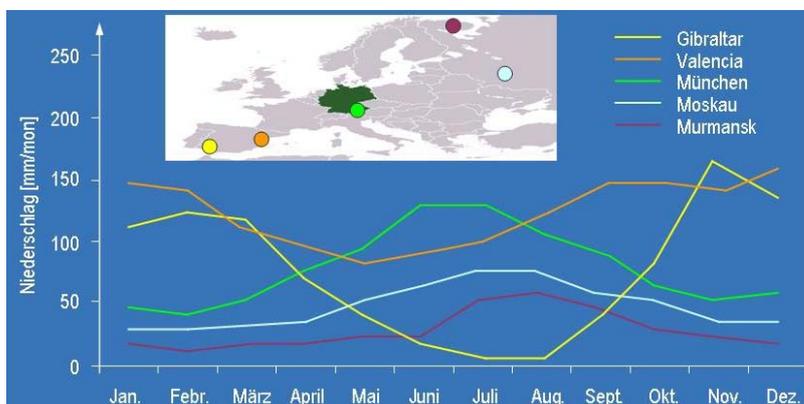


Bild 3.18:

Saisonale Niederschlagsverteilung
der gemäßigten Breiten (nach HEYER, 1975)

- saisonale Niederschlagsverteilung in Deutschland:
 - Niederschlagsmengen gekennzeichnet durch winterliches Minimum und sommerliches Maximum (vgl. auch Bild 3.18)
 - Niederschlagshäufigkeiten dagegen: winterliches Maximum und sommerliches Minimum
- saisonale Niederschlagsverteilung u.a.: von Interesse für:
 - Versorgungssicherheit mit Wasser, u.a. Trinkwasser
 - Beregnungssteuerung in der Landwirtschaft
 - Nutzung von Regenwasser → vgl. Übung 5: Dimensionierung Regenwasser-Sammelanlage
- monatliche und jährliche Niederschlagswerte für ausgewählte deutsche, europäische und außer-europäische Stationen → s. Tabelle 3.8

Tabelle 3.8: Niederschlagswerte P [mm] (unkorrigiert) für ausgewählte deutsche, europäische und außer-europäische Stationen

Station	m NN	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
Schleswig	44	74	60	46	58	61	63	95	104	87	89	73	70	880
Rostock-Warnemünde	4	44	32	33	40	49	54	78	74	60	52	46	43	595
Hamburg	16	57	48	39	52	53	64	84	83	63	59	59	59	720
Neustrelitz	64	37	34	29	44	56	66	70	65	53	52	38	37	581
Berlin	50	41	37	30	39	44	60	67	65	45	45	44	39	556
Hannover	55	50	48	39	47	53	66	83	72	52	57	55	50	672
Potsdam	81	44	39	32	42	47	66	71	71	45	47	46	40	590
Magdeburg	79	35	33	28	34	49	61	64	57	38	43	40	33	515
Brocken (Harz)	1142	158	126	91	105	96	115	143	117	105	122	115	126	1422
Essen	154	73	63	47	61	63	75	86	90	66	67	72	66	829
Leipzig	131	37	36	34	38	47	67	73	59	38	46	39	45	549
Kassel	158	46	43	32	47	58	66	72	66	52	53	49	46	630
Görlitz	237	47	42	44	48	65	71	98	76	52	54	46	45	688
Dresden-Klotzsche	231	38	36	37	46	63	68	109	72	48	52	42	37	648
Erfurt	315	33	31	28	34	58	67	71	55	46	45	34	30	532
Fichtelberg (Erzgeb.)	1213	94	92	79	81	94	101	141	102	87	89	74	77	1109
Nürnberg	319	43	39	35	40	55	71	90	75	46	46	41	42	623
Stuttgart	315	48	42	38	51	74	94	79	79	62	48	48	40	703
München	529	59	55	51	62	107	125	140	104	87	67	57	50	964
Friedrichshafen	407	63	56	53	60	95	112	137	113	93	66	59	54	961
Bergen (Norwegen)	43	179	139	109	140	83	126	141	167	228	236	207	203	1958
Moskau (Rußland)	156	31	28	33	35	52	67	71	74	58	51	36	36	575
Athen (Griechenland)	107	62	36	38	23	23	14	6	7	15	51	56	71	402
Las Vegas (USA)	662	13	11	9	6	2	1	13	12	9	5	8	10	99
Jakutsk (Russland)	103	7	6	5	7	16	31	43	38	22	16	13	9	213
Marrakech (Marokko)	468	28	29	32	31	17	7	2	3	10	21	28	33	241
Lambarene (Gabun)	82	149	157	275	200	244	12	4	5	74	353	393	173	2039
Cherrapunji (Indien)	1312	20	41	179	605	1705	2875	2455	1827	1231	447	47	5	11437

3.7. Anthropogene Niederschlagsbeeinflussung

* unbeabsichtigte Beeinflussungen:

- globale Klima- (und damit u.a. Niederschlagsbeeinflussung) als Folge des Treibhauseffektes
- regionale Beeinflussung (insbesondere Stadtklima):
 - Niederschlagsverkleinerung um ca. 5 - 10 % innerhalb der Stadt
 - Niederschlagserrhöhung auf der Leeseite der Stadt um ca. 5 - 15 % (→ s. auch Bild 3.19)
- **Folgen der regionalen Beeinflussung:**
 - Wärmeinseleffekt (Erhöhung der Konvektion über der Stadt infolge Temperaturerhöhung über der Stadt → verstärkte Wolken- und Niederschlagsbildung besonders im Sommer)
 - Rauhigkeitseffekt (Abbremsung der Luftströmung und Erhöhung der Turbulenzen infolge Bebauung → längeres Verweilen der zyklonalen Niederschläge)
 - Aerosoleffekt (wesentliche Erhöhung des Aerosolgehaltes über der Stadt → Begünstigung der Wolkenbildung und -verstärkung)

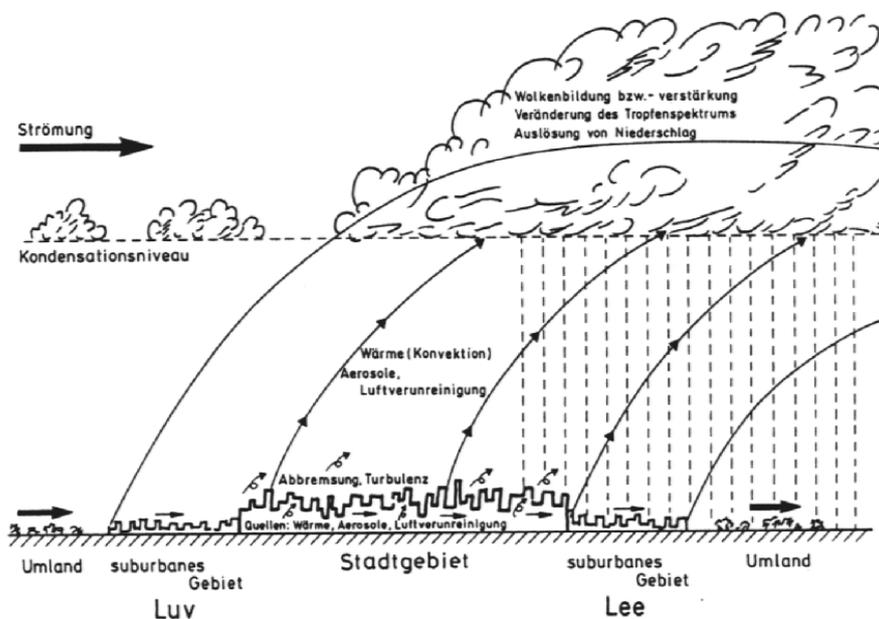


Bild 3.19:

Beeinflussung des Stadtklimas (aus BAUMGARTNER, LIEBSCHER, 1990)

* beabsichtigte Beeinflussungen:

► Ziele der beabsichtigten Beeinflussung:

- Nebelbeseitigung
- Regenvermehrung
- Hagelabwehr
- Wirbelsturmbeeinflussung

► Methodik, Ergebnisse:

- Nebelbeseitigung: örtlich (z.B. auf Flughäfen längs der Start- und Landebahnen) durch Temperaturerhöhung (Infrarotlampen) in bescheidenem Umfang möglich
- Regenvermehrung: durch Impfung der Wolken mit Silberjodid (AgJ) bzw. Trockeneis (Kohlensäureschnee) → Beeinflussung von Tröpfchengröße und Temperaturverteilung innerhalb der Wolken, angewendet vor allem kleinregional in semiariden Gebieten (Erfolgchancen: ≈ 50 %)

- Hagelabwehr: durch gezieltes Beschießen ("Böllerschießen") von Gewitterwolken mit AgJ-Kristallen → Entstehung vieler kleiner Eiskörner statt weniger großer Hagelkörner (Erfolgchancen: bei frühzeitiger Gefahrenerkennung (Wolkenradar) und Eingreifen: > 50 %)
- Wirbelsturmbeeinflussung: AgJ-Wolkenimpfung, Reduzierung der Verdunstung aus dem Meer durch Aufbringen eines dünnen, biologisch abbaubaren Ölfilms (Erfolgchancen: bisher 0 %)

3.8. Schnee

* hydrologische Bedeutung:

- Beeinflussung des Wasserhaushaltes durch vorübergehende Wasserspeicherung in der Schneedecke und zeitverzögerte Wasserabgabe aus der Schneedecke (→ s. Bild 3.20)
- Bedeutung für Wasserhaushaltsuntersuchungen und Hochwasservorhersage

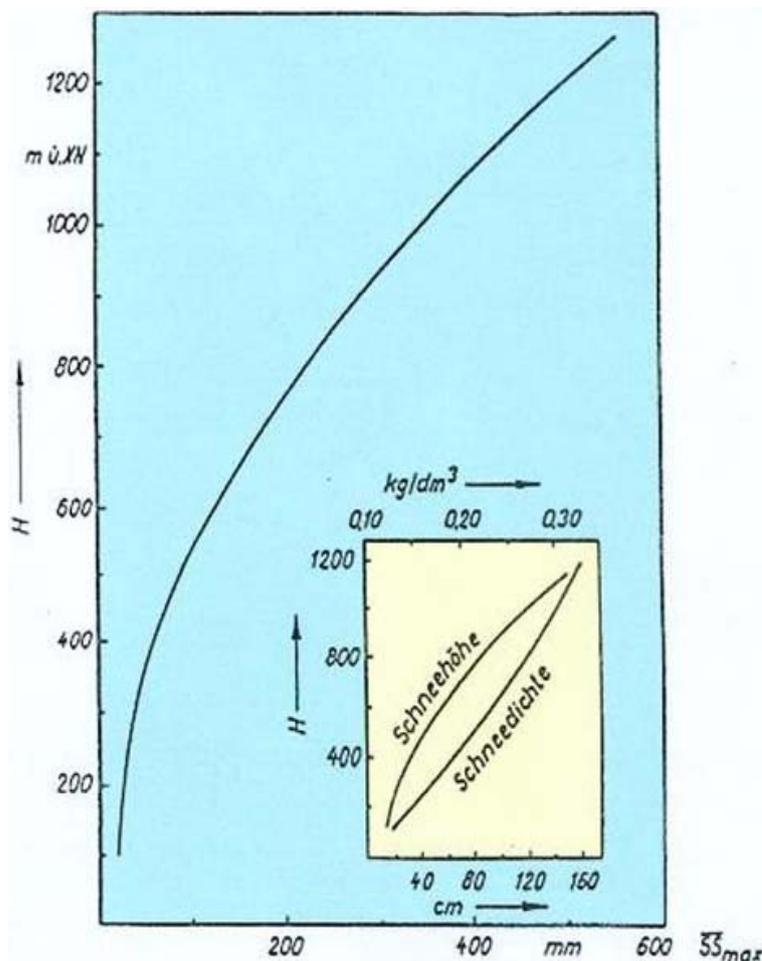


Bild 3.20:

Abhängigkeit des jährlichen mittleren maximalen Wasservorrates der Schneedecke SS_{max} , der Schneehöhe und der Schneedichte von der Geländehöhe für das Erzgebirge (aus GOLF, 1981)

- hydrologisch interessant:
 - Wasservorrat (Äquivalentwassergehalt) der Schneedecke, nur indirekt Schneehöhen oder Art des Schnees (Pulverschnee, nasser Schnee)
 - Schnelligkeit der Wasserabgabe aus der Schneedecke (Schneeschnelzmengen)

*** Abhängigkeit der Wasserspeichereigenschaften des Schnees:**

- vom Wärmeaustausch an der Schneeoberfläche (Strahlung, Konvektion, Kondensation)
- von der Verdichtung infolge Eigengewichts
- vom Einsickern von Schmelzwasser u./o. Regen in die Schneedecke

*** Äquivalentwassergehalt der Schneedecke:**

- Äquivalentwassergehalt der Schneedecke = gespeicherter Wasservorrat → entscheidende Größe in Bezug auf die Abschätzung der potentiellen Hochwassergefährdung (konkrete Hochwassergefährdung kann kleiner der potentiellen Gefährdung sein - abhängig von der Geschwindigkeit der Schneeschmelze)
- Äquivalentwassergehalt messbar durch Ausstechen des Schnees (200 cm²), Aufschmelzen und Auslitern
- Äquivalentwassergehalt berechenbar aus Schneehöhe und Schneedichte:

$$WS_{\bar{A}} = 0,01 * \rho_S * h_S \quad (3.12)$$

mit $WS_{\bar{A}}$ - Äquivalentwassergehalt der Schneedecke [mm]
 ρ_S - Dichte des Schnees [kg/m³]
 h_S - Schneehöhe [cm]

- Problem: Dichte des Schnees von vielen Faktoren abhängig**Hauptfaktoren:**

- Zerbrechen im Wind (→ vgl. auch Tabelle 3.9)
- Diffusion von Wasserdampf (von wärmeren zu kälteren Schneeschichten)
- Verdichtung infolge Eigengewicht
- Einsickern von Schmelzwasser
- Wiedergefrieren von Schmelzwasser
- höhere Dichte von Altschnee im Vergleich zu Neuschnee (Anhaltswerte s. Tabelle 3.9) → beachte Schwankungsbreite → Ermittlung des Äquivalentwassergehaltes der Schneedecke auf der Grundlage von Schneehöhenmessungen und Dichteabschätzungen liefert lediglich grobe Anhaltswerte
- Dilemma: viele Schneehöhenmessungen (dichtes Messnetz), aber wenige Äquivalentwassergehaltsmessungen (Ausstechmethode)

Tabelle 3.9: Anhaltswerte für Schneedichten

Schneebedingungen	Dichte der Schneedecke [kg/m ³]			
	Windstille	schwacher Wind	mäßiger Wind	starker Wind
lockerer Neuschnee (Pulverschnee)	50 ... 65	65 ... 80	250 ... 290	300 ... 360
nasser Neuschnee	400 ... 800			
sich setzender Pulverschnee	70 ... 190			
alter Pulverschnee	200 ... 300			
Firnschnee	500 ... 800			

* **Wasserabgabe aus der Schneedecke infolge Schneeschmelze:**

Übersicht über mögliche Methoden zur Erfassung der Schneeschmelze → s. Tabelle 3.10

Tabelle 3.10: Erfassung der Schneeschmelze - Methodenübersicht

<i>Wärmehaushaltsmethoden</i>	<i>Gekoppelte Wärme-/Wasserhaushaltsmethoden</i>	<i>Empirische Formeln</i>
<p><u>Ausgangspunkt (einfach):</u> Zusammenhang zwischen Wärme- und Wasserhaushalt der Schneedecke: Zur Bildung von 1 mm Schmelzwasser wird eine Energie von 330 kJ/m² benötigt.</p> <p><u>Umsetzung (kompliziert):</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ● Wirken einer Vielzahl von Einflussfaktoren auf den Wärmehaushalt: <ul style="list-style-type: none"> - Temperatur der Luft und des Bodens - Strahlungsangebot - Luftfeuchtigkeit - Windverhältnisse - Wärmezufuhr durch flüssigen Niederschlag ● Erfassung einer Vielzahl von Messgrößen: <ul style="list-style-type: none"> - Temperaturprofile oberhalb der Schneedecke, in der Schneedecke und im Boden - Feuchtigkeitsprofile oberhalb der Schneedecke - Windprofile oberhalb der Schneedecke <p>→ Modellierung sehr aufwendig und sehr genau → Methoden wenig praktikabel</p>		<p><u>Ausgangspunkt:</u> Vereinfachte Wärmehaushaltsverfahren</p> <p><u>Umsetzung:</u> i.d.R. einfache empirische Formeln mit wenigen Parametern:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Lufttemperatur - Luftfeuchtigkeit - Strahlung - Windstärke <p><u>Beispiel:</u> <i>Tagesgradverfahren:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Temperatur T - Tagesgradfaktor k (bewuchsabhängig) <p>→ geeignet für solche Klimate, in denen die Schneeschmelze vorrangig durch Advektion bedingt ist (z.B. Mitteleuropa)</p>

Berechnungsgleichung Tagesgradverfahren:

$$S = k * D \quad (3.13)$$

mit S - Wasserabgabe aus der Schneedecke eines Schneeschmelztages [mm]

D - Tagesmitteltemperatur über der Schmelztemperatur T_{SCHMELZ} (meist T_{SCHMELZ} = 0 °C)

k - Tagesgradfaktor (1,5 ≤ k ≤ 6 mm/Tagesgrad)

k = f (Standortfaktoren, Schneeschmelzverlauf)

Abhängigkeiten der Tagesgradfaktors k von der Vegetation und vom Schneeschmelzverlauf → s. Bild 3.21

Erklärung der Abhängigkeit des Tagesgradfaktors:

- Tagesgradfaktor zu Beginn der Schneeschmelze relativ klein, weil:
 - die Schneedecke erst auf 0 °C erwärmt werden muss
 - am Anfang nur in den wärmsten Teilen des Gesamtgebietes der Schnee schmilzt
 - zu Beginn der Schneeschmelze das Strahlungsabsorptionsvermögen der Schneedecke kleiner ist als im weiteren Verlauf der Schneeschmelze (Schnee noch weiß)
 - die Retention (Speicherung von Schmelzmengen innerhalb der Schneedecke) zunächst die Wasserabgabe aus der Schneedecke verzögert

- höchste Werte der Wasserabgabe bei etwa in der Mitte der Schneeschmelze (25 ... 75 % des ursprünglichen Gesamtwasservorrates zu Beginn der Schneeschmelze):
 - Freilandflächen: hohe Tagesgradfaktoren (5 ... (9) mm/Tagesgrad)
 - Laubwaldflächen: k ca. 2/3 der Freilandflächen (mittlerer Wind- und Strahlungsschutz)
 - Nadelwaldflächen: k ca. 1/3 der Freilandflächen (hoher Wind- und Strahlungsschutz)
- Tagesgradfaktor am Ende der Schneeschmelze wiederum klein, weil:
 - ein Teil des Gebietes bereits schneefrei ist

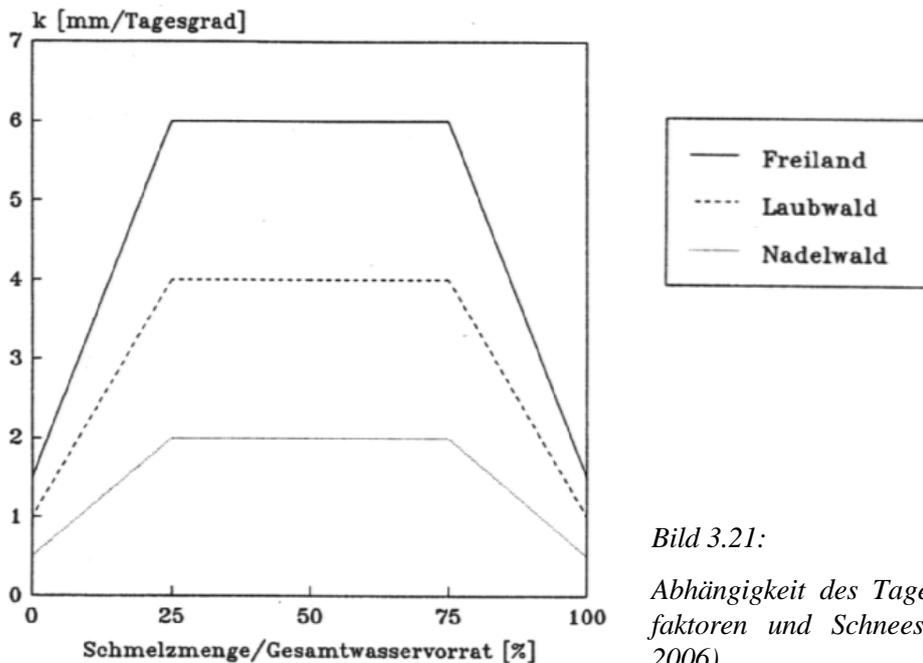


Bild 3.21:

Abhängigkeit des Tagesgradfaktors k von Standortfaktoren und Schneeschmelzverlauf (aus DUNGER, 2006)

4. Die Verdunstung

4.1. Arten und Bedeutung der Verdunstung

Verdunstung = physikalischer Vorgang, bei dem Wassermoleküle vom flüssigen oder festen Zustand in den gasförmigen Aggregatzustand bei Temperaturen unterhalb der Siedetemperatur übergehen, wobei zur Verdunstung von 1 mm Wasser (= 1 l/m²) eine Energie von 0,25 kWs/cm² benötigt wird

Maßeinheit: mm/Zeiteinheit

* Verdunstungsarten:

- **Evaporation E:** Verdunstung basiert ausschließlich auf der Wirkung physikalischer Gesetze
 - Evaporationsarten: E0 - Verdunstung freier Wasserflächen
 - EB - Verdunstung von Boden ohne Vegetationsdecke
 - ES - Verdunstung von schnee- oder eisbedeckten Flächen
 - EI - Interzeptionsverdunstung (von der Pflanzenoberfläche)
- **Transpiration T:** "aktive" Verdunstung durch physiologisch regulierte Abgabe von Wasserdampf durch die oberirdischen Organe der Pflanzen an die Atmosphäre (aktive Regulation durch Spaltöffnungen)
- **Evapotranspiration:** Summe aus Evaporation und Transpiration

*** potenzielle und reale Verdunstung:****► potenzielle Verdunstung ETP:**

- maximal mögliche Verdunstung eines Standortes unter gegebenen meteorologischen Bedingungen bei optimalem Wasserangebot
- Umsetzung des gesamten Energieangebots
- ETP ausschließlich von meteorologischen (atmosphärischen) Größen abhängig (Temperatur, Luftfeuchte, Wind, Strahlung)
- Beispiele für potenziell verdunstende Flächen:
 - Verdunstung von freien Wasserflächen (Seen, Flüsse ...)
 - Verdunstung von feuchtem Boden (nach Regenereignissen bzw. bei Beregnung)
 - Verdunstung aus der Schneedecke

► reale (tatsächliche, aktuelle) Verdunstung ETR:

- an einem Standort tatsächlich auftretender Wert der Verdunstung
- ETR abhängig von den atmosphärischen und Boden- und Bewuchsbedingungen
- für ETR gilt folglich: $ETR \leq ETP$
- Maximalwert der ETR: $ETR = ETP$ (bei optimalem Wasserdargebot)
- Minimalwert der ETR: $ETR = 0$ (bei fehlendem Wasser, z.B. nach langer Trockenperiode)

► Beispiele für den Zusammenhang zwischen ETP und ETR:

- generelle Abhängigkeiten (global) → s. Tabelle 4.1

Tabelle 4.1: Monatliche und jährliche Niederschlagsmengen P , potenzielle Verdunstungsmengen (hier mit E_p bezeichnet) und reale Verdunstungsmengen (hier mit E_a bezeichnet) für ausgewählte Orte der Erde (alle Werte in mm/Δt)

		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Jahr
Jan Mayen	P	39	43	28	24	13	15	20	27	64	56	36	25	390
(Island)	E_p	0	0	0	0	0	50	73	81	59	0	0	0	263
	E_a	0	0	0	0	0	48	64	64	59	0	0	0	235
Oslo	P	51	41	48	43	51	59	83	105	68	88	60	67	764
(Norwegen)	E_p	0	0	0	30	74	106	123	101	64	29	0	0	527
	E_a	0	0	0	30	73	100	113	101	64	29	0	0	510
Offenburg	P	42	35	40	41	46	59	63	67	50	57	48	50	598
(BR Deutschland)	E_p	2	6	22	48	90	113	125	108	72	40	14	5	645
	E_a	2	6	22	48	86	101	107	89	61	40	14	5	581
Rom	P	82	68	73	66	55	40	17	26	65	128	112	98	830
(Italien)	E_p	12	17	32	53	91	124	152	140	99	60	30	15	825
	E_a	12	17	32	53	89	106	90	66	75	60	30	15	645
Ragusa	P	160	102	110	68	39	9	4	13	49	89	86	143	872
(Italien)	E_p	15	16	31	53	94	151	188	179	125	81	42	22	997
	E_a	15	16	31	53	90	103	76	48	60	81	42	22	637
Tamanrasset	P	4	1	1	2	6	4	3	10	7	2	2	2	44
(Algerien)	E_p	19	24	52	85	146	180	179	167	136	94	51	26	1159
Abeche	P	0	0	-	1	24	26	141	232	64	14	0	0	502
(Tschad)	E_p	137	131	174	187	198	191	175	150	157	166	148	129	1943
Djibouti	P	10	13	25	12	5	1	2	8	8	10	22	13	129
(Afargeb.)	E_p	99	109	149	164	190	198	203	198	186	163	138	113	1910
Douala	P	57	82	216	243	337	486	725	776	638	388	150	52	4150
(Kamerun)	E_p	141	127	141	132	137	113	100	100	104	106	120	132	1435
Lusaka	P	218	196	106	21	4	0	0	0	0	15	91	186	837
(Sambia)	E_p	94	82	86	74	59	43	44	59	88	122	110	101	962
Kimberley	P	55	64	72	74	19	13	6	11	11	31	47	58	431
(S-Afrika)	E_p	149	117	98	63	37	20	20	33	53	92	107	136	925

- polare und subpolare Regionen:
im Jahresmittel gilt: $ETR \approx ETP$
im Winter (Polarregion: > 6 Monate, subpolare Region: < 6 Monate): $ETR = ETP = 0$ mm
- gemäßigte Breiten:
im Jahresmittel gilt: $ETR < ETP$
im Sommerhalbjahr: $ETR \ll ETP$ (zumindest in trockenen Sommern)
im Winterhalbjahr: $ETR = ETP > 0$
- semiaride und aride Regionen:
das ganze Jahr hindurch gilt: $ETR \ll ETP$
nur während kurzzeitiger Regenereignisse: $ETR \approx ETP$
ETP-Maximalwerte (Jahressumme der ETP):
Chad-See: $ETP \approx 2200$ mm/a (semiarid: $P \approx 300 - 500$ mm/a)
Najran-Gebiet (Saudi Arabien): $ETP \approx 2700$ mm/a (arid: $P < 250$ mm/a)
Sahara: $ETP > 3500$ (> 4000) mm/a (hyper-arid: $P \approx 0$ mm/a)
- Tropen:
im Jahresmittel gilt: $ETR \approx ETP \gg 0$ (wegen der hohen Niederschläge, vgl. Tabelle 4.1)

* **Einflussfaktoren auf die Verdunstung:**

- **Atmosphäre** (Energie- und Wasserdargebot)
 - **Vegetationsdecke** (Energieumwandlung, Wassertransport und -speicherung)
 - **Boden** (Energieumwandlung und -speicherung, Wassertransport und -speicherung)
- Abhängigkeit der Verdunstungshöhe vom Energie- und Wasserangebot sowie von Boden- und Vegetationsbedingungen (Standortfaktoren) → s. Bild 4.1

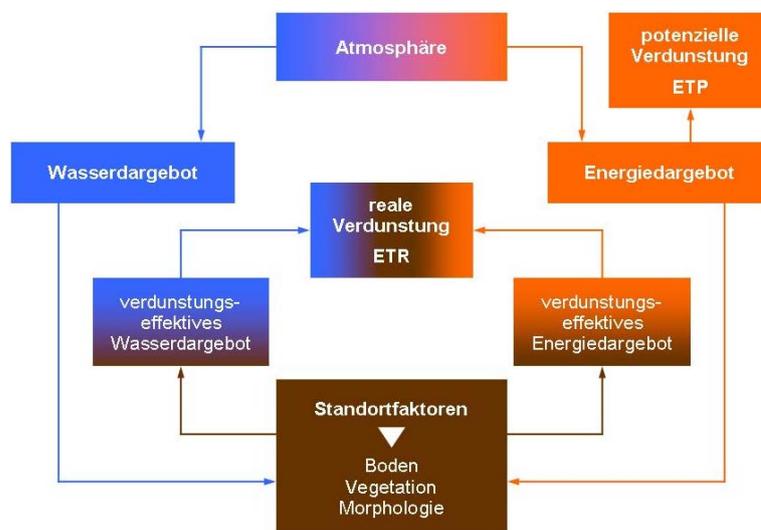


Bild 4.1:

Die reale Verdunstung im System Boden-Pflanze-Atmosphäre
(nach DYCK, PESCHKE, 1995)

* **Bedeutung der Verdunstung:**

- entscheidende Wasserbilanzgröße (ca. 64 % des Niederschlages der Erde verdunsten (Ostdeutschland: ca. 76 % im langjährigen Mittel, Westdeutschland ca. 63 %))
- Beeinflussung der Verdunstungsmengen durch globale Klimaveränderungen
- Veränderung der Verdunstung durch anthropogene Eingriffe (vgl. auch Abschnitt 2.3):
→ Abholzen der Wälder, Waldsterben
→ Flussausbau, Wasserentnahmen, -einleitungen, -überleitungen, Bau von Stauanlagen

- Landwirtschaft (Bodenbearbeitung, Zwischenfruchtanbau, Be- und Entwässerung)
- Bergbau: Grundwasserabsenkungen, Restlochseen
- Bebauung (Versiegelung) von großen Flächen
- für Mitteleuropa gilt: Verdunstungserhöhung um 10 % → Abflussrückgang um ca. 30 %
- große Bedeutung einer Quantifizierung (Messung, Berechnung) der Verdunstung

4.2. Überblick über Methoden zur Messung der Verdunstung

* **Methodenüberblick:** → Bild 4.2

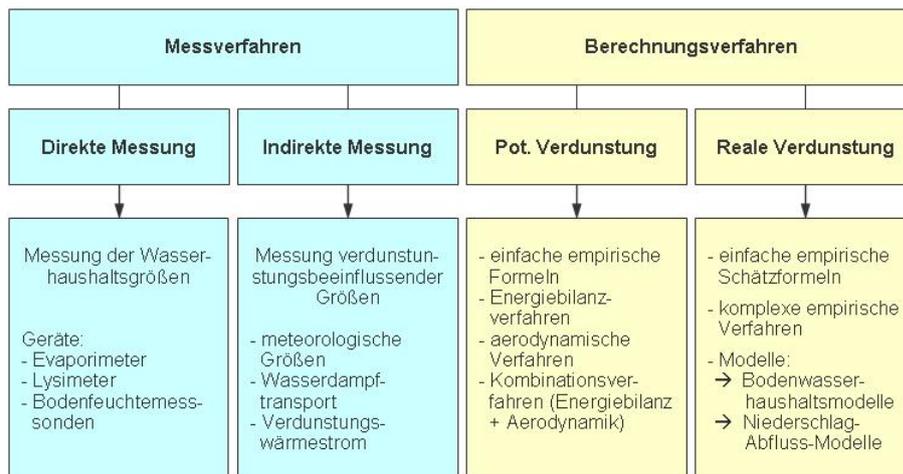


Bild 4.2:
Überblick über Methoden zur Bestimmung der Verdunstung

* **Kurzcharakteristik von Wasser- und Energiebilanzmethoden:**

► **Wasserbilanzmethode:**

- Anwendung der Wasserhaushaltsgleichung (vgl. auch Gleichungen 2.1 und 2.2):

$$ET = P - R - \Delta S \quad (4.1)$$

mit ET - Evapotranspiration [mm/Δt]
P - Niederschlag [mm/Δt]
R - Abfluss [mm/Δt]
ΔS - Speicheränderung [mm/Δt]

- Messung von P, R und ΔS
- Berechnung von ET mittels Wasserhaushaltsgleichung

► **Energiebilanzmethode (Wärmehaushaltsmethode):**

- Anwendung der Energiebilanzgleichung:

$$ET' = RN - B - H \quad (4.2)$$

mit ET' - Verdunstungswärme [kJ / (m² * Δt)]
RN - Gesamtstrahlung (Summe aus kurz- und langwelliger Strahlung) [kJ / (m² * Δt)]
B - turbulenter Wärmestrom von der Bodenoberfläche zur Atmosphäre [kJ / (m² * Δt)]
H - Bodenwärmestrom [kJ / (m² * Δt)]

- Messung von RN, B und H
- Messung vieler, z.T. komplizierter Größen notwendig (→ Energiebilanzmethode selten angewendet)
- Berechnung der ET über den Zusammenhang zwischen Energie- und Wasserhaushalt:

$$ET = 100 ET' / (\rho * r) \quad (4.3)$$

mit	ET	- reale Verdunstung [mm/Δt]
	ET'	- Verdunstungswärme [kJ / (m ² * Δt)]
	ρ	- Dichte des Wassers [kg/m ³]
	r	- spezifische Verdampfungswärme des Wassers [kJ/kg]

4.3. Wasserhaushaltsmethode

* Atmometer:

- sehr einfache Form der Verdunstungsmessung durch immer feuchte Keramik- oder Papierscheiben
- keine hohe Genauigkeit infolge „Oaseneffekt“

* Messung der potenziellen Verdunstung mittels Verdunstungskessel:

- am häufigsten verwendetes Gerät zur Messung der ETP (> 50 Typen/Größen weltweit)
- einfacher Messaufbau → Beispiele für Verdunstungskessel s. Bild 4.3
- Aufbau auf bewachsenem oder unbewachsenem Boden mit ca. 15 cm Bodenabstand
- fast vollständig mit Wasser gefüllt (5 - 7,5 cm unterhalb der oberen Ringkante)
- in ariden und semiariden Gebieten: Abdeckung mittels Netz (Stop Wasser trinkende Tiere)



Bild 4.3:

Verdunstungskessel des U.S. Weather Bureau (Class A Evaporation Pan), Foto: Wikipedia

- Kesselverdunstungswerte generell höher im Vergleich zu anderen Methoden
- Ursache: vergleichsweise kleine Kesseloberfläche → Fehler
- Fehlerkompensation notwendig (mittels **empirischen Kesselkoeffizienten**):

$$ETP = k_{Kessel} * EP_{Kessel} \quad (4.4)$$

mit ETP	- korrigierte potenzielle Verdunstung [mm/Δt]
k_{Kessel}	- empirischer Kesselkoeffizient (s. beispielhaft Tabelle 4.2)
EP_{Kessel}	- Wert der (potenziellen) Kesselverdunstung

Tabelle 4.2: Empfohlene Kesselkoeffizienten k_{Kessel} für den U.S. Weather Bureau Class A Kessel für verschiedene Bewuchs- und meteorologische Bedingungen

Windgeschwindigkeit [m/s]	Größe der umgebenden Fläche (gegen Wind) [m]	Relative Luftfeuchte: < 40 %	Relative Luftfeuchte: 40 - 70 %	Relative Luftfeuchte: > 70 %
< 2 (gering)	0	0,55 (0,70)	0,65 (0,80)	0,75 (0,85)
	10	0,65 (0,60)	0,75 (0,70)	0,85 (0,80)
	100	0,70 (0,55)	0,80 (0,65)	0,85 (0,75)
	1000	0,75 (0,50)	0,85 (0,60)	0,85 (0,70)
2 - 5 (mäßig)	0	0,50 (0,65)	0,60 (0,75)	0,65 (0,80)
	10	0,60 (0,55)	0,70 (0,65)	0,75 (0,70)
	100	0,65 (0,50)	0,75 (0,60)	0,80 (0,65)
	1000	0,70 (0,45)	0,80 (0,55)	0,80 (0,60)
5 - 8 (stark)	0	0,45 (0,60)	0,50 (0,65)	0,60 (0,70)
	10	0,55 (0,50)	0,60 (0,55)	0,65 (0,65)
	100	0,60 (0,45)	0,65 (0,50)	0,70 (0,60)
	1000	0,65 (0,40)	0,70 (0,45)	0,75 (0,55)
> 8 (sehr stark)	0	0,40 (0,50)	0,45 (0,60)	0,50 (0,65)
	10	0,45 (0,45)	0,55 (0,50)	0,60 (0,55)
	100	0,50 (0,40)	0,60 (0,45)	0,65 (0,50)
	1000	0,55 (0,35)	0,60 (0,40)	0,65 (0,45)
nicht in Klammern:		Werte für Kessel, umgeben mit kurzem Grasbewuchs		
in Klammern:		Werte für Kessel, umgeben von unbewachsener Fläche		

- häufig genutzte Verdunstungskessel sowie Unterschiede in den Messwerten → s. Tabellen 4.3 und 4.4
- häufiger Anwendungsfall von Verdunstungskesseln: für die Beregnungsüberwachung
- **Auswertung von Kesselverdunstungsmessungen → s. Übung 7 (Teilaufgabe a)**

Tabelle 4.3: Weltweit häufig genutzte Verdunstungskessel

Kesseltyp	Land	Kesselinstallation	Kesseltiefe [m]	Fläche [m ²]
Class A Pan	USA	über der Bodenoberfläche auf einem Holzrahmen	0.225	1.14
3-m ² -Kessel	BRD Ungarn	Kessel im Erdboden Kesseloberkante in Erdbodenhöhe	0.6	3.0
20-m ² -Kessel	Russland	Kessel im Erdboden Kesseloberkante in Erdbodenhöhe	2.0	20.0
GGJ 3000	Russland	Kessel im Erdboden Kesseloberkante in Erdbodenhöhe	0.6	0.3

Bemerkung: Russischer 20-m²-Kessel ist von der World Meteorological Organization WMO als Eichgerät empfohlen

Tabelle 4.4: Vergleich gemessener Kesselverdunstungswerte (russischer 20-m²-Kessel = 100 %)

Kesseltyp	gemessene Verdunstungsunterschiede [%]
20-m ² -Kessel (Russland)	(100.0)
Class A Pan (USA)	118.2
3-m ² -Kessel (BRD, Ungarn)	104.7
GGJ 3000 (Russland)	115.0

*** Messung der Verdunstung freier Wasserflächen mittels Floßverdunstungskessel:**

- analog Evaporimeter für die Messung der Seeverdunstung
- Montage auf Flöße (Prinzip → s. Bild 4.4)
- ermittelte Verdunstungswerte sind meist zu hoch (Flöße und Kessel erwärmen sich stärker als die Seeoberfläche)

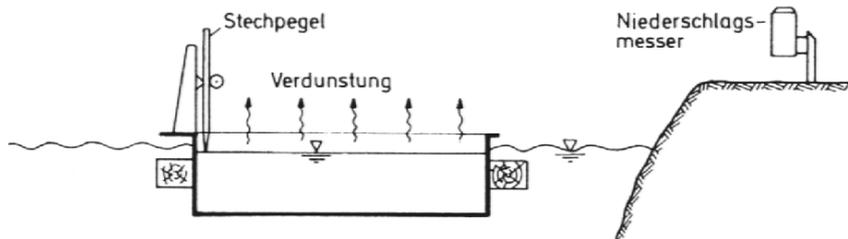


Bild 4.4:

Messprinzip beim Floßverdunstungskessel
(aus SCHRÖDER U.A., 1994)

*** Messung der realen Verdunstung mittels Lysimeter:**

- Lysimeter** =
- Gerät zur Messung der realen (selten der potenziellen) Verdunstung
 - Auffangen des Sickerwassers an der Basis des Lysimeters
 - Messung der Sickerwassermengen (ggf. der Oberflächenabflussmengen)
 - Bestimmung der Verdunstung mittels Wasserhaushaltsgleichung

► **Ziel von Lysimeteruntersuchungen:**

- Ermittlung der realen Verdunstung für Landflächen (vereinzelt auch der potenziellen Verdunstung)
- Ermittlung von Sickerwasser- und Grundwasserneubildungsraten
- Untersuchungen zum Bodenwasserhaushalt
 - Erfassung der physikalischen Zusammenhänge zwischen Verdunstung und bodenkundlichen, vegetationsspezifischen und meteorologischen Kenngrößen
 - Untersuchungen zum Kapillaraufstieg
 - Untersuchungen zur Abflussbildung

► **Lysimeterarten:**

- wägbare Lysimeter
- nicht wägbare Lysimeter
- natürliche Lysimeter (Großlysimeter)

► **wägbare Lysimeter (wägbare Kleinlysimeter):**

- meistgenutztes Gerät zur Messung der realen Verdunstung für landwirtschaftliche Kulturen
- Bodenmonolith, mit gleichen Bedingungen wie in der Umgebung (Boden, Vegetation), von der Umgebung isoliert
- gemessene Verdunstungswerte sind nur für die unmittelbare Umgebung des Lysimeters repräsentativ
- **konstruktive Gestaltung** (→ vgl. Bild 4.5):
 - verschiedene Lysimeterdurchmesser, meist zwischen 0.5 m und 2.0 m
 - Lysimeter sollte einen im Vergleich zur Umgebung wenig gestörten Bodenaufbau enthalten
 - ähnliche thermische, wasserhaushaltliche und Bodeneigenschaften wie Umgebung
 - Vegetation sollte der der Umgebung entsprechen (Höhe, Dichte, Aussehen)

- Messung der Sickerwassermengen und der Masseänderungen des Lysimeters (als Maß für die Bodenspeicheränderung)
- häufige Konstellation: Lysimeterfelder mit 2 oder mehr Lysimetern (statistische Sicherheit)
- bei Lysimeteereinsatz zur ETP-Bestimmung: ständiges Feuchthalten des Lysimeters
- Problem in der Vergangenheit: Messung von Masseänderungen im Grammbereich bei Gesamtmassen der Lysimeter von einigen Tonnen → Problem gelöst durch den Einsatz von pneumatischen und elektronischen Spezialgeräten (Genauigkeit: 0,05 mm)
- größte Anlagen: Oberflächen bis zu 8 m² und 100 t Gesamtmasse
- Anwendungsbereich wägbarer Lysimeter begrenzt auf Vegetation, die mittels Bodenmonolith erfassbar ist:
 - z.B. geeignet für landwirtschaftliche Kulturen
 - nicht geeignet für Waldstandorte → Großlysimeter (s.u.), Energiebilanzmethode

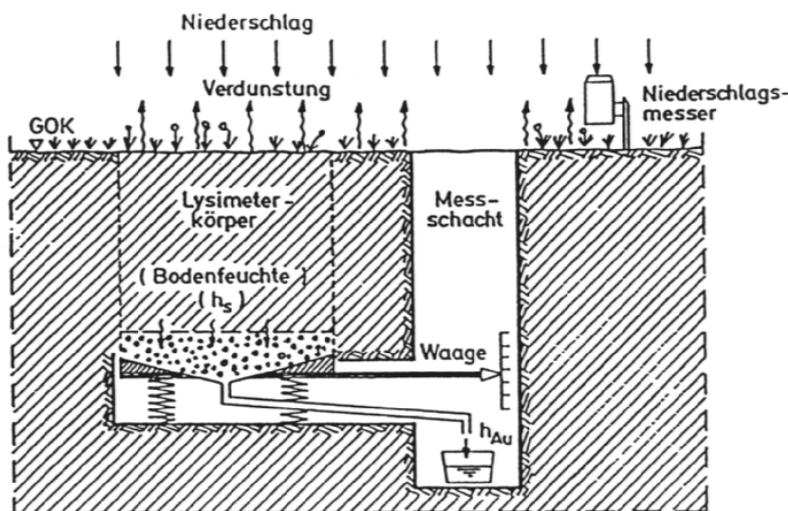


Bild 4.5:

Prinzip des wägbaren Lysimeters (Vertikalschnitt), aus SCHRÖDER U.A. (1994)

- Anwendung der Wasserhaushaltsgleichung zur Bestimmung der Verdunstung:

$$a) \text{ reale Verdunstung: } \quad ETR = P - RO - RU - \Delta S \quad (4.5)$$

$$b) \text{ potenzielle Verdunstung: } \quad ETP = P + P_z - RO - RU - \Delta S \quad (4.6)$$

mit	ETR	- reale (aktuelle) Evapotranspiration [mm/Δt]
	ETP	- potenzielle (maximal mögliche) Evapotranspiration [mm/Δt]
	P	- Niederschlag [mm/Δt]
	P _z	- zusätzliche Beregnungsmenge zum Feuchthalten des Lysimeters [mm/Δt]
	RO	- Oberflächenabfluss [mm/Δt], meist RO = 0 (wegen der horizontalen Oberfläche)
	RU	- Sickerwassermenge (Versickerung) [mm/Δt], gemessen an der Lysimeterbasis
	ΔS	- Bodenspeicheränderung (Massedifferenz, gemessen mittels Spezialwaagen)

- Fehlerquellen bei Lysimetermessungen:

- Störung des natürlichen Bodenfeuchteverlaufes durch Kapillarkräfte an der Lysimeterbasis (Stauässe) → Verdunstungserhöhung (Abhilfe durch Einbau einer Kiesschicht an der Lysimetersohle bzw. durch Absaugen des Kapillarwassers)
- Randeffekte (bevorzugte Sickerwege an der Lysimeterwandung)
- Lysimeterverdunstung = Punktwert → Fehler bei der Übertragung auf ein Gebiet

- Auswertung von Lysimeterbeobachtungen: → s. Übung 7 (Teilaufgabe b)

► **nicht wägbare Lysimeter (nicht wägbare Kleinlysimeter):**

- konstruktive Gestaltung analog wägbaren Lysimetern, jedoch keine Wägung möglich
- Messung von P, RO und RU analog wägbarer Lysimeter
- Messung der Bodenspeicheränderung mittels Bodenfeuchtemessgeräten
- Anwendung der Wasserhaushaltsgleichung (2.1) zur Verdunstungsberechnung

► **natürliche Lysimeter (Großlysimeter):**

- Kleinlysimeter versagen bei Wald → Nutzung von größeren Gebieten als Lysimeter
- Voraussetzungen: horizontal und vertikal abgeschlossenes Gebiet (z.B. wasserundurchlässige Abgrenzung nach unten durch entsprechende geologische Schichten im Untergrund)
- Messmethode analog nichtwägbarer Kleinlysimetern (s.o.)

* **weitere Methoden zur Messung der realen Verdunstung:**

- Bodenfeuchtemessungen → Bodenfeuchteabnahme in niederschlagsfreier Zeit = Maß für die reale Verdunstung → 1 Vol.-% Bodenfeuchteabnahme je dm Bodenschicht = 1 mm Verdunstungshöhe
→ **Anwendungsbeispiel** → s. Übung 8
- Messungen des Saftflusses von Pflanzen → Maß für die reale Transpiration → Prinzip: Beheizung zweier im Abstand von 10 – 15 cm an der Stammnordseite eingebauter Nadeln mit Kupfer-Konstantan-Thermoelementen → Temperaturdifferenz = Maß für die reale Transpiration
- Jahresringbreite von Bäumen → Maß für jährliche Transpirationen

4.4. Berechnung der potenziellen Verdunstung mittels empirischer Formeln

* **Grundanliegen:**

- Lysimeteruntersuchungen nicht flächendeckend durchführbar (Kosten) → Entwicklung von empirischen Formeln auf der Grundlage vergleichender (Lysimeter-)Untersuchungen
- Korrelation von Verdunstungsmessungen mit meteorologischen Messgrößen, meist Temperatur, Strahlung (Globalstrahlung, Sonnenscheindauer), Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit

* **in Deutschland am häufigsten angewendete Formeln:**

- PENMAN-Formel
- TURC-Formel in Kombination mit der IVANOV-Formel
- HAUDE-Formel

* **PENMAN-Formel:**

- **Einflussgrößen:** Temperatur, Globalstrahlung, Sonnenscheindauer, Feuchte, Windgeschwindigkeit
- **PENMAN-Formel** (für tägliche Werte der potenziellen Verdunstung):

$$ETP_{PENMAN} = 2.3 * \frac{T + 22}{T + 123} * \left[\frac{0.6 * R_G}{L} + 0.66 * (1 + 1.08 * v_2) * \left(1 - \frac{U}{100}\right) * S_R \right] \quad (4.7)$$

- mit
- ETP_{PENMAN} - Tageswert der potenziellen Verdunstung nach PENMAN [mm/d]
 - T - Tagesmittel der Lufttemperatur in 2 m Höhe [°C]
 - R_G - Tagessumme der Globalstrahlung [J/cm^2]
 - L - Verdunstungsenthalpie (Verdunstungswärme) [J/cm^2], Werte s. Tabelle 4.5
 - v_2 - Tagesmittel der Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe [m/s]
 - U - Tagesmittel der relativen Luftfeuchte in 2 m Höhe [%]
 - S_R - Verhältnis der astronomisch möglichen Sonnenscheindauer S_0 (s. z.B. Tabelle 4.6) zu der bei Tag- und Nachtgleiche ($S_0 / 12$ h), S_0 [h]

Tabelle 4.5: Zusammenhang von Temperatur und Verdunstungsenthalpie

Temperatur T [°C]	- 9	- 8	- 7	- 6	- 5	- 4	- 3	- 2	- 1	0
Enthalpie L [J/cm ²]	283	283	283	283	283	283	283	283	283	250
Temperatur T [°C]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Enthalpie L [J/cm ²]	250	249	249	249	249	248	248	248	248	247
Temperatur T [°C]	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Enthalpie L [J/cm ²]	247	247	247	246	246	246	246	245	245	245
Temperatur T [°C]	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Enthalpie L [J/cm ²]	245	245	244	244	244	244	243	243	243	243

Tabelle 4.6: Maximal mögliche tägliche Sonnenscheindauer [h/d] in Abhängigkeit von der geographischen Breite (Nordhalbkugel), bezogen auf die Monatsmitte

Geogr. Breite	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
46° n. Br.	9,2	10,3	11,9	13,5	15,0	15,7	15,3	14,1	12,6	10,9	9,6	8,6
47° n. Br.	9,0	10,3	11,9	13,6	15,1	15,8	15,5	14,2	12,6	10,9	9,4	8,5
48° n. Br.	8,8	10,2	11,9	13,6	15,2	16,0	15,6	14,3	12,6	10,9	9,3	8,3
49° n. Br.	8,7	10,2	11,9	13,7	15,3	16,2	15,8	14,4	12,7	10,8	9,2	8,2
50° n. Br.	8,6	10,2	11,9	13,8	15,4	16,4	15,9	14,5	12,7	10,8	9,1	8,1
51° n. Br.	8,5	10,1	11,9	13,9	15,5	16,5	16,1	14,6	12,7	10,8	9,0	8,0
52° n. Br.	8,3	10,0	11,9	13,9	15,7	16,7	16,3	14,6	12,7	10,7	8,9	7,8
53° n. Br.	8,2	9,9	11,9	14,0	15,9	16,9	16,4	14,8	12,7	10,6	8,7	7,6
54° n. Br.	8,0	9,9	11,9	14,1	16,1	17,1	16,6	14,9	12,7	10,6	8,6	7,4
55° n. Br.	7,9	9,8	11,9	14,2	16,2	17,3	16,7	15,0	12,7	10,6	8,5	7,3

- astronomisch mögliche (maximale) Sonnenscheindauer auch berechenbar
- für Deutschland gilt näherungsweise:

$$S_o = 12,3 + \sin \zeta [4,3 + (\zeta - 51) / 6] \quad (4.8)$$

$$\text{mit: } \zeta = 0,0172 * TG - 1,39 \quad (4.9)$$

- mit S_o - astronomisch mögliche Sonnenscheindauer [h/d]
 TG - fortlaufender Tag des Jahres (1. Jan. = 1, 31. Dez. = 365)
 ζ - geographische Breite [° n. Br.]

- Verdunstungsenthalpie L ebenfalls berechenbar (für $T < 0$ °C: $L = 283$ J/cm²):

$$L = 249,8 - 0,242 T \quad (\text{für } T \geq 0 \text{ °C}) \quad (4.10)$$

- mit L - Verdunstungsenthalpie [J/cm²]
 T - durchschnittliche Tagesmitteltemperatur [°C]

- Vorteile der PENMAN-Formel:

- genaueste empirische Formel
- Berücksichtigung der wesentlichen die Verdunstung beeinflussenden Parameter

- Nachteile der PENMAN-Formel:

- Formel setzt Kenntnis einer Vielzahl von Parametern voraus
- oftmals nicht alle notwendigen Parameter vorhanden → Anwendung der PENMAN-Formel nicht möglich
- Handhabung komplizierter als bei anderen Formeln

*** TURC-Formel:**

- **Einflussgrößen:** Temperatur, Luftfeuchte und Globalstrahlung

- **TURC-Formel** (für tägliche Werte der potenziellen Verdunstung):

$$ETP_{TURC} = 0,0031 * C * T * (R_G + 209) / (T + 15) \quad (4.11)$$

$$\text{mit: } C = 1 + [(50 - U) / 70] \quad \text{für } U < 50 \% \quad (4.12)$$

$$C = 1 \quad \text{für } U \geq 50 \% \quad (4.13)$$

mit: ETP_{TURC} - Tageswert der potenziellen Verdunstung nach TURC [mm/d]
 T - Tagesmittel der Lufttemperatur in 2 m Höhe [°C]
 R_G - Tagessumme der Globalstrahlung [J/cm²]
 U - Tagesmittel der relativen Luftfeuchte in 2 m Höhe [%]

- Vorteile der TURC-Formel:

- für die meisten Anwendungsfälle ähnlich genau wie die PENMAN-Formel
- einfach in der Handhabung (vergleichsweise wenige Parameter)

- Nachteile der TURC-Formel:

- nicht alle die Verdunstung beeinflussenden Größen enthalten (z.B. Windeinfluss)
- nicht anwendbar für Temperaturen < 0 °C, ungenau für Temperaturen < 5 °C
- TURC-Formel liefert bei Anwendung unter mitteleuropäischen Bedingungen im Jahresmittel um 10 % zu geringe Werte → Empfehlung des DVWK: Erhöhung der Werte um 10 %

*** IVANOV-Formel:**

- **Einflussgrößen:** Temperatur und Luftfeuchte

- **IVANOV-Formel** (für tägliche Werte der potenziellen Verdunstung):

$$ETP_{IVANOV} = 3,6 * 10^{-5} * (25 + T)^2 (100 - U) \quad (4.14)$$

mit ETP_{IVANOV} - Tageswert der potenziellen Verdunstung nach IVANOV [mm/d]
 T - Tagesmittel der Lufttemperatur in 2 m Höhe [°C]
 U - Tagesmittel der relativen Luftfeuchte in 2 m Höhe [%]

- Vorteile der IVANOV-Formel:

- für geringe Temperaturen ($T < 5 \text{ °C}$) recht genau (anwendbar $-25 \text{ °C} \leq T \leq 5 \text{ °C}$)
- ähnlich einfach in der Handhabung wie die TURC-Formel

- Nachteile der IVANOV-Formel:

- nicht alle die Verdunstung beeinflussenden Größen enthalten (Wind- und Strahlungseinflüsse)

*** HAUDE-Formel:**

- **Einflussgröße:** Luftfeuchte (indirekt: Temperatur)
- **HAUDE-Formel** (für tägliche Werte der potenziellen Verdunstung):

$$ETP_{Haude} = f [e_s(T) * (1 - U/100)] \quad (4.15)$$

- mit ETP_{Haude} - potenzielle Evapotranspiration nach HAUDE [mm]
 T - Lufttemperatur zum Messzeitpunkt 14:00 Uhr MEZ [°C]
 U - relative Luftfeuchtigkeit zum Messzeitpunkt 14:00 Uhr MEZ [%]
 f - monatsabhängiger HAUDE-Faktor [mm/(hPa * d)], (vgl. Tabelle 4.7)
 e_s - Sättigungsdampfdruck der Luft über Wasser zum Messzeitpunkt 14:00 Uhr MEZ [hPa],
 e_s temperaturabhängig (vgl. Bild 4.6 und Gleichungen 4.16 und 4.17)

Tabelle 4.7: Monatsvariable HAUDE-Faktoren f [mm/(hPa * d)]

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
f	0,22	0,22	0,22	0,29	0,29	0,28	0,26	0,25	0,23	0,22	0,22	0,22

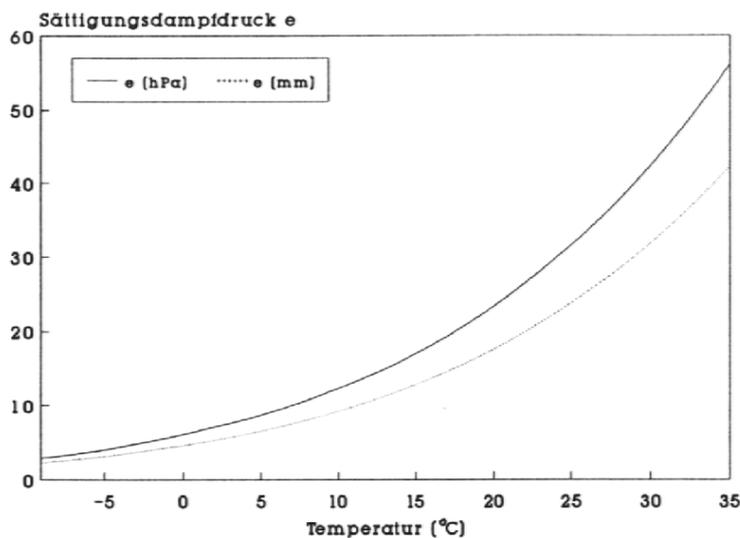


Bild 4.6:

Temperaturabhängige Sättigungsdampfdruckkurve

- Berechnung der Sättigungsdampfdruckkurve:

$$e_s = 6,11 * e^{(17,62 T / (243,12 + T))} \quad \text{für } T \geq 0 \text{ °C} \quad (4.16)$$

$$e_s = 6,11 * e^{(22,46 T / (272,62 + T))} \quad \text{für } T < 0 \text{ °C} \quad (4.17)$$

- mit e_s - Sättigungsdampfdruck der Luft über Wasser [hPa]
 T - Lufttemperatur zum Messzeitpunkt 14:00 Uhr MEZ [°C]

- Vorteile der HAUDE-Formel:

- einfache Handhabung
- geringe Anforderungen an Datenmaterial

- Nachteil der HAUDE-Formel:

- für Tageswerte der potenziellen Verdunstung recht ungenau

* Abgleich der potenziellen Verdunstungswerte:

- mittels empirischer Formeln berechnete ETP-Werte gelten nur für Grasvegetation und ebene Flächen → für andere Vegetationsarten und für Hangflächen Abgleich notwendig

- *Nutzungsabgleich:*

$$ETP_{Nutz.} = k_C * ETP \quad (4.18)$$

mit $ETP_{Nutz.}$ - nutzungskorrigierter Wert der potenziellen Verdunstung [mm/d]

ETP - Wert der potenziellen Verdunstung nach empirischen Formeln [mm/d]

k_C - Abgleichfaktor bezüglich der Nutzung des Standortes (Werte s. z.B. Tabelle 4.8)

Tabelle 4.8: Monatsvariable Bestandskoeffizienten k_C für verschiedene Pflanzenarten

Pflanzenart	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov - Feb
Mähweide	1,00	1,00	1,05	1,10	1,10	1,05	1,05	1,00	1,00
Winterweizen	0,80	0,85	1,15	1,45	1,40	1,00	0,80	0,70	0,65
Wintergerste	0,85	0,95	1,30	1,35	1,25	-	-	-	0,65
Sommergerste	0,80	0,90	1,20	1,35	1,20	-	-	-	-
Winterroggen	0,85	0,90	1,20	1,30	1,25	0,95	0,80	0,70	0,65
Hafer	0,65	0,70	1,10	1,45	1,35	0,95	-	-	-
Zuckerrüben	-	0,50	0,75	1,05	1,40	1,30	1,10	0,85	-
Kartoffeln	-	0,50	0,90	1,05	1,45	1,20	0,90	-	-
Winterraps	0,85	1,00	1,35	1,35	1,10	0,85	-	-	0,65

- *Expositions- und Hangneigungsabgleich:*

$$ETP_H = H * ETP \quad (4.19)$$

mit ETP_H - hangneigungs- und expositions-korrigierter Wert der potenziellen Verdunstung [mm/d]

H - Hangneigungsfaktor [] (expositionsabhängig, vgl. Bild 4.7)

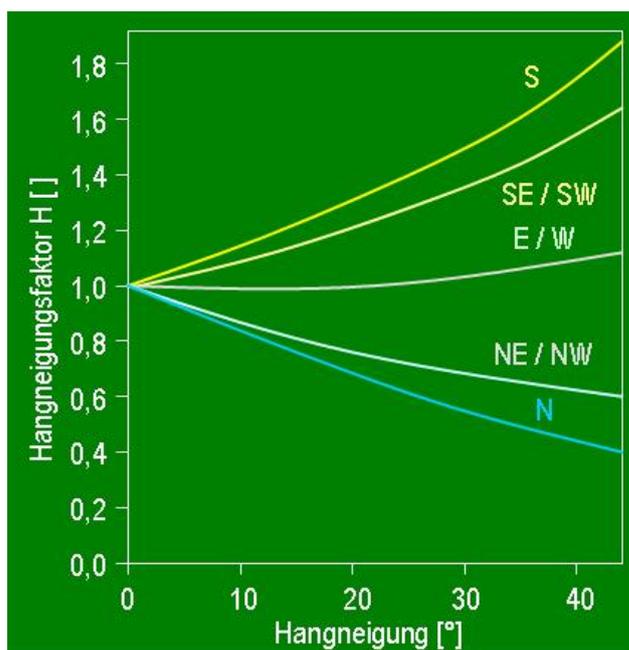


Bild 4.7:

Hangneigungsfaktoren für verschiedene Expositionen (nach JUNGHANS, 1969)

*** Berechnung der Globalstrahlung aus Werten der Sonnenscheindauer:**

- Messwerte der Globalstrahlung nicht immer vorhanden
- Berechnung von täglichen Werten der Globalstrahlung aus Werten der Sonnenscheindauer möglich:

$$R_G = R_o [0,19 + 0,55 (S / S_o)] \quad (4.20)$$

- mit R_G - mittlere Tagessumme der Globalstrahlung [J/cm^2]
 R_o - extraterrestrische Strahlung [J/cm^2], s. Tabelle 4.9 bzw. Gleichung 4.21
 S - tatsächliche Sonnenscheindauer [h/d]
 S_o - astronomisch mögliche (maximal mögliche) Sonnenscheindauer [h/d], s. Tabelle 4.6

Tabelle 4.9: Extraterrestrische Strahlung [$J/(cm^2 * d)$] in Abhängigkeit von der geographischen Breite (Nordhalbkugel), bezogen auf die Monatsmitte

Geogr. Breite	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
46° n. Br.	1165	1711	2495	3303	3905	4170	4036	3535	2799	1989	1322	1014
47° n. Br.	1104	1652	2444	3270	3891	4199	4028	3510	2756	1932	1261	954
48° n. Br.	1043	1592	2394	3236	3876	4163	4019	3485	2712	1876	1201	893
49° n. Br.	982	1532	2343	3203	3862	4159	4011	3460	2669	1819	1140	833
50° n. Br.	921	1472	2292	3170	3848	4156	4003	3435	2625	1763	1079	773
51° n. Br.	862	1411	2238	3133	3831	4150	3992	3406	2577	1704	1019	716
52° n. Br.	803	1350	2184	3096	3813	4145	3981	3377	2530	1646	960	659
53° n. Br.	745	1290	2130	3058	3796	4139	3970	3349	2482	1587	900	602
54° n. Br.	686	1229	2076	3021	3778	4134	3959	3320	2435	1529	841	545
55° n. Br.	627	1168	2022	2984	3761	4128	3948	3291	2387	1470	781	488

- Berechnung der extraterrestrischen Strahlung:

$$R_o = 245 [9,9 + 7,08 \sin \zeta + 0,18 (\varphi - 51) (\sin \zeta - 1)] \quad (4.21)$$

- mit R_o - extraterrestrische Strahlung [J/cm^2]
 φ - geographische Breite [° n. Br.]
 ζ - analog Gleichung 4.9

*** Beispiele für Anwendungsbereiche von empirischen Verdunstungsformeln:**

- Berechnung der Verdunstung von Oberflächengewässern (Seen, Talsperren, Flüssen ...)
- Berechnung der Verdunstung von Feuchtsflächen (Flächen mit oberflächennahem Grundwasserspiegel)
- oft erster Schritt zur Berechnung der realen Verdunstung
- Berechnung der Verdunstung im Winterhalbjahr (Deutschland: $ETR \approx ETP$)
- Verdunstungsberechnung beregneter Flächen
- **Anwendungsbeispiele → s. Übung 7 (Teilaufgabe c)**

4.5. Klimatische Wasserbilanz

* Definition, Ziel der klimatischen Wasserbilanz:

- Definition: Gegenüberstellung von Niederschlag und potenzieller Verdunstung $P - ETP$
- Ziel: Überblick über Überschuss- und Defizitperioden

* Methodik:

- Gegenüberstellung meist monatlicher Werte des Niederschlages und der potenziellen Verdunstung
- klimatische Wasserbilanzen sowohl in Form langjähriger mittlerer Monatsbilanzen als auch für konkrete Witterungsabschnitte (z.B. für ein Trockenjahr, Nassjahr, eine Trockenperiode) möglich
- Recherche und ggf. Aufbereitung (Korrektur) der Niederschlagswerte (DWD, eigene Messungen)
- Berechnung der potenziellen Verdunstung (z.B. durch die Anwendung empirischer Formeln)
- Berechnung von $P - ETP$
- Darstellung der Ergebnisse entweder in Tabellenform oder als Abbildung
- Beispiele für klimatische Wasserbilanzen → s. Tabelle 4.10 sowie Bilder 4.8 und 4.9

Tabelle 4.10: Klimatische Wasserbilanz für den Raum Oschatz (alle Werte in mm)

a) langjährige mittlere klimatische Wasserbilanz													
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
P	41	37	41	51	62	65	60	67	49	41	49	58	621
ETP	11	3	19	48	86	101	107	93	59	35	13	11	586
Ü	30	34	22	3	-	-	-	-	-	6	36	47	35
D	-	-	-	-	24	36	47	26	10	-	-	-	-
b) klimatische Wasserbilanz für ein Trockenjahr													
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
P	72	24	11	33	17	20	89	44	34	68	47	48	507
ETP	20	9	6	69	110	118	116	106	64	26	15	11	670
Ü	52	15	15	-	-	-	-	-	-	42	32	37	-
D	-	-	-	36	93	98	25	62	30	-	-	-	163

P - Niederschlag (korrigiert) ETP - potenzielle Verdunstung Ü - Überschuss D – Defizit

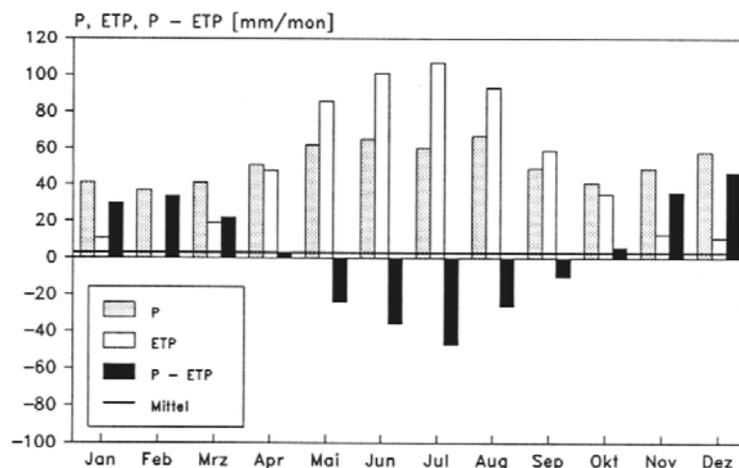


Bild 4.8:

Langjährige mittlere klimatische Wasserbilanz für den Raum Oschatz

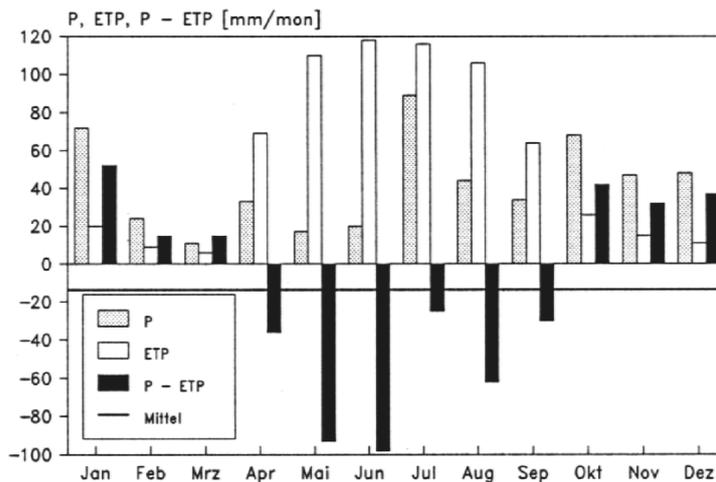


Bild 4.9:

Klimatische Wasserbilanz eines Trockenjahres für den Raum Oschatz

- Erstellen und Darstellen einer klimatischen Wasserbilanz → s. Übung 7 (Teilaufgabe d)

4.6. Methoden zur Berechnung der realen Verdunstung

* Ziele der Berechnung der realen Verdunstung:

- Berechnung der Grundwasserneubildung (Sickerwassermengen zum Grundwasser) → meist langjährige Mittel der realen Verdunstung von Interesse
- Untersuchungen zum Bodenwasserhaushalt, zur Beregnungswürdigkeit landwirtschaftlicher Flächen, für Wachstums- und Ertragsprognosen der Land- und Forstwirtschaft → aktuelle Werte der realen Verdunstung → vgl. Bodenwasserhaushaltsmodellierung, s.u.
- Quantifizierung der Auswirkungen anthropogener Landnutzungsänderungen
- Teil numerischer Wetterprognose- und Klimamodelle

* TURC-Formel zur Abschätzung der langjährigen mittleren realen Jahresverdunstung:

- **Achtung!:** keine sehr genaue Methode, lediglich Abschätzung → ungefähre Jahreswerte
- keine Berücksichtigung verschiedener Bewuchs- und Nutzungsarten, Bodenarten, ...
- Basis: Datenreihen von 254 Einzugsgebieten aus allen Teilen der Welt → Anwendung nicht auf Deutschland beschränkt
- **Anwendung der TURC-Formel → s. Übung 9 (Teilaufgabe a)**
- TURC-Formel zur Abschätzung des langjährigen Jahreswertes der realen Verdunstung:

$$ETR_{TURC} = P / [0,9 + (P / I_T)^2]^{0,5} \quad (4.22)$$

$$\text{wobei} \quad I_T = 300 + 25 * T + 0,05 * T^3 \quad (4.23)$$

- mit ETR_{TURC} - langjährig mittlerer Jahreswert der realen Verdunstung nach TURC [mm/a]
 P - langjährig mittlere Jahressumme des unkorrigierten Niederschlages [mm/a]
 T - langjähriges Jahresmittel der Lufttemperatur [°C]

* **Berechnung langjähriger Mittelwerte der realen Verdunstung mittels BAGROV-Verfahren:**

- Anwendung der Wasserhaushaltsgleichung für wenig geneigtes Gelände (RO → 0)
- Bestimmung der realen Verdunstung als Restglied der Wasserhaushaltsgleichung
- reale Verdunstung $ETR = f$
 - └ Atmosphäre (Energiedargebot ETP, Feuchtedargebot P)
 - └ Standortbedingungen
 - └ Boden (Bodenart, Wasservorrat)
 - └ Nutzung (Nutzungs- und Pflanzenart)

- Umsetzung der allgemeinen Zusammenhänge → **BAGROV-Gleichung:**

$$\frac{d ETR}{d P} = 1 - \left[\frac{ETR}{ETP} \right]^n \quad (4.24)$$

- mit ETR - langjähriges Mittel der realen Jahresverdunstung [mm/a]
 ETP - langjähriges Mittel der potenziellen Jahresverdunstung [mm/a]
 P - langjährige korrigierte Jahresniederschlagsmenge [mm/a]
 n - Effektivitätsparameter [] (standortabhängige Effektivität der realen Verdunstung, s.u.)

- Berücksichtigung des Energiedargebots (repräsentiert durch ETP)
- Berücksichtigung des Feuchtedargebots (repräsentiert durch P)
- Berücksichtigung der Standortbedingungen (repräsentiert durch n)

- Integration der BAGROV-Gleichung:

$$P = \int_0^{ETR} \frac{d ETR}{1 - (ETR/ETP)^n} \quad (4.25)$$

(alle Größen → s. Gleichung 4.24)

- Ergebnis der numerischen Integration → s. Bild 4.10

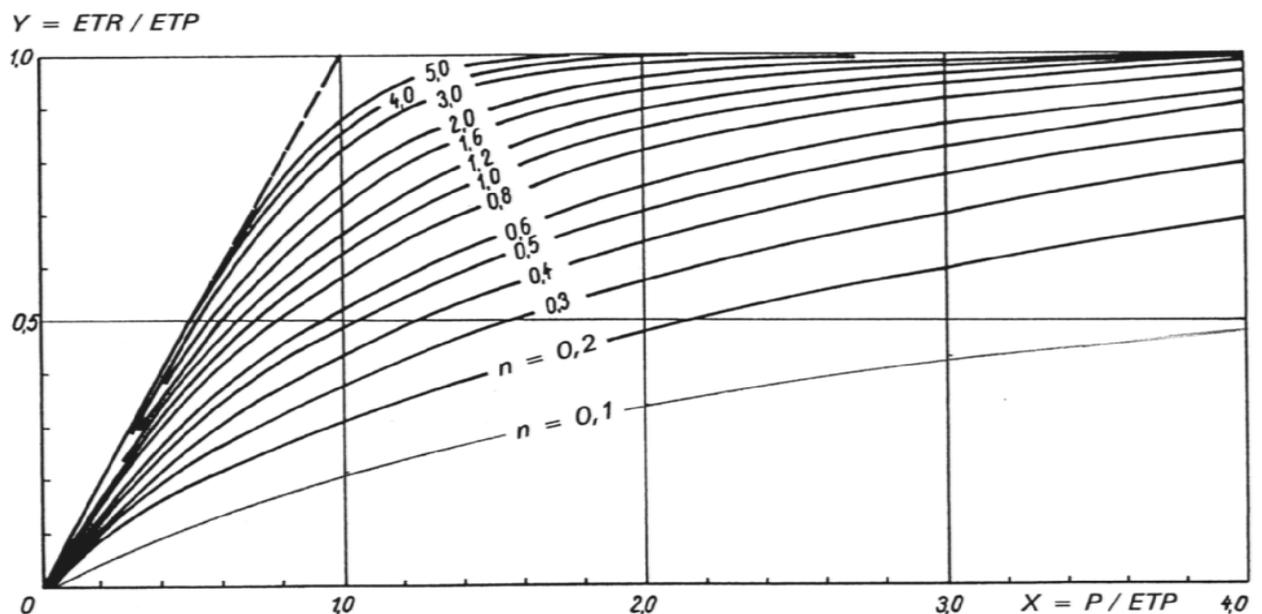


Bild 4.10: Graphische Umsetzung der BAGROV-Beziehung (nach DYCK U.A., 1978)

► **Ermittlung des Effektivitätsparameters n :**

a) Einflussgrößen auf n :

- Landnutzung (Nutzungsform)
- Bodenart
- Grundwasserflurabstand

b) Nutzungsform:

- Einteilung der Nutzung des Gebietes in:
 - Ackerland
 - Waldflächen
 - Gewässerflächen
 - bebaute (versiegelte) Flächen
- s. topographische Karten, Messtischblätter, Luftbilder ...

c) Bodenart:

- Unterteilung in Hauptbodenarten entsprechend "Bodenkundlicher Kartieranleitung" in Sande (S), Schluffe (U), Lehme (L) und Tone (T) jeweils mit Unterbodenart
- s. Bodenschätzungskarten, Karten der forstlichen Standortkartierung, Karten der Landwirtschaft, eigene Untersuchungen

d) mittlerer langjähriger Grundwasserflurabstand:

- Berücksichtigung des Wasseraufstieges aus dem Grundwasser infolge Kapillarität
- Aufstiegs mengen abhängig von der Bodenart und von der Tiefe der Pflanzenwurzeln
- s. Grundwasserflurabstandskarten, Karten der Grundwasserstände (sog. Hydroisohypsenpläne → vgl. Vorlesung Hydrogeologie I)

Im Ergebnis der Punkte b) bis d) untergliedert man das Untersuchungsgebiet in **Hydrotöpfe** (Flächen mit vergleichbaren hydrologischen Eigenschaften).

e) Arbeitsschritte bei der Abarbeitung des Verfahrens:

- (1) Unterteilung des Gesamtgebietes hinsichtlich verschiedener langjähriger mittlerer Gebietsniederschlagswerte (vgl. Abschnitt 3.4), ggf. Korrektur der Niederschlagswerte
- (2) Berücksichtigung von Wassermengen durch Berechnungsmengen W_B (Berechnungsmengen sind zu den Werten des korrigierten Niederschlages zu addieren, vgl. Arbeitsschritt 10)
- (3) Ermittlung der langjährigen mittleren Verdunstung (vgl. Abschnitte 4.3 und 4.4)
- (4) Ermittlung der Landnutzung
- (5) Ermittlung der Bodenart
- (6) Ermittlung des mittleren langjährigen Grundwasserflurabstandes
- (7) Berechnung der mittleren langjährigen kapillaren Wasseraufstiegsmengen aus dem GW:
 - Ermittlung der mittleren kapillaren Aufstiegshöhe z_A :

$$z_A = z_G - z_W \quad (4.26)$$

- | | | |
|-----|-------|--|
| mit | z_A | - mittlere kapillare Aufstiegshöhe [dm] |
| | z_G | - mittlerer langjähriger Grundwasserflurabstand [dm] |
| | z_W | - mittlere jährliche effektive Wurzeltiefe [dm] → s. Bild 4.11 |

- z_A ist Grundlage für die Ermittlung der täglichen kapillaren Aufstiegsmengen
- Werte täglicher kapillarer Aufstiegsmengen $W_K(d)$ in Abhängigkeit von z_A und der Bodenart → s. Tabelle 4.11 → Werte in mm/d
- W_K -Werte aus Tabelle 4.11 gelten für alle Tage während der Wachstumszeit, an denen kein nennenswerter Niederschlag fällt (nur dann wirkt Kapillarität) → in der BRD:
 - bei landwirtschaftlichen Kulturen: $d_K = 45$ d (Halmfrüchte) - 90 d (Dauergrünland)
 - bei Wald: $d_K = 90$ d

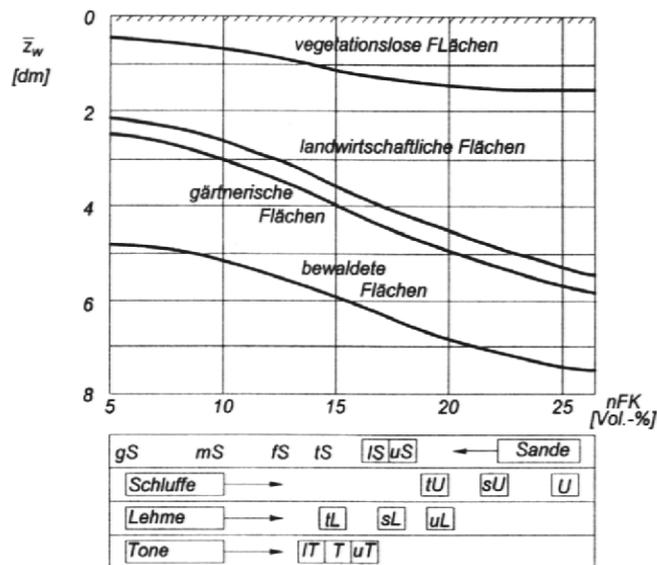


Bild 4.11:

Mittlere jährliche effektive Wurzeltiefe (aus DYCK, PESCHKE, 1995)

Tabelle 4.11: Mittlere tägliche kapillare Aufstiegs mengen aus dem Grundwasser $W_K(d)$ für ausgewählte Bodenarten und verschiedene mittlere kapillare Aufstiegs höhen

Tägliche kapillare Aufstiegs mengen $W_K(d)$ [mm/d]													
Bodenart	Mittlere kapillare Aufstiegs höhe z_A [dm]												
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	17	20
Sande:													
gS (Grobsand)	5,0	5,0	1,5	0,5	0,2	0,1	-	-	-	-	-	-	-
mS (Mittelsand)	5,0	5,0	5,0	3,0	1,2	0,5	0,2	0,1	-	-	-	-	-
fS (Feinsand)	5,0	5,0	5,0	5,0	3,0	1,5	0,7	0,3	0,2	0,1	-	-	-
lS (lehmyger Sand)	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	3,5	2,0	1,5	0,8	0,3	0,1	0,1	-
uS (schluff. Sand)	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	3,0	2,0	1,0	0,5	0,2	-
tS (toniger Sand)	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	2,0	1,0	0,7	0,4	0,2	0,1	-	-
Schluffe:													
U (Schluff)	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	3,5	2,0	1,0	0,5	0,2
sU (sandiger Schluff)	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	3,5	2,0	1,0	0,5	0,2
tU (toniger Schluff)	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	4,5	3,0	2,5	1,5	0,7	0,3	0,1
Lehme:													
sL (sandiger Lehm)	5,0	5,0	5,0	3,5	2,0	1,3	0,8	0,5	0,3	0,2	0,1	-	-
uL (schluffiger L.)	5,0	5,0	5,0	5,0	4,5	2,5	2,5	2,0	1,5	0,8	0,4	0,2	0,1
tL (toniger Lehm)	5,0	5,0	2,5	1,2	0,7	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	-	-
Tone:													
generell (lT, T, uT)	4,0	2,0	1,1	0,7	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1

- Berechnung der mittleren jährlichen kapillaren Wasseraufstiegs mengen W_K aus dem Grundwasser:

$$W_K = W_K(d) * d_K \tag{4.27}$$

- mit W_K - mittlere jährliche kapillare Wasseraufstiegs menge [mm/a]
- $W_K(d)$ - tägliche kapillare Aufstiegs menge [mm/d]
- d_K - Dauer des Kapillaraufstieges (Tage während der Wachstumszeit, an denen kein nennenswerter Niederschlag fällt, s.o.) [d]

- (8) Berücksichtigung der mittleren jährlichen kapillaren Wasseraufstiegsmengen (so vorhanden) → Addition zur mittleren langjährigen Niederschlagsmenge (ggf. korrigiert und unter Berücksichtigung von Beregnungsmengen)
- (9) Bestimmung des Effektivitätsparameters n:
 - für Hydrotupe mit forstlicher, landwirtschaftlicher, gärtnerischer Nutzung bzw. vegetationslosen Boden ohne Grundwassereinfluss (ohne kapillare Wasseraufstiegsmengen) in Abhängigkeit von der Bodenart mittels Bild 4.12

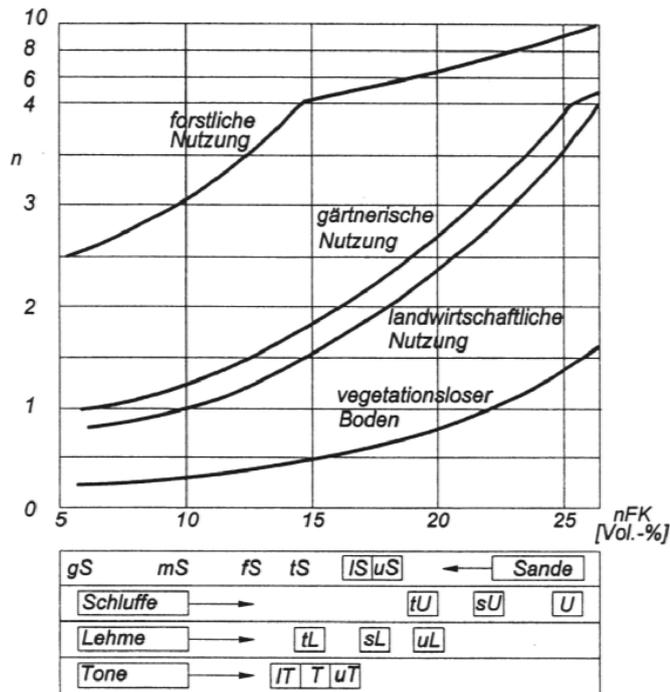


Bild 4.12:

Nutzungsparameter n in Abhängigkeit von der Landnutzung und der Bodenart (aus DYCK, PESCHKE, 1995)

- im Falle forstlicher Nutzung kann bei Kenntnis des Baumalters eine detailliertere Bestimmung von n vorgenommen werden (→ s. Bild 4.13)

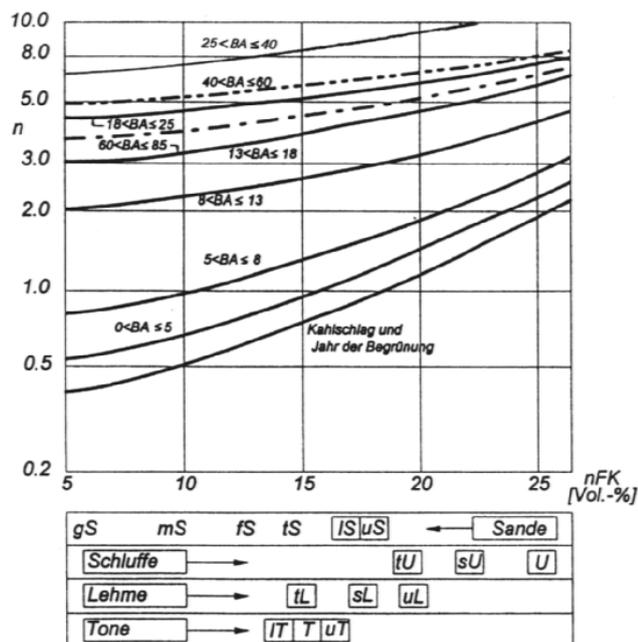


Bild 4.13:

Nutzungsparameter n für forstliche Nutzung in Abhängigkeit von Bodenart und Baumalter BA (in Jahren), aus DYCK, PESCHKE (1995)

- für Hydrotope mit forstlicher, landwirtschaftlicher, gärtnerischer Nutzung bzw. vegetationslosen Boden mit Grundwassereinfluss (mit Kapillarwassermengen):
 - Ermittlung ebenfalls mittels Bild 4.12 (ggf. Bild 4.13)
 - Erhöhung von n (wegen GW-Einfluss höhere Effektivität der Verdunstung):
 - um 20 % für $W_K(d) < 1,5 \text{ mm/d}$ (vgl. Tabelle 4.11)
 - um 50 % für $W_K(d) \geq 1,5 \text{ mm/d}$
- für bebaute (versiegelte) Flächen:
 $n = 0,1$ (unabhängig von Grundwassereinfluss und Bodenart geringe Effektivität der Verdunstung, nur unmittelbar nach Niederschlag Verdunstung möglich)

(10) Ermittlung des X-Wertes der BAGROV-Beziehung (für Bild 4.10):

$$X = (P_{\text{korr}} + W_K + W_B) / ETP \quad (4.28)$$

- mit P_{korr} - langjähriger mittlerer (korrigierter) Jahresniederschlag [mm/a]
 W_K - mittlere jährliche kapillare Wasseraufstiegsmenge [mm/a]
 W_B - langjährige mittlere Beregnungsmengen [mm/a]
 ETP - langjähriger mittlerer Wert der potenziellen Verdunstung [mm/a]

(11) Ermittlung des Y-Wertes der BAGROV-Beziehung mittels Bild 4.10

(12) Ermittlung des langjährigen mittleren Wertes der realen Verdunstung:

$$ETR = Y * ETP \quad (4.29)$$

- mit ETR - langjährige mittlere reale Jahresverdunstung [mm/a]
 Y - Y-Wert ($Y = ETR / ETP$ aus Bild 4.10)
 ETP - langjähriger mittlerer Wert der potenziellen Verdunstung [mm/a]

(13) Ermittlung der mittleren realen Gebietsverdunstung:

- Abarbeitung der Arbeitsschritte (1) bis (12) für jede Teilfläche (Hydrotop)
- Wichtung der ETR-Werte jedes Hydrotops entsprechend dem jeweiligen Flächenanteil und Berechnung der mittleren realen Gebietsverdunstung ETR_m :

$$ETR_m = \sum_{i=1}^n a_i * ETR_i \quad (4.30)$$

$$\text{mit } a_i = A_i / A \quad (4.31)$$

- mit ETR_m - mittlere reale Gebietsverdunstung [mm/a]
 ETR_i - langjährige mittlere reale Jahresverdunstung des Hydrotops i [mm/a]
 a_i - Wichtung des Hydrotops i
 A_i - Fläche des Hydrotops i
 A - Gesamtfläche des untersuchten Gebietes [gleiche Maßeinheit wie A_i]

- Anwendung des BAGROV-Verfahrens → s. Übung 9 (Teilaufgabe b)

* überschlägliche Ermittlung mittlerer Monatswerte der realen Verdunstung:

- für überschlägige Betrachtungen: Aufteilung des langjährigen Mittels der realen Verdunstung auf Monatswerte → s. Tabelle 4.12

Tabelle 4.12: Mittlere prozentuale Aufteilung der Mittelwerte der realen Verdunstung auf Monate (abgeleitet aus Lysimeterbeobachtungen, gültig für Tieflandgebiete Deutschlands)

Vegetation	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
flurfernes Grundwasser, unberechnet:												
Getreide	2	3	6	11	21	21	12	8	6	5	3	2
Hackfrucht	2	3	6	8	11	16	21	15	9	4	3	2
Fruchtfolge (2/3 Getreide, 1/3 Hackfr.)	2	3	7	11	18	17	14	10	8	5	3	2
Gras, Dauergrünland	2	3	5	9	14	17	15	14	9	7	3	2
unbewachsener Boden (Sand)	1	2	9	10	16	17	13	11	10	7	3	1
Wald	2	4	5	9	13	16	15	14	10	7	3	2
flurfernes Grundwasser, beregnet:												
Acker (lehmgiger Sand)	2	3	5	9	17	20	17	11	7	4	3	2
flurnahes Grundwasser: Acker, Wald												
	2	3	4	8	15	16	17	16	10	4	3	2

*** Berechnung aktueller Werte der realen Verdunstung (Tageswerte, aktuelle Monatswerte):**

- Anwendung von Bodenwasserhaushaltsmodellen (→ s. Bild 4.14 sowie Skript Hydrologie 2)

Methodik: Berechnung der Anteile Evaporation und Transpiration, Wichtung nach Pflanzenbedeckungsgrad	
Berechnungsgleichung (Entzugsmodell nach KOITZSCH):	
$ETR = ETP [a * r_T(\Theta) * f_T(z) + (1 - a) * r_E(\Theta) * f_E(z)] \quad (4.32)$	
mit ETR - reale Evapotranspiration [mm], Anteile: ER (reale Evaporation) und TR (reale Transpiration) ETP - potenzielle Evapotranspiration [mm], Anteile: EP (pot. Evaporation), TP (pot. Transpiration) a - Vegetationsbedeckungsgrad [] $r_T(\Theta)$ - Bodenfeuchte-Reduktionsfunktion der Transpiration ($r_E(\Theta)$ analog für die Evaporation) $f_T(z)$ - tiefenabhängige Entzugs-Dichte-Funktion der Transpiration ($f_E(z)$ analog für die Evaporation)	
Bodenfeuchte-Reduktionsfunktion $r(\Theta)$	
Evaporation	Transpiration
Tiefenabhängige Entzugs-Dichte-Funktion $f(z)$	
Evaporation	Transpiration
<p style="text-align: center;">Entzugs-Dichte-Funktion</p>	<p style="text-align: center;">Entzugs-Dichte-Funktion Wurzelveilung</p>
Θ_{min} – min. Wassergehalt Θ_{WP} - Welkepunkt Θ_d – krit. Wassergehalt ($\approx 0,5 \dots 0,8 \Theta_{FC}$) Θ_{FC} - Feldkapazität Θ_S - Sättigung	

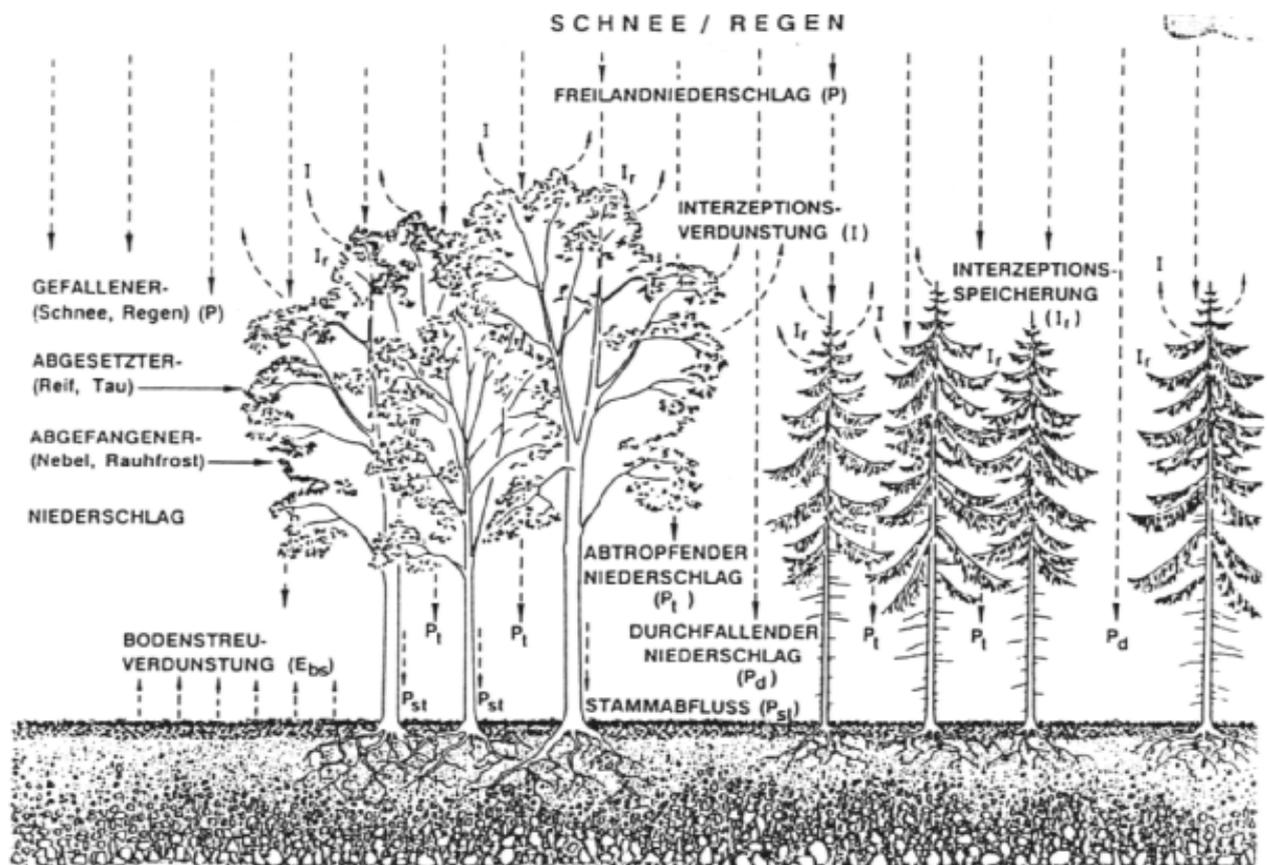
Bild 4.14: Beispiel der Verdunstungsmodellierung in einem Bodenwasserhaushaltsmodell (aus DUNGER, 1985)

4.7. Interzeptionsverdunstung

Interzeption = Vorgang, bei dem Niederschlag an Pflanzenoberflächen aufgefangen und vorübergehend gespeichert wird

- zeitverzögertes Abfließen des gespeicherten Wassers am Stamm
- Abtropfen des Niederschlages (von der Vegetation)
- Verdunsten eines Teils des durch Interzeption gespeicherten Wassers

- Interzeption ist Verlustgröße für den Bodenwasserhaushalt, für die Abflussbildung und Grundwasserneubildung → Verluste durch Interzeptionsverdunstung im Jahresmittel für Nadelbäume ca. 30 – 40 % des Niederschlages, für Laubbäume im Sommer ca. 15 – 25 %, im Winter ca. 10 – 15 %)
- Interzeption für wasserhaushaltliche Untersuchungen nicht vernachlässigbar
- Zusammenwirken der Teilprozesse der Interzeption → s. Bild 4.15



- P - Freilandniederschlag (über dem Pflanzenbestand)
- P_d - direkt durchfallender Niederschlag (kein Kontakt mit der Vegetation)
- P_t - von der Vegetationsoberfläche abtropfender Niederschlag
- P_{st} - Stammabfluss
- I_g - Interzeptionsgewinn (durch abgesetzten bzw. abgefangenen Niederschlag)
- I_v - Interzeptionsverlust (Niederschlag, der nicht den Boden erreicht)
- I_r - Interzeptionsspeicherhöhe (oft auch mit S bezeichnet)

Bild 4.15: Zusammenwirken der Teilprozesse der Interzeption (aus BAUMGARTNER, LIEBSCHER, 1990)

*** Haupteinflussgrößen auf die Interzeption:****- meteorologische Faktoren:**

- Niederschlag (Dauer, Höhe, Intensität, zeitliche Verteilung, Art)
- Windgeschwindigkeit
- potenzielle Verdunstung

- Vegetationsfaktoren:

- Vegetationsart (Wald, landwirtschaftliche Kulturen)
- Vegetationsbedeckungsgrad
- Vegetationsalter
- jahreszeitliche Entwicklung

*** messtechnische Erfassung der Interzeption:**

- vergleichende Niederschlagsmessungen über- und unterhalb des Vegetationsdaches (für Wald relativ unkompliziert, für landwirtschaftliche Kulturen kompliziert)

*** Methodik der Interzeptionsermittlung:**

- Ermittlung des maximalen (potenziellen) Interzeptionsspeichervermögens S_{\max}
- Ermittlung des realen Interzeptionsspeichervermögens S
- Berechnung der Interzeptionsverdunstung
- Ermittlung des Niederschlages, der die Bodenoberfläche erreicht

*** Ermittlung des maximalen Interzeptionsspeichervermögens:****► für Wald:**

- Verwendung des maximalen Speichervermögens S_{\max} (Werte für verschiedene Waldarten, ermittelt aus Messungen → s. Tabelle 4.13)

Tabelle 4.13: Werte des maximalen Speichervermögens S_{\max} für verschiedene Waldtypen

Waldtyp	S_{\max} [mm]
Nadelwald	6
Laubwald	5
bei zusätzlicher Kraut- und Strauchschicht unterhalb des Baumbestandes	+ 2
Kahlschlag	2

► für landwirtschaftliche Kulturen:

- Verwendung des maximalen Blattflächenindex BFI_{\max}
- Blattflächenindex: Verhältnis von Blattfläche zu Bodenoberfläche → Maß für die Üppigkeit der Vegetation (u.a. in der Landwirtschaft gebräuchlicher Parameter)
- Blattflächenindizes BFI_{\max} für verschiedene landwirtschaftliche Kulturen → s. Tabelle 4.14

*** Ermittlung des realen Interzeptionsspeichervermögens:****► reales Interzeptionsspeichervermögen für Nadelwald:**

- Überlagerung von Nadelwuchs- und Nadelabwurf
- reales Interzeptionsspeichervermögen S vorrangig abhängig von:
 - Baumart
 - Lebensalter
 - anthropogenen Schädigungen bzw. extremen klimatischen Einflüssen
- mittlerer jahreszeitlicher Verlauf von S für Nadelbäume → s. Bild 4.16

Tabelle 4.14: Blattflächenindizes BFI_{max} für verschiedene landwirtschaftliche Kulturen

Pflanzenart	BFI_{max} []	Quelle
Zuckerrüben	3,5 – 3,8 6,0	HOYNINGEN-HUENE (1983) BOUMAN ET AL. (1992)
Futterrüben	4,9 – 5,1	HOYNINGEN-HUENE (1983)
Hafer	~2,5	HOYNINGEN-HUENE (1983)
Kartoffeln	5,2	HOYNINGEN-HUENE (1983)
Wintergerste	10,0	BOUMAN ET AL. (1992)
Winterroggen, Winterweizen	7,0	BOUMAN ET AL. (1992)
Raps	6,0	GEISLER (1983)
Silomais	10,0	GEISLER (1983)
Mais: 4 Pflanzen/m ²	1,2	HOYNINGEN-HUENE (1983)
12 Pflanzen/m ²	3,5	HOYNINGEN-HUENE (1983)
32 Pflanzen/m ²	8,0 – 10,0	HOYNINGEN-HUENE (1983)
Gras: spärlich	1,0	SCHROEDER, BERGER (2004)
üppig	5,0	SCHROEDER, BERGER (2004)
Sträucher	4,0 – 8,0	SCHROEDER, BERGER (2004)

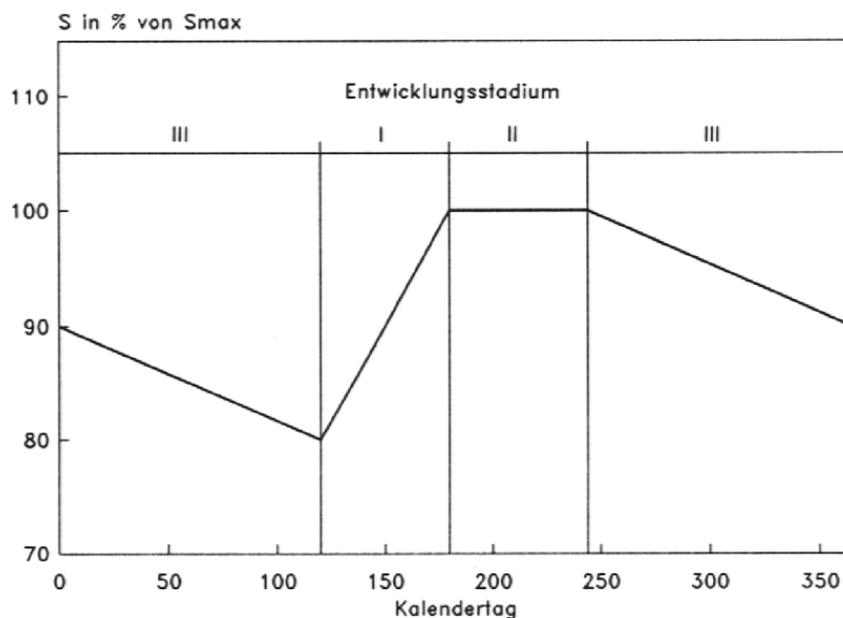


Bild 4.16:

Jahreszeitlicher Gang der realen Interzeptionsspeicherkapazität für Nadelwald (aus DUNGER, 2006)

- Entwicklungsstadien:

- Stadium I: Überlagerung von Nadelabwurf und Maiwuchs (Mai/Juni)
- Stadium II: Gleichgewicht zwischen Nadelwachstum und Nadelabwurf (Juli/August)
- Stadium III: ausschließlich Nadelabwurf (September-April)

► reales Interzeptionsspeichervermögen für Laubwald:

- Methodik ähnlich wie bei Nadelwald
- mittlerer jahreszeitlicher Verlauf von S für Laubwald → s. Bild 4.17
- Entwicklungsstadien:
 - Stadium I: Mobilisierungsphase
 - Stadium II: Wachstumsphase
 - Stadium III: Depositionsphase (Laubabwurf)
 - Stadium IV: Ruhephase

- Laubwaldtypen hinsichtlich der zeitlichen Zuordnung der Entwicklungsstadien:
→ Frühentwickler (z.B. Birke, Linde, Weide, Kastanie) bzw. Spätentwickler (z.B. Buche, Eiche)

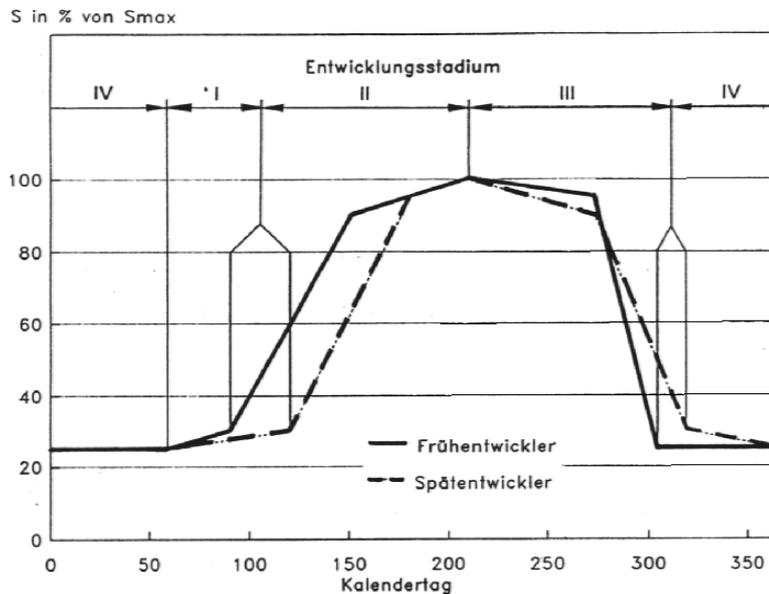


Bild 4.17:

Jahreszeitlicher Gang der realen Interzeptionsspeicherkapazität für Laubwald (aus DUNGER, 2006)

- Berücksichtigung des Alters des Baumbestandes (Einteilung in 4 Wuchsklassen):
→ Jungwuchs (bis zum Beginn des Kronenschlusses): $S = 0,315 S_{\max}$
→ Dickung (< 5 cm mittlerer Brusthöhendurchmesser): $S = 0,6 S_{\max}$
→ Stangenholz (< 20 cm Brusthöhendurchmesser): $S = 0,8 S_{\max}$
→ Altholz (20 cm Brusthöhendurchmesser): $S = S_{\max}$
- Berücksichtigung anthropogener und extremer klimatischer Einflüsse:
→ keine Beeinflussung: $S = S_{\max}$
→ geringe Beeinflussung: $S = 0,9 S_{\max}$
→ spürbare Beeinflussung: $S = 0,7 S_{\max}$
→ starke Beeinflussung: $S = 0,4 S_{\max}$

► **reales Interzeptionsspeichervermögen für landwirtschaftliche Kulturen:**

- mittlerer jahreszeitlicher Verlauf des Blattflächenindex BFI ausgewählter Kulturen → s. Bild 4.18

* **Berechnung der Interzeptionsverdunstung:**

► **Verwendung empirischer Gleichungen auf der Grundlage von Experimenten**

- für Wald:

$$EI = S (1 - e^{-P/S}) + 0,05 * P \quad (4.33)$$

mit EI - reale Interzeptionsverdunstung [mm]

S - realer Interzeptionsspeicher [mm]

P - Niederschlagsmenge [mm]

- für landwirtschaftliche Kulturen (Randbedingungen: $EI_{\min} = 0$ für $BFI = 0$, $EI_{\max} = P$):

$$EI = -0,42 + 0,245 P + 0,2 BFI - 0,0111 P^2 + 0,0271 P BFI - 0,0109 BFI^2 \quad \text{für } P < P_{\text{GRENZ}} \quad (4.34)$$

$$EI = 0,935 + 0,498 BFI - 0,00575 BFI^2 \quad \text{für } P > P_{\text{GRENZ}} \quad (4.35)$$

$$\text{wobei Grenzniederschlag } P_{\text{GRENZ}} = 11,05 + 1,223 BFI \quad (4.36)$$

mit BFI - Blattflächenindex [], alle anderen Größen → s. Gleichung 4.33

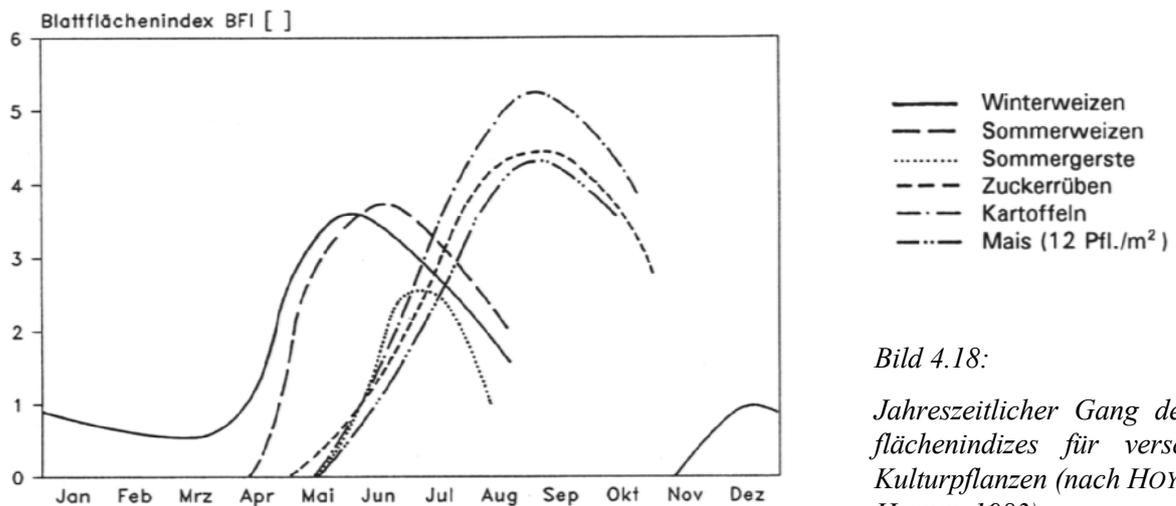


Bild 4.18:

Jahreszeitlicher Gang der Blattflächenindizes für verschiedene Kulturpflanzen (nach HOYNINGEN-HUENE, 1983)

*** Ermittlung des Niederschlages, der die Bodenoberfläche erreicht:**

- Anwendung der einfachen Bilanzgleichung:

$$P_B = P - EI \quad (4.37)$$

mit P_B - Bestandsniederschlag (Niederschlag, der die Bodenoberfläche erreicht) [mm]

P - Freilandniederschlag [mm]

EI - Interzeptionsverdunstung [mm]

*** Bedeutung der Interzeption für den Stoffhaushalt:**

- Aufnahme/Verlagerung von Luftschadstoffen infolge Interzeption besonders für Waldflächen wesentlich höher als für Freiflächen (Auskämmen/Abfangen von Niederschlag)
- gilt insbesondere für die mit Säureeintrag verbundenen Anionen Cl , NO_3 und SO_4 (quantitative Untersuchungen → s. Bild 4.19: hoher Anteil abgesetzter/abgefangener Niederschläge 1982)

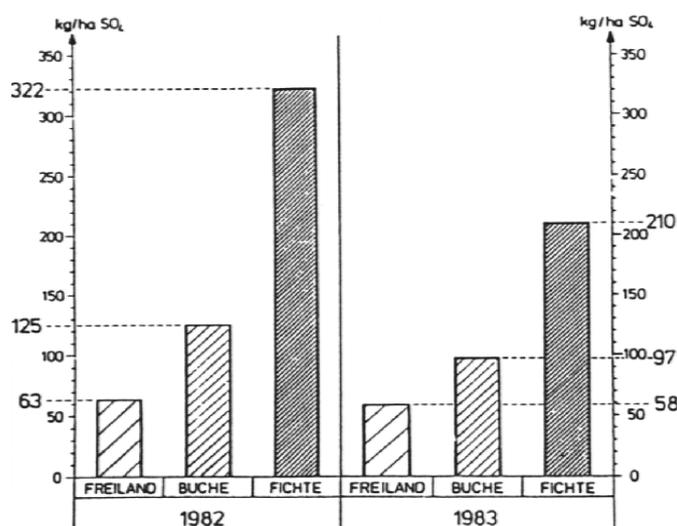


Bild 4.19:

Jahresdeposition von SO_4 in kg/ha im Freilandniederschlag, von Buchen- und Fichtenbeständen im Reinhardswald (Hessen) für 1982 und 1983 (aus BRECHTEL u.a., 1986)

→ Anwendung von Methoden zur Interzeptionsspeicher- und -verdunstungsberechnung → s. Übung 10

5. Abfluss und Durchfluss

5.1. Definitionen, Abflusskomponenten

* Abfluss:

- Wasservolumen, das pro Zeiteinheit ein Einzugsgebiet ober- und unterirdisch durch den Ausflussquerschnitt verlässt (→ s. Bild 5.1)
- Maßeinheiten: mm/a, mm/d, l/(s * km²)

* Durchfluss:

- Wasservolumen, das pro Zeiteinheit einen definierten oberirdischen Fließquerschnitt (Durchflussquerschnitt, Pegel), z.B. Flussquerschnitt durchfließt (→ s. ebenfalls Bild 5.1)
- Maßeinheiten: m³/s, l/s

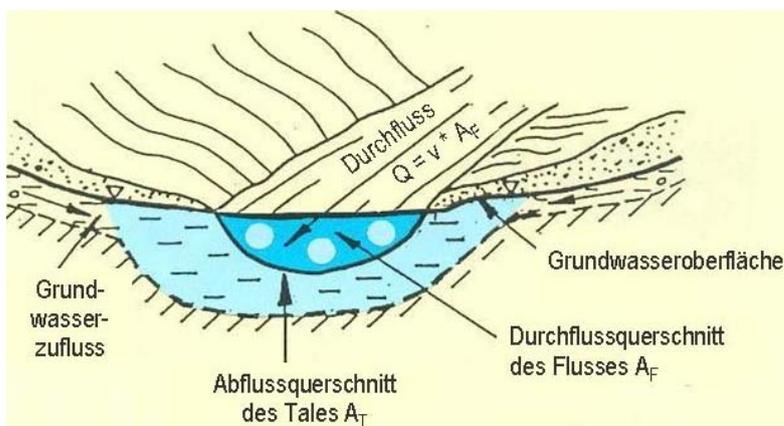


Bild 5.1:

Abfluss und Durchfluss an einem Fließquerschnitt (aus DYCK, PESCHKE, 1995)

* Abflusskomponenten (→ s. Bild 5.2):

► Direktabfluss:

- Oberflächenabfluss (Landoberflächenabfluss) RO: Bildung an der Bodenoberfläche
- hypodermischer Abfluss (bodeninnerer, lateraler Abfluss, Zwischenabfluss) RH: Bildung in der Aerationzone (wasserungesättigten Bodenzone) an wasserstauenden Schichten

► Basisabfluss:

- Grundwasserabfluss RG: Bildung in der gesättigten Grundwasserzone

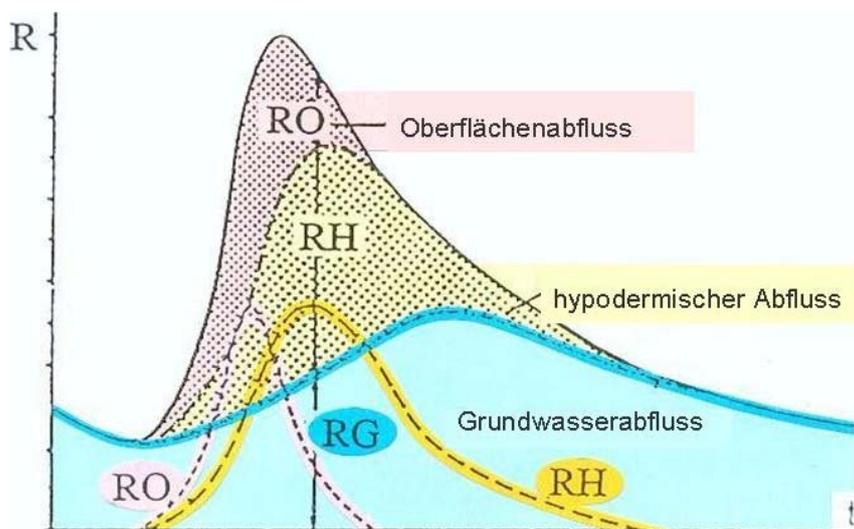


Bild 5.2:

Zusammensetzung einer Abflussganglinie aus den Komponenten Oberflächenabfluss RO, hypodermischer Abfluss RH und Grundwasserabfluss RG (nach BAUMGARTNER, LIEBSCHER, 1990)

*** Teilvorgänge des Abflussprozesses:**

- Abflussbildung in den Einzugsgebieten (vorrangig an die Prozesse der Infiltration und Versickerung gebunden, vgl. Abschnitt 5.6.3)
- Abflusskonzentration im Gewässernetz der Abflussbildungsgebiete (vgl. Abschnitt 5.7)
- Abflussverlauf in den Wasserläufen (vgl. Abschnitt 5.7)

*** Methoden zur Durchflussbestimmung:**

- Messmethoden (s. Abschnitt 5.2)
- über die Umrechnung von gemessenen Wasserständen (s. Abschnitt 5.4)
- für überschlägige Abschätzungen: Berechnung (s. Abschnitte 5.3 und 5.7)

5.2. Messung des Durchflusses

5.2.1. Überblick über häufig angewendete Verfahren

*** Überblick:**

→ s. Tabelle 5.1

Tabelle 5.1: Überblick über gebräuchliche Messverfahren zur Durchflussbestimmung

Messverfahren	Anwendungen
Gefäßmessung	für sehr kleine Durchflüsse (einige wenige l/s)
Messwehr	für kleine und mittlere Durchflüsse (max. 3 m ³ /s)
Venturikanal	analog Messwehr, Einsatz auch bei stark verschmutztem Wasser
(Hydrometrischer) Messflügel	großer Messbereich (einige l/s ... einige 100 m ³ /s) Einsatz bei geringen Turbulenzen und geringer Verkrautung
Schwimmermessung	nur für Abschätzung der Fließgeschwindigkeit
Tracermessung (Verdünnungsmessung)	für kleine und mittlere Durchflüsse (l/s ... wenige m ³ /s) Einsatz auch bei starken Turbulenzen (Gebirge) und im Falle starker Verkrautung möglich
Ultraschallmessung	analog Messflügel
Elektromagnetische Messung	Messbereich analog Messflügel Einsatz auch bei starken Turbulenzen und starker Verkrautung

*** Kurzbeschreibung der am meisten angewendeten Verfahren (außer Messwehr-, Flügel- und Tracermessung – diese werden ausführlicher dargestellt):****► Gefäßmessung :**

- direkte Messmethode bei kleineren Wassermengen (< 5 l/s)
- Registrierung der Wassermenge pro Zeiteinheit mittels skaliertem Messeimer und Stoppuhr
- *Anwendung:*
 - bei Quellschüttungs- und Drainageauslaufmessungen
 - im Falle der Durchflussmessung von kleinen Rinnsalen
 - während des Pumpversuches (vgl. Vorlesung Hydrogeologie I) bei geringer Förderleistung

► Venturikanal:

- Einschnitt im Gewässer, bestehend aus 3 Teilbereichen (→ s. auch Bild 5.3):
 - Einlauf- bzw. Beruhigungsteil
 - Diffusor (Einschnürungsteil)
 - Nachlaufstrecke

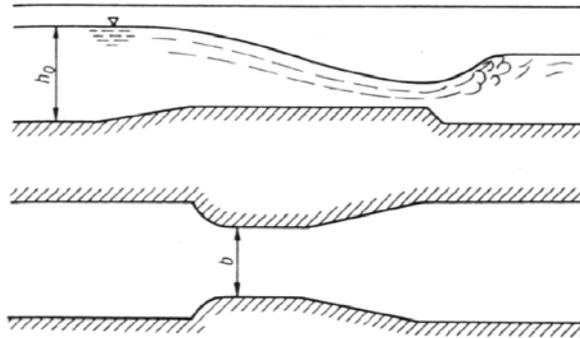


Bild 5.3:

Messprinzip des Venturikanals (aus DYCK, PESCHKE, 1995)

- lediglich Messung des Wasserspiegels h_0 notwendig
- Berechnungsformel:

$$Q = (2/3)^{3/2} * C * C_v * (g * b * h_0^{3/2})^{0,5} \quad (5.1)$$

mit	Q	- Durchfluss [m ³ /s]
	C	- Reibungsbeiwert (0.95 < C < 1.00)
	C _v	- Geschwindigkeitsbeiwert (1.00 < C _v < 1.30)
	g	- Gravitationskonstante [m/s ²] (g = 9.81 m/s ²)
	b	- Breite an der schmalsten Stelle im Diffusor [m]
	h ₀	- Oberwassertiefe [m]

- Erhöhung der Fließgeschwindigkeit im Bereich des Venturikanals → keine Gefahr des Absetzens von mitgeführten Partikeln (kein Verlanden) → Einsatz vor allem bei Abwasser
- verwendete Materialien: meist Beton, manchmal glasfaserverstärkte Kunststoffrippen
- Messbereich: 10 l/s ... 3 m³/s (max. 5 m³/s)

► Schwimmermessung:

- Messung der Fließgeschwindigkeit in der Strommitte des Gewässers mittels Schwimmer → Messung der maximalen Fließgeschwindigkeit
- Berechnung der Fließgeschwindigkeit nach dem Weg-Zeit-Gesetz:

$$v_0 = s / t \quad (5.2)$$

mit	v ₀	- Geschwindigkeit an der Oberfläche in der Mitte des Gewässers [m/s]
	s	- Fließweg [m]
	t	- Fließzeit [s]

- Problem: maximale Fließgeschwindigkeit $v_0 \neq$ mittlere Fließgeschwindigkeit v (→ vgl. auch Bild 5.4)

- Schwimmermessungen liefern nur groben Anhaltswerte (Fehler z.T. > 15 %)
- Umrechnung von v_0 auf v mittels Koeffizienten möglich (→ s. Tabelle 5.2)

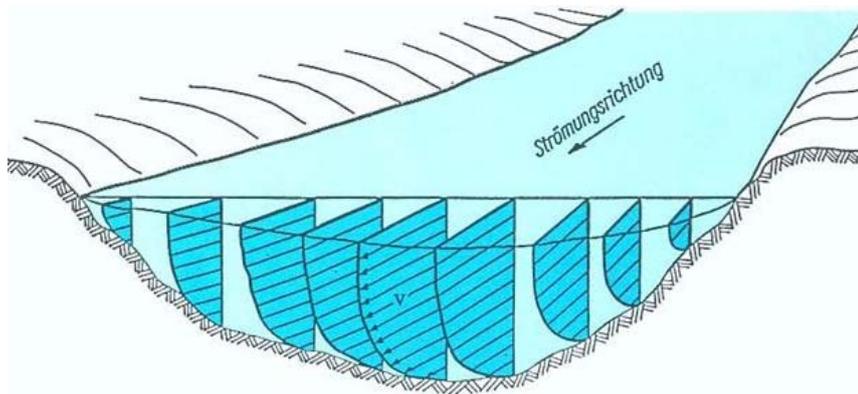


Bild 5.4:

Fließgeschwindigkeit und Fließquerschnitt (nach DYCK, PESCHKE, 1995)

Tabelle 5.2: Koeffizienten für die Umrechnung von v_0 auf v

Mittlere Gewässertiefe [cm]	Koeffizient
30	0,66
60	0,68
90	0,70
120	0,72
150	0,74
180	0,76
270	0,77
370	0,78
460	0,79
≥ 610	0,80

- Berechnung des Durchflusses aus mittlerer Fließgeschwindigkeit und Fließquerschnitt:

$$Q = v * A \quad (5.3)$$

mit Q - Durchfluss [m^3/s]
 v - mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]
 A - Durchflussfläche [m^2]

► Ultraschallmessung:

- Schallwellen breiten sich mit der Strömung schneller aus als gegen die Strömung
- Messprinzip → s. Bild 5.5 (Anordnung mehrerer Messstrecken übereinander → mittlere Fließgeschwindigkeit)
- Berechnung des Durchflusses analog Gleichung 5.3

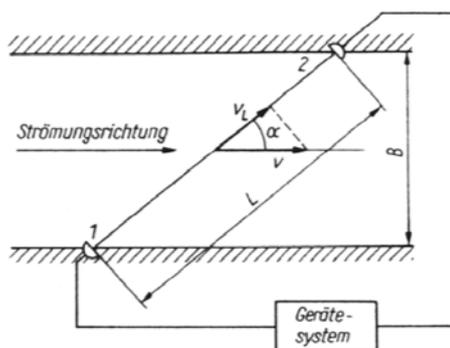


Bild 5.5:

Anordnung des Gerätesystems bei der Ultraschallmessung (aus DYCK, PESCHKE, 1995)

5.2.2. Durchflussmessung mittels Messwehr

► Methodik:

- Einbau eines Messwehres (Messblende) in das Fließprofil des Vorfluters (→ s. Bild 5.6)
- Aufstau des Wassers oberhalb des Messwehres

► Materialien:

- abhängig von Belastung (Größe, Fließgeschwindigkeit)
- Kunststoffe
- verzinktes Stahlblech

► Beachte:

- Abdichtung des Messwehres zum Untergrund (Verhinderung der Um- und Unterströmung)
- scharfkantige Wehrkante (Abrisskante)
- Belüftung (vgl. Bild 5.6) → vollständiger Überfall, keine Beeinflussung des Wasserstandes im Oberwasser durch das Unterwasser (kein Rückstau, → vgl. Bild 5.6)

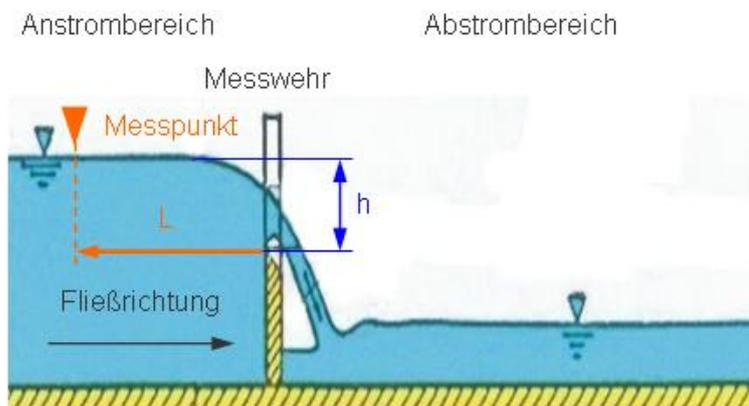


Bild 5.6:

Prinzip des Messwehres (nach SCHRÖDER u. a., 1994)

► Abhängigkeit der Überlaufmenge (Durchflussmenge Q):

- von der Wehrform (→ s. Bild 5.7):
Dreieckswehr (THOMSON-Wehr): bis ca. 100 l/s anwendbar
Rechteckwehr (PONCELET-Wehr): bis ca. 1 m³/s (max. 3 m³/s) anwendbar
- von der Überfallhöhe h (vgl. Bilder 5.6 und 5.7)
- vom Überfallbeiwert μ (materialabhängig → s. Eichwerte der Hersteller)

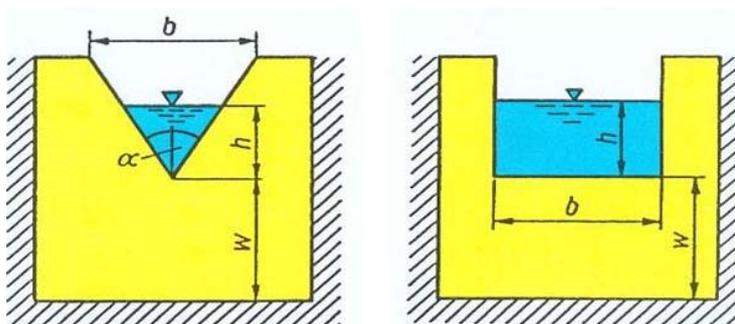


Bild 5.7:

Dreieckswehr (links) und Rechteckwehr (rechts), nach DYCK, PESCHKE (1995)

► Berechnungsgleichungen für den Durchfluss Q:

$$\text{Dreieckswehr: } Q = 8/15 \mu (2g)^{0,5} * \tan(\alpha/2) * h^{5/2} \quad (5.4)$$

- mit Q - Durchfluss [m³/s]
 μ - Überfallbeiwert [] (Herstellerangabe: $\mu = 0,578$ für $\alpha = 90^\circ$)
 α - Ausschneidewinkel [°]
h - Überfallhöhe [m], Messung im Abstand $L \geq 4h$ vor dem Wehr
g - Gravitationskonstante [m/s²] ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)

Rechteckwehr: $Q = 2/3 \mu (2g)^{0,5} * b * h^{3/2}$ (5.5)

mit μ - Überfallbeiwert [] (Eichangaben des Herstellers, meist gilt für μ : $0,61 \leq \mu \leq 0,65$, μ -Berechnung \rightarrow s. auch Gleichung 5.6)

b - Wehrbreite [m]

(alle anderen Größen \rightarrow s. Gleichung 5.4)

$$\mu = 0,615 \left[1 + \frac{l}{1000h + 1,6} \right] \left[1 + 0,5 \left(\frac{h}{h+w} \right) \right]$$
 (5.6)

mit μ - Überfallbeiwert []

h - Überfallhöhe [m], Gültigkeit für $0,025 \text{ m} \leq h \leq 0,80 \text{ m}$ und $h/w \leq 1$

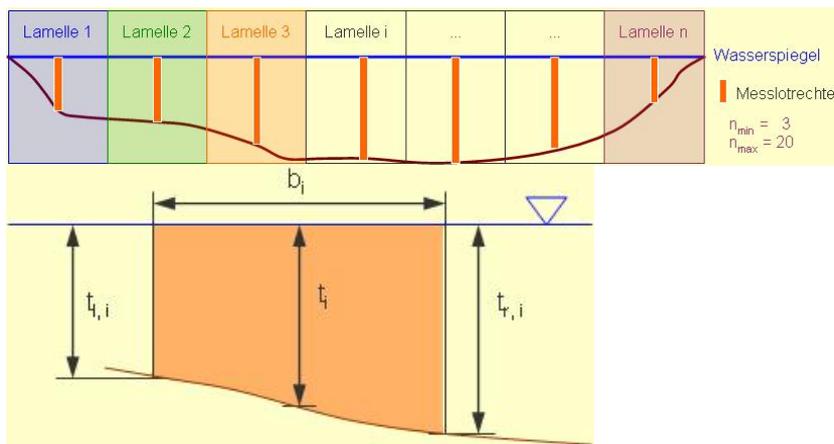
w - Höhe des Wehreinchnitts über Gewässersohle [m] (s. Bild 5.7), Gültigkeit für $w \geq 0,3 \text{ m}$

- **Auswertung einer Wehrmessung (Dreieckswehr) \rightarrow s. Übung 11 (Teilaufgabe a)**

5.2.3. Durchflussermittlung mittels hydrometrischem Messflügel

*** Messprinzip:**

- Unterteilung des Fließquerschnitts in mehrere vertikale Lamellen (\rightarrow vgl. Bilder 5.4 und 5.8)
- Ermittlung von Durchflussfläche und Fließgeschwindigkeit einer jeden Lamelle (\rightarrow s. Bild 5.9)
- Messung der Lamellenfließgeschwindigkeit in definierten Tiefen mittels Messflügel (\rightarrow s. Bild 5.10)
- genaueste und meistangewendete Methode bei größeren Durchflüssen ($Q > 100 \text{ l/s}$)



- b - Breite des Fließquerschnittes
- b_i - Lamellenbreite
- t_l - Tiefe am linken Lamellenrand
- t - Tiefe in der Lamellenmitte
- t_r - Tiefe am rechten Lamellenrand

Bild 5.8:

Unterteilung des Fließquerschnitts in vertikale Lamellen

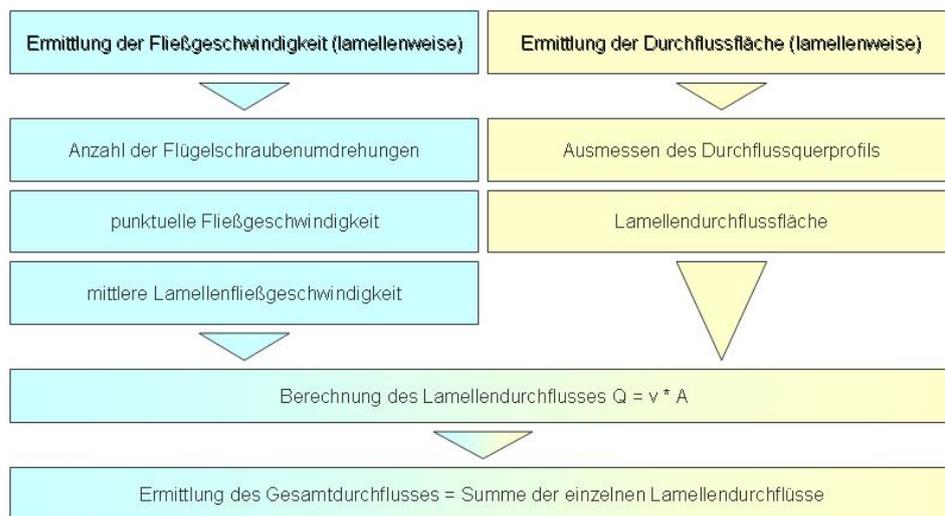


Bild 5.9:

Algorithmus der Durchflussermittlung in Fließgerinnen mittels Messflügel



Bild 5.10:

Messflügel (Bildquelle: Firma Ott)

*** Ermittlung der punktuellen Fließgeschwindigkeit:**

- Fließgeschwindigkeit v am Messpunkt = f (Umdrehungsanzahl n der Flügelschraube des Messflügels)
- Umrechnung der Umdrehungsanzahl in Fließgeschwindigkeit mittels Flügelgleichung:

$$v = v_0 + b * n \quad (5.7)$$

mit v - Fließgeschwindigkeit [m/s]

v_0 - Anlaufgeschwindigkeit [m/s]

b - Flügelkonstante (Eichangabe des Herstellers)

n - Impulsrate (Umdrehungsgeschwindigkeit) [meist Umdrehungen/min]

- Ermittlung von Anlaufgeschwindigkeit und Flügelkonstante durch Eichung (jeder Messflügel wird vor Verkauf im speziellen Eichkanälen getestet und geeicht), Beispiel → s. Bild 5.11

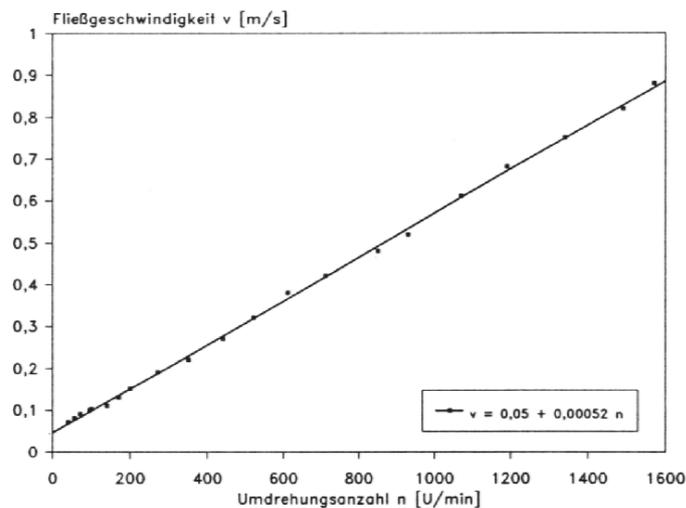


Bild 5.11:

Beispiel für eine Eichkurve eines Messflügels

*** Ermittlung der mittleren Fließgeschwindigkeit v_m der Lamelle i ($v_{m,i}$):**

- Fließgeschwindigkeit = f (Tiefe)
 - hohe Fließgeschwindigkeiten: nahe der Gewässeroberfläche
 - geringe Fließgeschwindigkeiten: nahe dem Gewässergrund
 - Messung der Fließgeschwindigkeit in verschiedenen Tiefen in der Mitte einer jeden Lamelle notwendig
- Anzahl der Messpunkte abhängig von Gewässertiefe: ein bzw. einige wenige vertikale Messpunkte bei geringer Gewässertiefe, viele Messpunkte bei großer Gewässertiefe

- Berechnungsgleichungen:

$$\text{Einpunktmessung: } v_{m,i} = v_{0,4t} \quad (5.8)$$

$$\text{Zweipunktmessung: } v_{m,i} = 1/2 (v_{0,2t} + v_{0,8t}) \quad (5.9)$$

$$\text{Dreipunktmessung: } v_{m,i} = 1/3 (v_{0,2t} + v_{0,5t} + v_{0,8t}) \quad (5.10)$$

$$\text{Sechspunktmessung: } v_{m,i} = 1/10 (v_o + 2 v_{0,2t} + 2 v_{0,4t} + 2 v_{0,6t} + 2 v_{0,8t} + v_s) \quad (5.11)$$

mit $v_{m,i}$ - mittlere Lamellenfließgeschwindigkeit [m/s]

v_o - Fließgeschwindigkeit kurz unterhalb der Gewässeroberfläche [m/s]

v_s - Fließgeschwindigkeit kurz oberhalb der Gewässersohle [m/s]

$v_{0,2t}$ - Fließgeschwindigkeit [m/s] in 20 % der Gewässertiefe über der Sohle ($v_{0,4t}$... $v_{0,8t}$ analog)

* **Ermittlung der Lamellendurchflussfläche A_i :**

$$A_i = t_{m,i} * b_i \quad (5.12)$$

mit A_i - Lamellendurchflussfläche [m²]

$t_{m,i}$ - mittlere Lamellentiefe [m]

b_i - Lamellenbreite [m]

wobei:

$$t_{m,i} = \frac{t_l + 2t + t_r}{4} \quad (5.13)$$

mit $t_{m,i}$ - mittlere Lamellentiefe [m]

t_l - Gewässertiefe am linken Lamellenrand [m]

t_r - Gewässertiefe am rechten Lamellenrand [m]

t - Gewässertiefe in der Lamellenmitte [m]

- Lamellenbreite:

→ meistens: als konstant über die gesamte Gewässerbreite festgelegt

→ selten: Variation (größere Lamellenbreite in Ufernähe wegen geringer Fließgeschwindigkeit und kleinere Lamellenbreite in der Strommitte wegen großer Fließgeschwindigkeit)

- Lamellenanzahl:

→ 15 - 20 bei Flüssen

→ 5 - 10 bei Bächen und Kanälen

→ 3 - 5 bei kleinen Gräben, kleinen Bächen oder kleinen Kanälen

* **Berechnung des Lamellendurchflusses Q_i :**

$$Q_i = v_{m,i} * A_i = v_{m,i} * t_{m,i} * b_i \quad (5.14)$$

(Symbole → analog Gleichungen 5.8 bis 5.12)

* **Berechnung des Gesamtdurchflusses Q :**

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (5.15)$$

mit Q - Gesamtdurchfluss des Fließgewässers [m³/s]

Q_i - Lamellendurchfluss der i-ten Lamelle [m³/s]

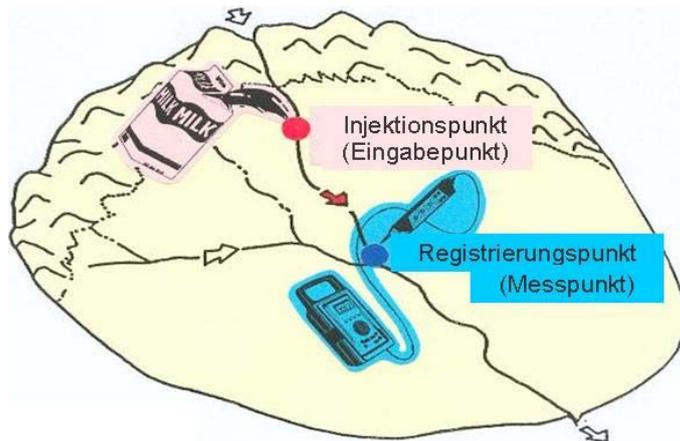
n - Lamellenanzahl []

- **Auswertung von Messflügelmessungen → s. Übungen Hydrogeologie I**

5.2.4. Tracermessung (Verdünnungsmethode)

* Methodik des Tracereinsatzes in Fließgewässern:

- Prinzip der Tracermethode (Verdünnungsmethode) → s. Bild 5.12
- Eingabe einer Lösung meist stabiler (vereinzelt radioaktiver) Substanzen
- Verdünnung der injizierten Lösung infolge des Durchflusses im Fließgewässer
- Registrierung der Tracerkonzentration in einiger Entfernung vom Injektionspunkt
- Messung von Tracerkonzentration und -menge an der Injektions- und Registrierungsstelle
- Berechnung von Fließgeschwindigkeit und Durchflussmenge



⇔ Fließrichtung

Bild 5.12:

Anwendungsprinzip der Tracermethode in Fließgewässern (nach MAIDMENT, 1992)

* Anwendungsfälle, Vor- und Nachteile der Tracermethode:

- **Anwendung** in solchen Fällen, in denen andere Durchflussmessmethoden (Messwehr, Messflügel, Gefäßmessung) versagen:
 - in sehr kleinen Bächen mit geringer Wassertiefe (und ggf. geringem Fließgefälle)
 - bei sehr großen Fließgeschwindigkeiten (Gebirge, Hochwasserperioden)
 - in Bergbächen mit stark turbulenter Fließverhalten (hohes Gefälle, Steinblöcke)
 - in Vorflutern mit hohem Sedimenttransport bzw. starker Uferverkräutung
- **Vorteile der Tracermethode:**
 - einfach in der Anwendung, Berechnung und Interpretation
 - benötigt weniger Zeit als die meisten anderen Methoden (einige Minuten ... 1 Stunde)
 - schnelle Änderungen des Abflusses (z.B. während eines Hochwasserereignisses) erfassbar
- **Nachteile der Tracermethode:**
 - viele Fehlermöglichkeiten (z.B. keine vollständige Durchmischung des Tracers im Bach- bzw. Flusswasser, Tracerverluste durch Adsorption, Untergrundinfiltration bzw. Verdunstung)
 - große Tracermengen bei hohen Durchflussmengen notwendig → teuer
 - ökologische Risiken → Behördengenehmigungen notwendig

* Anforderungen an Tracermaterialien:

- hohe Löslichkeit im Bach- bzw. Flusswasser auch bei geringen Temperaturen
- kaum natürliches Vorkommen des Tracers im Oberflächenwasser
- keine Umwandlung im Oberflächenwasser, keine Traceraufnahme durch das Sediment, durch Pflanzen oder Tiere
- einfache, preiswerte Tracermessbarkeit
- keine Gefährdung von Mensch und Tier durch den Tracereinsatz (Injektionskonzentration)

* **gebräuchliche Tracersubstanzen:**

- hauptsächlich (für Oberflächenwasser) verwendet:
 - Salze (Natriumchlorid, Kaliumchlorid, Lithiumsalze)
 - Fluoreszenztracer
- weitere Tracersubstanzen:
 - radioaktive (z.B. ^{134}J , ^{82}Br , ^{198}Au , ^{24}Na) und stabile Isotope (z.B. ^{15}N , ^2H , ^{18}O)
 - Detergenzien ("Weich- und Weißmacher")
 - biologische Tracermaterialien (Bakterien, Sporen und Pollen)

* **Kurzcharakteristik der hauptsächlich verwendeten Tracersubstanzen:**▶ **Salztracer:**

- Anwendung aus ökologischer Sicht unbedenklich, wenn folgende Maximalkonzentrationen in Oberflächengewässern nicht überschritten werden:
 - 10 g/l für Natriumchlorid
 - 5 g/l für Kaliumchlorid
- relativ hohe Wasserlöslichkeiten:
 - NaCl: 359 g/l bei 20 °C
 - KCl: 342 g/l bei 20 °C
- Tracermessung mittels Messung der Chloridkonzentration bzw. durch Messung der elektrischen Leitfähigkeit

▶ **Fluoreszenztracer (Uranin, Fluoreszin):**

- Vorteile: hohes Färbevermögen, hohe Messempfindlichkeit, billig
- Nachteile: pH-Wertabhängigkeit der Fluoreszenz, labiles Adsorptions- und Oxidationsverhalten

▶ **radioaktive und stabile Isotope, Sporen, Bakterien, Pollen:**

- analog Grundwassereinsatz → vgl. Vorlesungen Modul Hydrogeologie

* **Bestimmung von Fließgeschwindigkeit und Durchfluss mittels Tracermethode (Beispiel → s. Übung 11, Teilaufgabe b):**▶ **Bestimmung der mittleren Fließgeschwindigkeit:**

- Bestimmung der Abstandsgeschwindigkeit durch Messen von Entfernung zwischen Injektions- und Registrierungspunkt und Zeitmessung:

$$v_a = \Delta s / \Delta t \quad (5.16)$$

mit v_a - Abstandsgeschwindigkeit [m/s]

Δs - Entfernung Injektionspunkt - Registrierungspunkt [m]

Δt - Zeit zwischen Tracerinjektion und Tracerankunft am Registrierungspunkt [s]

$$\text{wobei } \Delta t = t_{50\%} - t_0 \quad (5.17)$$

mit t_0 - Zeitpunkt der Tracereingabe am Injektionspunkt

$t_{50\%}$ - Zeitpunkt, zu dem 50 % der Tracermenge am Registrierungspunkt angekommen sind (s. Bild 5.13)

- Tracereingabe in Form eines Momentimpulses (Stoßimpuls, s. Bild 5.13) oder als Eingabe mit konstanter Tracerkonzentration (Stufenfunktion, s. Bild 5.14)

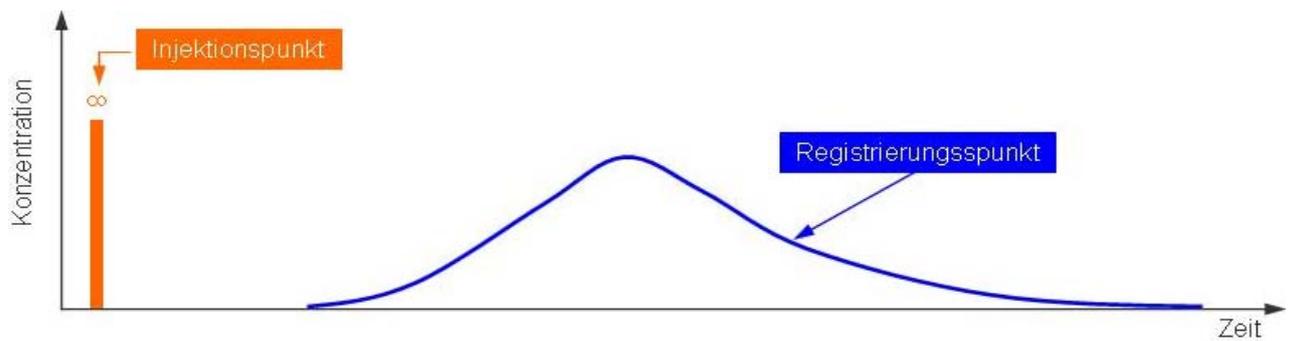


Bild 5.13: Tracereingabe in Form eines Momentanimpulses

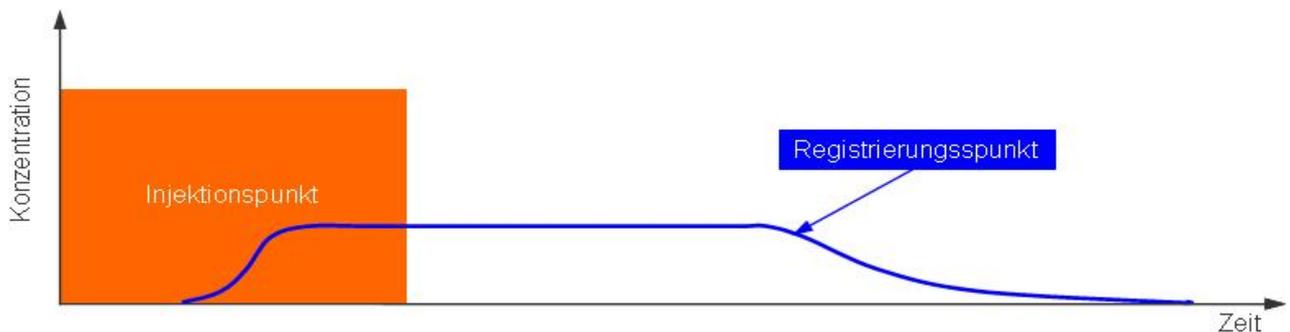


Bild 5.14: Tracereingabe mit konstanter Tracerkonzentration

► **Durchflussermittlung:**

- Durchflussberechnung ist abhängig von der Form der Tracereingabe (s. Bilder 5.13 und 5.14)
- für den Fall der **Tracereingabe als Momentimpuls:**

$$Q = \frac{V * (C_1)}{\int_{t_s}^{t_E} C_2(t) dt - C_0} = \frac{V * (C_1)}{\sum_{i=t_s}^{t_E} (C_2(t_i) - C_0) * \Delta t} \quad (5.18)$$

- mit
- Q - Durchfluss [l/s]
 - V - injiziertes Tracervolumen am Injektionspunkt [l]
 - C₁ - Tracerkonzentration am Injektionspunkt [mg/l]
 - C₂ - Tracerkonzentration am Registrierungspunkt [mg/l]
 - C₀ - Hintergrundtracerkonzentration im Fließgewässer [mg/l]
 - t_s - Beginn der Tracerankunft am Registrierungspunkt (s. Bild 5.13) [s]
 - t_E - Ende der Tracerankunft am Registrierungspunkt (s. Bild 5.13) [s]
 - t_i - Zeitintervall i [s]
 - Δt - Zeitdifferenz zwischen 2 Tracerkonzentrationsmessungen am Registrierungspunkt [s]

- für den Fall der **Tracereingabe mit konstanter Tracerkonzentration:**

$$Q = \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0} * Q_C \quad (5.19)$$

- mit
- Q_C - konstante Tracerinjektionsrate am Injektionspunkt [l/s]
 - (alle anderen Größen → s. Gleichung 5.18)

5.3. Berechnung von Fließgeschwindigkeit und Durchfluss mittels einfacher Fließformeln

- für vereinfachende Betrachtungen bzw. im Rahmen der Planung von Entwässerungsgräben kann die Ermittlung der Fließgeschwindigkeit durch die Anwendung empirischer Fließformeln erfolgen
- in der Praxis am meisten angewendet: Fließformel nach **Manning** und **Strickler** (Näherungslösung):

$$v = k_{St} * (r_{hy})^{2/3} * (I_E)^{1/2} \quad (5.20)$$

mit v - Fließgeschwindigkeit [m/s]

k_{St} - Rauigkeitsbeiwert nach Manning/Strickler [$m^{1/3}/s$] (Werte \rightarrow s. Tabelle 5.3)

r_{hy} - hydraulischer Radius [m] ($r_{hy} = A/l_u$ - Fließquerschnitt/benetzter Umfang \rightarrow s. Bild 5.15)

I_E - hydraulisches Gefälle [m/m]

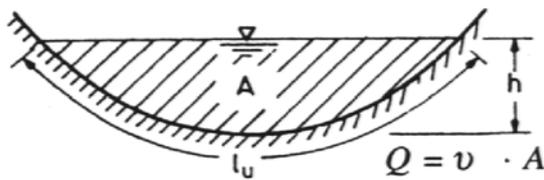


Bild 5.15:

Darstellung zum Verständnis des hydraulischen Radius

Tabelle 5.3: Rauigkeitsbeiwerte nach Manning/Strickler

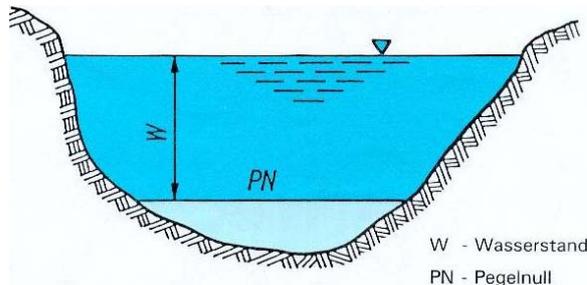
Baustoff	Art, Form, Zustand	k_{St} [$m^{1/3}/s$]
Stahl	Rohre, sehr glatt, neu	100
	Rohre, verkrustet und verrostet, alt	60 ... 78
Asphalt	Werkkanäle aus Walzgussasphalt	70 ... 75
	Kanäle aus Asphaltbeton	72 ... 77
Asphaltzement	Auskleidungen	100
Beton	Zementglattstrich	100
	Beton mit Stahlschalung	90 ... 100
	Beton, geglättet	90
	grobe Betonauskleidung, alter Beton	50 ... 55
Mauerwerk	Ziegelmauerwerk, gut gefugt	75 ... 80
	Mauerwerk, normal	60 ... 70
Naturstein	Haussteinquader	70 ... 80
	sorgfältiges Bruchsteinmauerwerk	70
	normales Bruchsteinmauerwerk	60
	grobes Bruchsteinmauerwerk	50
Fels	Felsausbrüche, sorgfältig bearbeitet	60
	mittelgrober Felsausbruch	25 ... 30
	grober Felsausbruch	15 ... 20
	roher Felsausbruch, mit Sohle aus Beton	40 ... 50
Erde	festes, feines Material	50
	Fein- bis Mittelkies	40 ... 45
	Grobkies	35
	grobes, scholliges Material	30
	mit groben Steinen ausgelegt	25 ... 30
	Erdkanäle und Gräben, stark bewachsen	20 ... 25
	natürliche Flussbetten mit fester Sohle	40
	natürliche Flussbetten mit mäßiger Geschiebeführung	33 ... 35
	natürliche Flussbetten mit starker Geschiebeführung	28
	natürliche Flussbetten, Ufer verkrautet	30 ... 35
	natürliche Flussbetten mit Geröll	30
	Wildbäche mit grobem Geröll im Ruhezustand	25 ... 28
	Wildbäche mit grobem Geröll in Bewegung	19 ... 22

5.4. Wasserstands-Durchfluss-Beziehung

5.4.1. Wasserstandsmessung

* Wasserstand:

- Höhe des Wasserspiegels eines Oberflächengewässers über einer festen Bezugshöhe (Pegelnulld PN)
→ s. Bild 5.16
- PN einnivelliert, PN muss nicht Niveau Gewässersohle entsprechen (→ vgl. Bild 5.16)
- PN darf sich während der Betriebszeit des Pegels bezüglich Höhe nicht verschieben → Gefahr vorhanden während Hochwasser (Erosion, Unterspülung) und Eisstand → stabiler Unterbau



W - Wasserstand
PN - Pegelnulld

Bild 5.16:

Wasserstand und Pegelnulld (nach DYCK, PESCHKE, 1995)

* nichtregistrierende Messgeräte:

► Lattenpegel (→ s. Bild 5.17):

- einfachste Form der Wasserstandsmessung (diskontinuierlich)
- Montage vertikal bzw. entsprechend Uferneigung
- Messgenauigkeit: 1 cm
- Messung i.d.R. täglich einmal (7.00 Uhr MEZ), Ausnahme: z.B. Hochwasserereignisse
- im Falle hoher Wasserstandsunterschiede (Niedrig-/Hochwasser): Verwendung von Staffelpegeln (→ s. Bild 5.18)

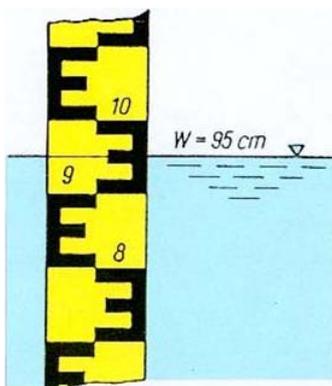
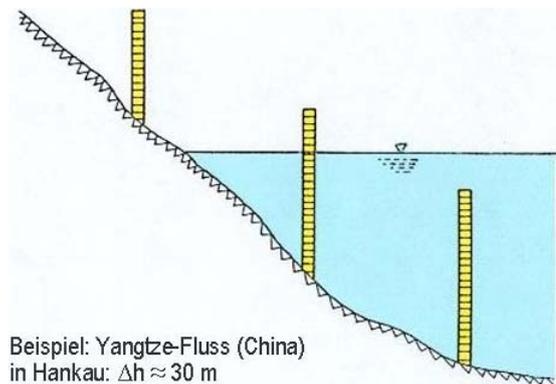


Bild 5.17: Lattenpegel (DYCK, PESCHKE, 1995)



Beispiel: Yangtze-Fluss (China)
in Hankau: $\Delta h \approx 30$ m

Bild 5.18: Staffelpegel (nach SINGH, 1992)

► Hochwasserpegel (Maximumpegel):

- Messung des Maximalwasserstandes während eines Hochwasserereignisses
- Konstruktion → s. Bild 5.19:
 - skaliertes Pegelrohr aus Kork innerhalb eines Pegelrohres
 - Aufwärtsbewegung des Korkstabes während eines Hochwasserereignisses → Fixierung beim maximalen Wasserstand → Ablesen nach dem Hochwasser

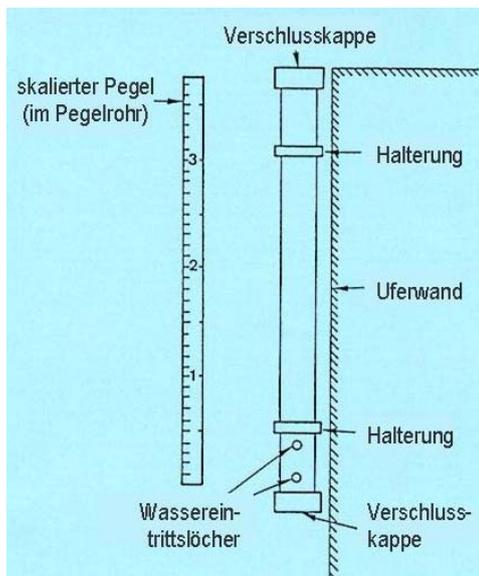


Bild 5.19:

Hochwasserpegel (Maximumpegel), nach SINGH (1992)

* registrierende Pegel:

► mechanischer Schwimmerschreibpegel:

- Konstruktionsprinzip → s. Bild 5.20
- Bewegung eines Schwimmers bei Wasserspiegeländerungen → kontinuierliche Aufzeichnung
- analoge bzw. digitale Transformation der Schwimmerbewegungen (Datenübertragung möglich)
- Positionierung des Schwimmers nicht direkt im Fließgewässer (Beschädigung/Blockieren infolge Hochwasser oder Eisgang möglich), sondern in einem Pegelhaus (→ s. Bild 5.21)
- zu jedem Schreibpegel gehört ein Lattenpegel (zu Kontroll- und Justierzwecken)

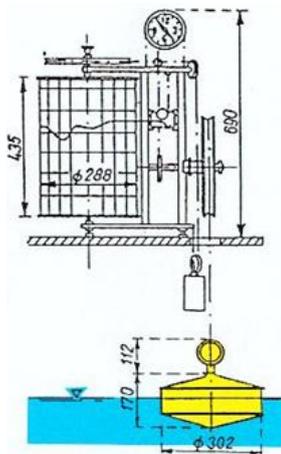


Bild 5.20:

Schwimmerschreibpegel

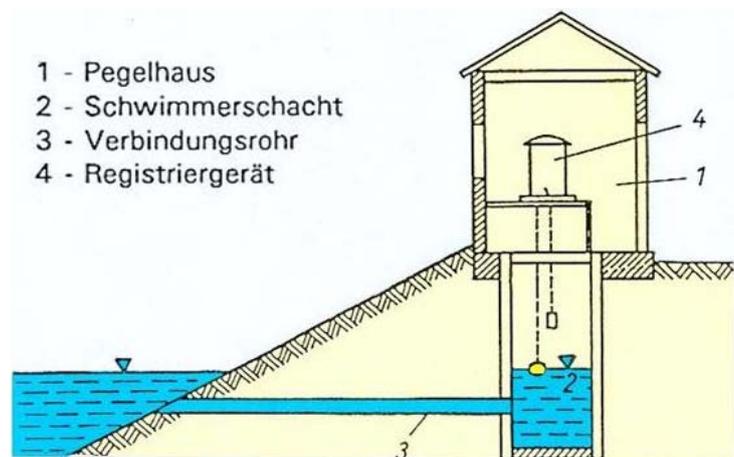
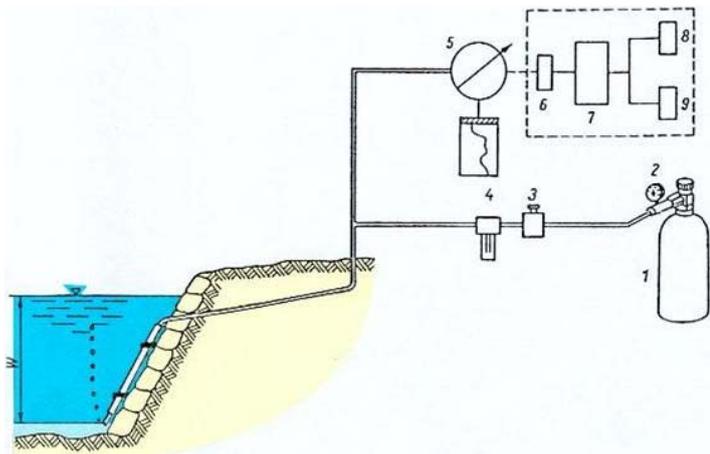


Bild 5.21:

Schreibpegelstation mit Pegelhaus (aus DYCK, PESCHKE, 1995)

► Druckluftpegel:

- Aufbau und Messprinzip → s. Bild 5.22
- weder Schwimmerschacht noch Verbindungsrohr notwendig, dafür jedoch Druckluftflasche
- zuverlässige Messung auch bei starker Feststoffführung
- Gas(gegen)druck ist direktes Maß für den Wasserstand
- Datenerfassung/-aufzeichnung in größerer Entfernung vom Messpunkt möglich
- Nachteil: Messungenauigkeiten (Druckverlust) bei Undichtheiten



- 1 - Druckflasche
- 2 - Druckminderer
- 3 - Regelarmatur
- 4 - Schauglas
- 5 - Druckmanometer
- 6 - Analog-Digital-Wandler
- 7 - Elektronikbaustein
- 8 - Fernübertragung
- 9 - Datenspeicher

Bild 5.22:
Aufbau eines Druckluftpegels (nach DYCK, PESCHKE, 1995)

5.4.2. Darstellung der Wasserstands-Durchfluss-Beziehung

- für jeden Fließquerschnitt (Messpegel) gilt:

$$W = f(Q) \tag{5.21}$$

mit W - Wasserstand [cm ü. PN - Pegelnull]
Q - Durchfluss [m³/s]

- Beispiel für eine Wasserstands-Durchfluss-Beziehung → s. Bild 5.23

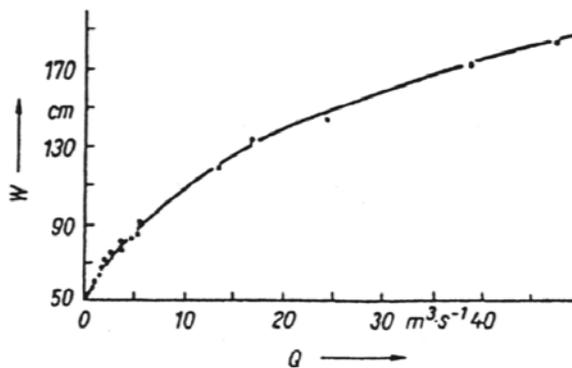


Bild 5.23:
Wasserstands-Durchfluss-Beziehung für den Pegel Bad Blankenburg (Schwarza), nach DYCK, PESCHKE (1995)

- Grundlage: zeitgleiche Wasserstands- und Durchflussmessungen → Durchflusstafel (s. Tabelle 5.4)

Tabelle 5.4: Wasserstands- und Durchflussmessungen für den Pegel Bad Blankenburg (Schwarza)

Nr.	Messdatum	W [cm]	b [m]	h [m]	h _{max} [m]	A [m ²]	v [m/s]	Q [m ³ /s]
1	23.11.1972	118	14,1	0,62	1,21	8,81	1,54	13,6
2	14.02.1973	67	12,0	0,21	0,32	2,52	0,67	1,68
3	11.09.1973	57	10,0	0,13	0,26	1,30	0,47	0,62
4	14.11.1973	78	12,0	0,30	0,48	3,63	0,98	3,59
5	16.07.1974	83	14,0	0,30	0,52	4,26	0,92	4,32
6	14.08.1974	71	12,0	0,24	0,40	2,82	0,71	2,20
7	28.10.1974	133	20,0	0,57	0,88	11,42	1,45	16,6
8	09.12.1974	172	20,0	1,00	1,44	20,10	1,93	38,8
9	30.12.1974	183	20,0	1,16	1,62	23,20	2,05	47,7
10	16.01.1975	91	14,0	0,36	0,50	5,11	1,03	5,26

- analytisch lassen sich Wasserstands-Durchfluss-Beziehungen (\rightarrow vgl. Bild 5.23) mittels Potenzfunktion beschreiben:

$$Q = a (W - b)^n \quad (5.22)$$

mit a, b und n - Formparameter

- Gleichung 5.22 gilt meist nur für bestimmte W- bzw. Q-Bereiche
Ursachen (Änderungen des Durchflussprofils in Abhängigkeit von der Höhe des Durchflusses \rightarrow vgl. auch Bild 5.24):
 - Niedrigwasserrinne
 - Ausuferung im Hochwasserbereich
 - Umflut und Überflutung bei Hochwasser \rightarrow Gültigkeitsbereiche für Gleichung 5.22 angeben!

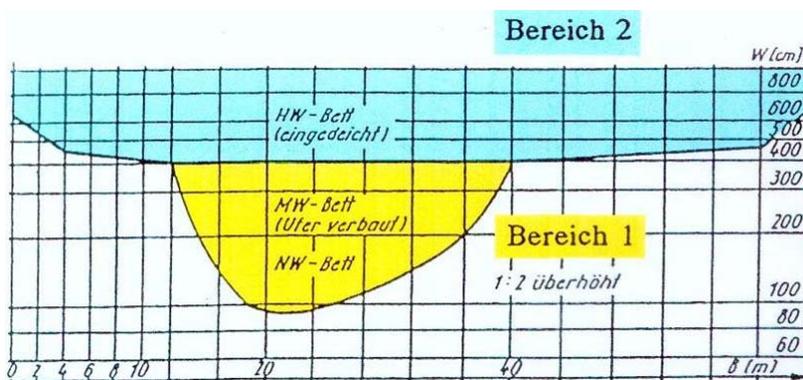


Bild 5.24:

Künstliches Fließprofil mit zwei Durchflussbereichen (aus DYCK U. A., 1975)

- Gültigkeitsgrenzen durch Auftragen der W-Q-Beziehung im doppelt-logarithmischen Papier ermittelbar (\rightarrow vgl. Bild 5.25)

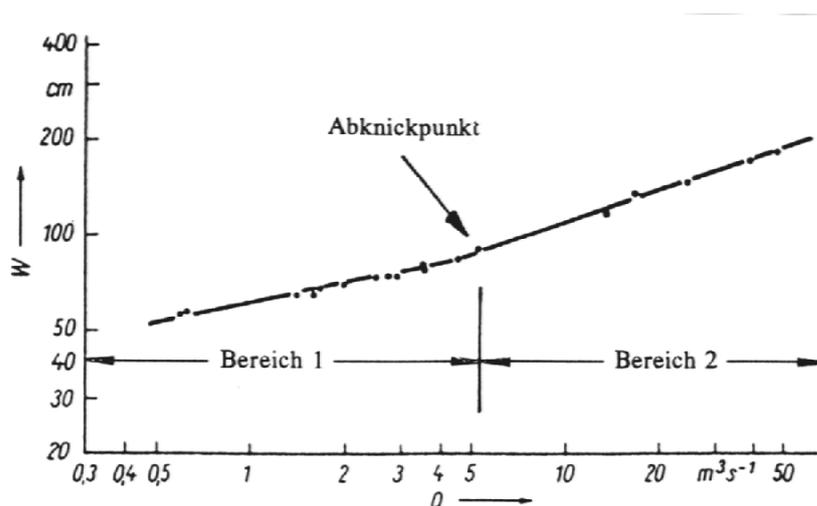


Bild 5.25:

Durchflusskurve für den Pegel Bad Blankenburg/Schwarza (in doppelt-logarithmischer Darstellung), nach DYCK, PESCHKE (1995)

- Schlussfolgerungen:
 - \rightarrow Flügelmessung nur einige Male im Jahr notwendig zur Überprüfung und ggf. Korrektur der W-Q-Beziehung (besonders im Hoch- und Niedrigwasserbereich)
 - \rightarrow für tägliche Beobachtungen (Routinebeobachtungen) Messung des Wasserstandes ausreichend

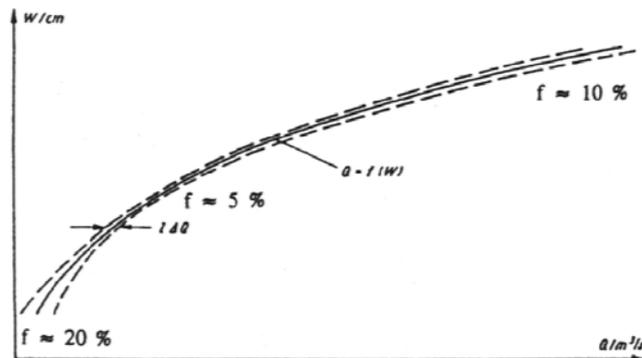
* Genauigkeit der Wasserstands-Durchfluss-Beziehung:

- Fehler (Genauigkeit) stets angeben, Berechnung (mittlerer quadratischer Fehler):

$$m_{Q(W)} = 100 * \left\{ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[\frac{Q_i - QW_i}{Q_i} \right]^2 \right\}^{0,5} \quad (5.23)$$

mit $m_{Q(W)}$ - mittlerer quadratischer Fehler [%]
 Q_i - gemessener Durchfluss [l/s, m³/s]
 QW_i - aus der W-Q-Beziehung ermittelter Durchflusswert [l/s, m³/s]] bei gleichem Wasserstand

- W-Q-Kurve korrigieren, falls Fehler nicht mehr im akzeptablen Bereich
- akzeptabel (normale Fehlerbereiche, s. auch Bild 5.26):
ca. 20 % im Niedrigwasserbereich (für $Q \leq 0,5 MQ$, $MQ =$ mittlerer Durchfluss)
ca. 5 % im Mittelwasserbereich (für $0,5 MQ < Q \leq 2 MQ$)
ca. 10 % im Hochwasserbereich (für $Q > 2 MQ$)



f - absoluter Fehler

Bild 5.26:

Schematische Darstellung des absoluten Fehlers einer W-Q-Beziehung (nach DYCK U.A., 1975)

- Ursachen für Veränderungen der Wasserstands-Durchfluss-Beziehung:
 - Pegelnullveränderungen (infolge Hochwasser- bzw. Eisstand)
 - Veränderungen des Fließprofils:
 - Erosion bei Hochwasser
 - Sedimentation bei Niedrigwasser
 - Bau-/Regulierungsmaßnahmen im Gewässer
 - Verkrautung
 - unkontrollierter Druckverlust (Druckluftpegel)
- Fehler im NW-Bereich am größten, weil Erosions- und Sedimentationsprozesse sich am stärksten auswirken

5.5. Statistische Auswertung von Durchflussdaten

5.5.1. Datenprüfung

* Anforderungen an das Datenmaterial:

- zeitliche und räumliche **Repräsentanz**
 - natürliche Schwankungen ausreichend erfasst?
 - Betrachtungszeitraum repräsentativ?
 - Gebiet ausreichend beobachtet? (Stationsdichte)

- **Konsistenz** und **Homogenität** der Daten → Prüfung mittels statistischer Verfahren

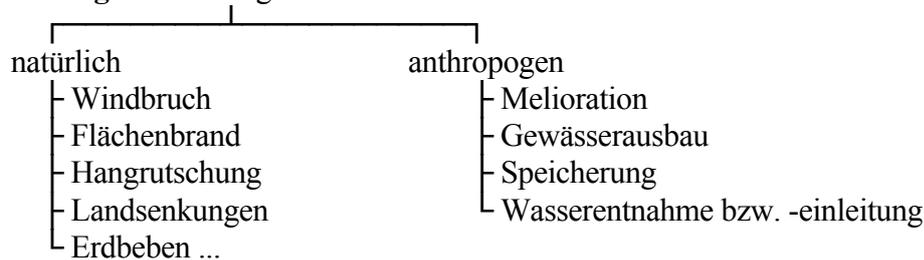
* **Konsistenz** = Fehlerfreiheit der Messung

- Gerätefehler
- Messgerätewechsel
- Stationsverlegung
- Ablesefehler

► **Fehlermöglichkeiten bei der Wasserstandsmessung:**

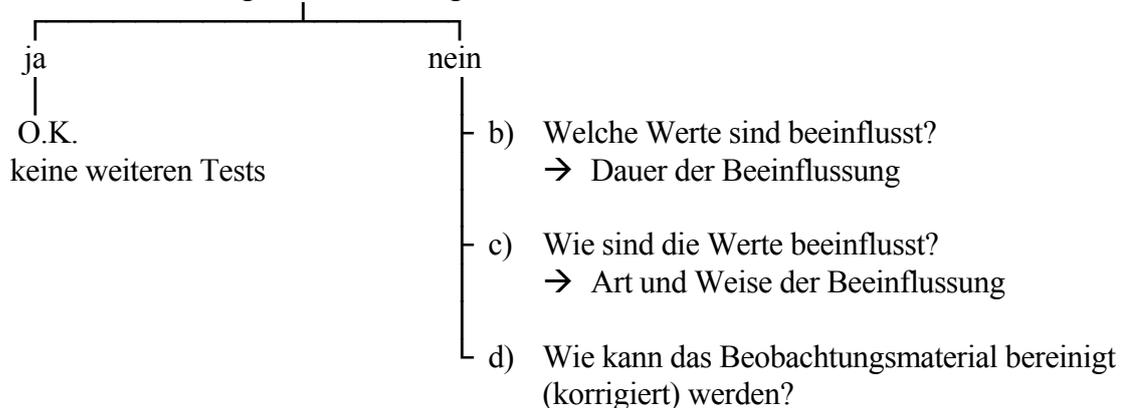
- Pegelnull-Verschiebung (s.o.)
- Verkräutung des Fließquerschnittes
- Eisstand am Pegel
- Verschlammung des Pegelschachtes (bei mechanischem Schwimmerschreibpegel)
- unkontrollierter Druckverlust (bei Druckluftpegel)

* **Homogenität** = Ungestörtheit der Messreihe



► **Homogenitätsprüfung schließt 4 Fragen ein:**

a) Ist das Beobachtungsmaterial homogen?



► **Überblick über Homogenitätstests, die häufig in der Hydrologie angewendet werden:**

- Tests für Daten einer Datenreihe (z.B. einer Hochwasser-Datenreihe):
 - Ausreißertest
 - Berechnung einfacher statistischer Parameter (Mittelwert, Streuung, Trends für verschiedene Zeitabschnitte) und Vergleich der ermittelten statistischen Parameter
- Tests für Daten mehrerer miteinander in Zusammenhang stehender Datenreihen (z.B. Vergleich einer Hochwasser-Datenreihe mit einer Niederschlags-Datenreihe):
 - Doppelsummenanalyse
 - Vergleich von Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen der betrachteten Datenreihen

► **Ausreißertest:**

- Ziel des Ausreißertests: Beantwortung der Frage, ob ein (oder mehrere) extreme (große bzw. kleine) Werte einer Datenreihe zu ein und dem selben Wertekollektiv gehören oder nicht (Beantwortung der Frage a) → Eliminierung von fehlerhaften Messwerten möglich

- extreme Werte sind z.B.:
 - Durchflüsse von extremen Hochwasserereignissen (Messung schwierig oder unmöglich)
 - extreme Niedrigwasserdurchflüsse (großer absoluter Fehler, s.o.)
- **Methodik:**
 - **Aufstellen einer sog. Nullhypothese (Ausgangshypothese) H_0 :**
 - die Hypothese, die getestet werden soll
 - meist: alle Messwerte gehören zu ein und demselben Datenkollektiv
 - keine signifikanten Unterschiede der gemessenen Werte
 - kein(e) Ausreißer
 - **Aufstellen einer Alternativhypothese H_1 :**
 - ein oder mehrere Wert(e) gehören nicht zum Datenkollektiv, sondern sind Ausreißer
 - Signifikanz (Fehlerhaftigkeit) eines oder mehrerer Messwerte
 - z.B.: einige der größten Werte (bei Hochwasser) gehören nicht zum Datenkollektiv, sondern sind Ausreißer oder einige der kleinsten Werte (bei Niedrigwasser) gehören nicht zum Datenkollektiv
 - **statistischer Test:**
 - a) Test des/der größten Werte(s) (Beginn mit dem größten Wert, ist dieser ein Ausreißer → Fortführung mit dem zweitgrößten Wert ..., solange bis ein Wert kein Ausreißer ist):
 - Nullhypothese H_0 wird verworfen, wenn:

$$\mathit{max.} \ x > \bar{x} + v(\alpha, n) * s(x) \quad (5.24)$$

- mit $\mathit{max.} \ x$ - größter Wert der Datenreihe
 \bar{x} - Mittelwert aller Werte der Datenreihe
 $s(x)$ - Standardabweichung aller Werte der Datenreihe
 $v(\alpha, n)$ - Prüfgröße (abhängig vom Signifikanzniveau α und der Werteanzahl n , → s. Tabelle 5.5)
 in der Hydrologie meist verwendet: Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ (d.h. 5 %)
 Signifikanzniveau bedeutet:
 → die Wahrscheinlichkeit eines Fehlers 1. Art bezüglich H_0
 → Fehler 1. Art: H_0 wird verworfen, obwohl H_0 richtig ist

$$\mathit{mit} \ s(x) = \left[\sum (x_i - \bar{x})^2 / (n - 1) \right]^{0,5} \quad (5.25)$$

- wobei $s(x)$ - Standardabweichung aller Werte der Datenreihe
 x_i - Messwert (betrachteter Wert → größter Wert, zweitgrößter Wert ...)
 \bar{x} - Mittelwert aller Werte der Datenreihe
 n - Werteanzahl der Datenreihe

- b) Test des/der kleinsten Werte(s) (Beginn mit dem kleinsten Wert, Methodik analog a):
 - Nullhypothese H_0 wird verworfen, wenn:

$$\mathit{min.} \ x < \bar{x} - v(\alpha, n) * s(x) \quad (5.26)$$

- mit $\mathit{min.} \ x$ - kleinster Wert der Datenreihe
 (alle anderen Größen → s. Gleichungen 5.24 und 5.25)

Tabelle 5.5: Prüfgröße $v(\alpha, n)$ für den Ausreißertest

Werteanzahl n	Signifikanzniveau α		
	$\alpha = 0,10$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
10	2,146	2,294	2,540
12	2,229	2,387	2,663
15	2,326	2,493	2,800
17	2,380	2,551	2,871
20	2,447	2,623	2,959
22	2,486	2,664	3,008
25	2,537	2,718	3,071
27	2,568	2,749	3,107
30	2,609	2,792	3,156
32	2,643	2,818	3,185
35	2,668	2,835	3,224
37	2,689	2,847	3,248
40	2,718	2,904	3,281
42	2,736	2,922	3,301
45	2,762	2,948	3,329
47	2,778	2,964	3,346
50	2,800	2,987	3,337

- Schlussfolgerungen:

→ Ausreißertest beantwortet die eingangs gestellten Fragen:

Ist das Beobachtungsmaterial/Datenmaterial homogen?

Welche Werte sind beeinflusst?

→ Ausreißertest beantwortet nicht die Fragen::

Wie sind die Werte beeinflusst?

Wie kann das Beobachtungs-/Datenmaterial bereinigt (korrigiert) werden?

- praktische Anwendung eines Ausreißertests → s. Übung 12 (Teilaufgabe a)

► **Doppelsummenanalyse:**● **Ziel der Doppelsummenanalyse:**

- Beantwortung der Fragen, die durch Ausreißertest nicht beantwortet werden können

→ Art und Weise der Beeinflussung

→ Möglichkeiten der Datenbereinigung

→ durch Doppelsummenanalyse alle 4 Fragen der Homogenitätsprüfung beantwortbar

● **Methodik:**

- Vergleich der zu prüfenden Datenreihe mit einer Datenreihe, die unbeeinflusst ist

- Vergleichsmöglichkeiten:

analog

Vergleich mit einer Datenreihe gleicher Art, z.B. Vergleich zweier Durchflussdatenreihen (2 benachbarte Pegel oder Niedrigwasserdurchflüsse mit mittleren Durchflüssen)

kausal

Vergleich kausal bedingter Datenreihen, z.B. eine Durchflussdatenreihe mit einer Niederschlagsdatenreihe oder Vergleich von Wasserständen eines Sees in einer Trockenperiode mit Verdunstungsdaten

- Methoden der Datenbereinigung:

graphisch (→ s. Bild 5.27)

analytisch mit Hilfe von Signifikanztests

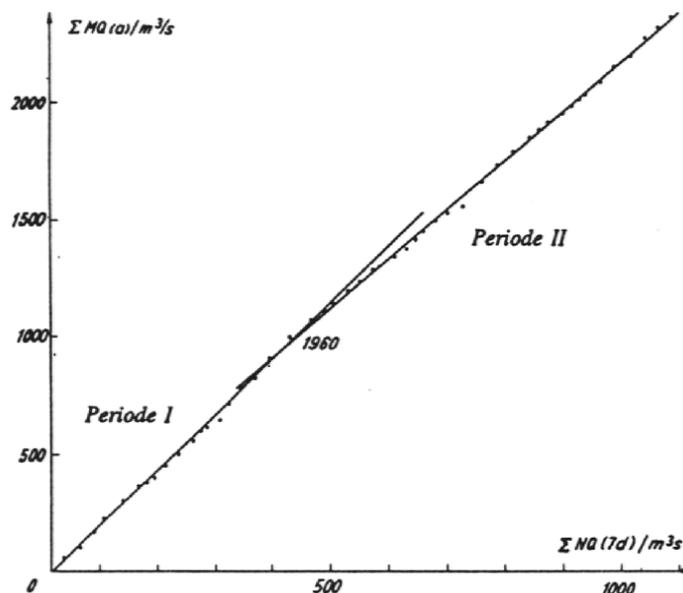


Bild 5.27:

Doppelsummenanalyse zwischen Niedrigwasser- und mittlerem Durchfluss, Pegel Lichtenwalde / Zschopau (nach DYCK U.A., 1975)

- graphische Datenprüfung und ggf. -bereinigung:

- a) tabellarisches Auflisten zweier Datenreihen (der zu prüfenden Datenreihe und der Datenreihe, von der bekannt ist, dass sie unbeeinflusst ist)
- b) schrittweises Aufsummieren der Werte der beiden Datenreihen:
 - erste Summe = erster Wert
 - zweite Summe = erste Summe + zweiter Wert
 - dritte Summe = zweite Summe + dritter Wert
 - ... (u.s.w.)
- c) Auftragen der schrittweise aufsummierten Werte in ein lineares Koordinatensystem (→ analog Bild 5.27):
 - Punkt 1: erste Summe der nicht beeinflussten Datenreihe → x
erste Summe der zu prüfenden Datenreihe → y
 - Punkt 2: zweite Summe der nicht beeinflussten Datenreihe → x
zweite Summe der zu prüfenden Datenreihe → y
 - ... (u.s.w.)
- d) Einzeichnen von Ausgleichsgeraden (Trendgeraden)
- e) Interpretation:
 - a) Ausgleich durch eine einzige Trendgerade möglich
 - keine Inhomogenitäten erkennbar (beide Datenreihen sind homogen)
 - alle Daten können ohne Korrektur für weitere Untersuchungen verwendet werden
 - b) Ausgleich durch eine einzige Trendgerade nicht möglich
 - zu prüfende Datenreihe ist nicht homogen
 - Ausgleich durch 2 oder mehr Geraden
 - Erkennen von verschiedenen Perioden (innerhalb derer die Daten wiederum homogen sind) → Dauer einer Beeinflussung erkennbar
 - Datenkorrektur (graphisch, analytisch) möglich

- analytische Datenprüfung (Berechnung des/der Geradenanstiege(s)):
 - a) im Falle einer einzigen Geraden:

$$m = y/x \quad (5.27)$$

mit m - Geradenanstieg
 x - Mittelwert der zu prüfenden Datenreihe
 y - Mittelwert der homogenen Vergleichsdatenreihe

- b) im Falle mehrerer Geraden (→ vgl. Bild 5.27):
 für die erste Periode:

$$m_1 = y_1/x_1 \quad (5.28)$$

mit m_1 - Geradenanstieg der ersten Periode
 x_1 - Mittelwert aller Werte der zu prüfenden Datenreihe, die zur ersten Periode gehören
 y_1 - Mittelwert aller Werte der Vergleichsdatenreihe, die zur ersten Periode gehören

für die zweite und alle weiteren Perioden: Berechnung analog Gleichung 5.28

- **Schlussfolgerungen:**

- Korrektur der beeinflussten Periode(n) möglich
- Verwendung von nur einer (der repräsentativen, unbeeinflussten) Periode oder
- Bereinigung der Werte der beeinflussten Periode(n) durch Datenberechnung unter Zugrundelegung des Anstieges der unbeeinflussten Periode und der Daten der homogenen Vergleichsdatenreihe

- **Anwendung der Doppelsummenanalyse → s. Übung 12 (Teilaufgabe b)**

5.5.2. Haupt- und Dauerzahlen des Durchflusses

* Hauptzahlen des Durchflusses:

► **Ziel:** übersichtsmäßige Charakterisierung des Durchflussgeschehens an einem bestimmten Gewässerpegel durch einige wenige Zahlen

► **Hauptzahlen** (→ vgl. Bild 5.28, [alle Werte l/s oder m^3/s]):

- NNQ - niedrigster jemals beobachteter Durchfluss
 - NQ - Niedrigwasserdurchfluss (kleinster Wert im betrachteten Zeitraum, z.B. innerhalb eines Jahres)
 - MNQ - mittlerer Niedrigwasserdurchfluss (Mittelwert aller Niedrigwasserdurchflüsse)
 - MQ - mittlerer Durchfluss
 - MHQ - mittlerer Hochwasserdurchfluss (Mittelwert aller Hochwasserdurchflüsse)
 - HQ - Hochwasserdurchfluss (größter Wert im betrachteten Zeitraum, z.B. innerhalb eines Jahres)
 - HHQ - höchster jemals beobachteter Durchfluss
 - mmHQ - maximal mögliches Hochwasser (resultierend aus dem mmP, vgl. Abschnitt 3.5)
- Hauptzahlen des Durchflusses können für alle beobachteten Pegel den Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbüchern bzw. den Jahrbüchern der Länder (ab 2000 i.d.R. auch im Internet) entnommen werden (Beispiel → s. Tabelle 5.6)