

Einführung

Ohne Wasser gibt es kein Leben. Um Leben zu erhalten und lebenswerter werden zu lassen, muss mit Wasser verantwortungsvoll umgegangen werden. Mensch und Natur standen und stehen nicht immer im Einklang, wenn es ums Wasser geht.

Von allen Bauschaffenden steht der Wasserbauer der Natur am nächsten, meist mit-tendrin, manchmal sogar in unberührter Natur. Die dabei möglichen Konflikte möglichst klein zu halten, ist heute im Wasserbau ebenso wichtig wie das Erfüllen der von der Gesellschaft gestellten Aufgaben unter Beachtung gültiger Normen. Aufgaben im Wasserbau ergeben sich heute vor allem aus

- Schutz vor Naturkatastrophen (Überschwemmungen und Dürre),
- Bereitstellung von Trink- und Brauchwasser,
- Nutzung der Gewässer für Energiewirtschaft, Schifffahrt, Fischerei, Erholung,
- optimale Bewirtschaftung und Reinhaltung des zur Verfügung stehenden Grund- und Oberflächenwassers,
- Schutz der Landschaft – nicht nur am Rande der Gewässer.

Schon diese Aufzählung zeigt, dass nicht nur der Wasserbauer mit dem Wasserbau in Berührung kommt. Der Landschaftsarchitekt wird das Wasser ebenso nutzen wie der Wasserwirtschaftler. Transport- und Energieunternehmen kommen nicht am Wasser vorbei, der Bauingenieur kann auch unangenehme Berührungen mit Wasser und Eis haben. Jeder, der mit Umweltfragen zu tun hat, wird sich mit dem Wasserbau beschäftigen müssen.

In vielen Einzelfragen, die den Entscheidungen im Wasserbau vorausgehen, spielen Prognosen, Voraussagen eine wichtige Rolle. Wasserstände, Wellenhöhen und Abflussmengen sind vorauszusagen, aber auch künftige Bedürfnisse der Menschen,

der Wirtschaft und der Umwelt. Grundlage vieler Planungen für Wasserbau und Wasserwirtschaft sind hydrologische Daten. Die Hydrologie hat sich längst zu einer selbstständigen Wissenschaft entwickelt. Aus verbesserten hydrologischen Daten, aus dem Verändern von Vorschriften, z. B. Aufstellen und Anwenden europäischer Normen, in jüngster Vergangenheit der europäischen Wasserrahmenrichtlinie, ergeben sich neue wasserbauliche Aufgaben.

Die Ingenieurhydrologie ist ein Teil der Hydrologie. Der Wasserbauer ist auf Ausgangsdaten angewiesen, die ihm der Hydrologe übergibt. Auch nach Fertigstellung eines Wasserbauwerkes erlischt die Zusammenarbeit des Wasserbauers mit dem Hydrologen nicht. Ingenieurhydrologische Ausgangswerte, die über die Notwendigkeit und Größe eines Wasserbauwerkes mitentscheiden (Bauwerke für den Hochwasserschutz oder die Niedrigwasserregelung) werden im Abschnitt 1.3 vorgestellt.

Heute spielen ökologische Bewertungen eine große Rolle bei der Vorbereitung oder der Verhinderung einer wasserbaulichen Maßnahme. Nur mit dem Ziel, das Vorhandene in der Natur weitgehend zu erhalten, werden geplante Wasserbauten heute oft verurteilt. Die ökologischen Vorzüge einer wasserbaulichen Maßnahme müssen künftig objektiver dargestellt werden, auch wenn sie erst später sichtbar sind. Ausgleichsmaßnahmen mindern die Nachteile eines Eingriffs der Wasserbauer in die Natur. Aber auch beim Realisieren der Ausgleichsmaßnahmen ist der Wasserbau gefragt, denn ohne Wasser lebt auch dort nichts. Die Harmonie zwischen Wasserbauten, Mensch und Natur erlebt der Wasserbauer erst nach Jahren der Anpassung, wenn die Baustellenwunden verheilt sind. Das beim Bau der Staustufe Voburg durchgeführte Monitoring zeigte, dass sowohl Artenvielfalt als auch Anzahl der Exemplare pro Art sich durch viele Begleitmaßnahmen vergrößert haben [96].

1 Gewässerkunde

1.1 Die Wasservorräte der Erde

Die Wasservorräte auf der Erde bestehen zu 97,6 % ($1350,5 \cdot 10^6 \text{ km}^3$) aus Salzwasser. Das Salzwasser interessiert den Wasserbauer im wahrsten Sinne des Wortes nur am Rande, also an den Küsten. Das sog. Süßwasser macht folglich etwa 2,4 % (ca. $33,3 \cdot 10^6 \text{ km}^3$) aus und ist vorwiegend technisch nicht interessant. Die Tabelle 1.1 gibt einen Überblick über Vorkommen und Verteilung des Süßwassers.

Am wichtigsten für den Wasserbau sind die 2 Billionen Kubikmeter Wasser, die sich in den Flüssen befinden. Sie stehen im Mittelpunkt aller folgenden Darlegungen. Große wasserwirtschaftliche Bedeutung haben auch das weniger tief anstehende Grundwasser und das Wasser in Seen.

Der geringe Anteil des für den Menschen nutzbaren Wassers am Gesamtvorkommen lässt den Gedanken zu, dass es für Mensch, Tier und Pflanze nicht reichen wird, jedenfalls örtlich oder zeitlich begrenzt. Hier den Ausgleich zu den oftmals im Übermaß zum Abfluss kommenden Wassermengen zu schaffen, gehört zu den wichtigsten Aufgaben des Wasserbauers.

Die Ereignisse in den Jahren 2002 und 2003 im Bereich des Einzugsgebietes der Elbe haben eindrucksvoll die Ergebnisse weit vorausschauender und damit nachhaltiger Politik in Sachen Wasserbau, wie sie von früheren Generationen betrieben wurde, bewiesen. In den Talsperren wurden während der Flut Millionen von Kubikmetern Hochwasser zurückgehalten, die im trockenen Sommer 2003 Mensch, Tier und Pflanze zur Verfügung standen. Es reichte nicht aus, um die Jahrhundertflut zu beherrschen. Fluten wie im August 2002 werden immer Schäden hervorrufen. Ein nicht zu unterschätzender Teil der Schäden geht auf die nicht fortgesetzte, früher so erfolgreiche Wasserbastrategie zurück. Marode Deiche und nicht gebaute Rückhaltebecken und Talsperren wurden sehr teuer für die Gesellschaft.

1.2 Der Wasserkreislauf

1.2.1 Einführung

Das Wasser der Erde befindet sich in einem Kreislauf, der von der Sonnenenergie und der Schwerkraft gesteuert wird. Das Bild 1.1 zeigt den Teil des Wasserkreislaufs, der vor allem das Aufgabengebiet des Wasserbauers bestimmt.

Tabelle 1.1 Wasservorräte der Erde aus [88]

Salzwasser	$1\,350,5 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ (97,6 %)	Bemerkungen
Süßwasser	$33,3 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ (2,4 %)	
Wasservorrat der Erde	$1\,383,8 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ (100 %)	
Süßwasser		* für den Wasserbauer interessant
Polarzonen und Gletscher	$26,0 \cdot 10^6 \text{ km}^3$	
Grundwasser, tiefer als 800 m	$3,5 \cdot 10^6 \text{ km}^3$	
Grundwasser, weniger tief als 800 m	$3,5 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ *	
Bodenfeuchte	$0,15 \cdot 10^6 \text{ km}^3$	
Seen	$0,125 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ *	
Wasser in der Biomasse	$0,05 \cdot 10^6 \text{ km}^3$	
Wasser in der Atmosphäre	$0,013 \cdot 10^6 \text{ km}^3$	
Wasser in den Flüssen	$0,002 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ *	

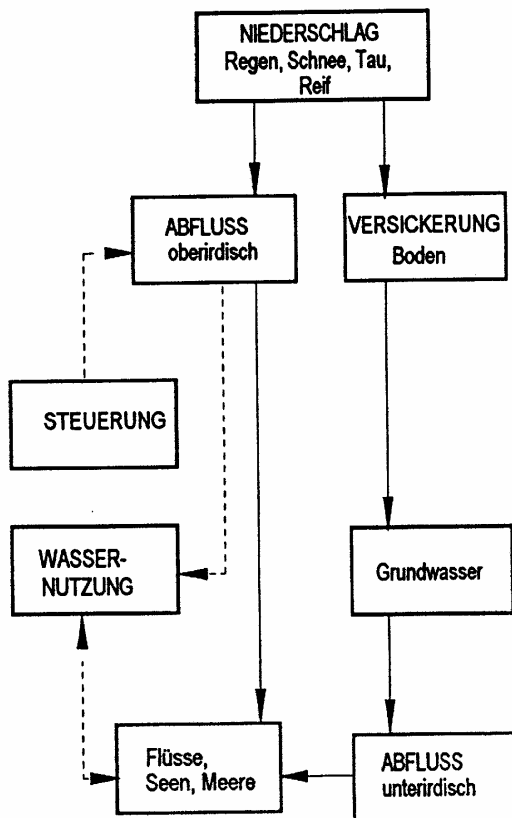


Bild 1.1 Teil des Wasserkreislaufes

Die gestrichelt dargestellten Linien charakterisieren das Hauptbetätigungsfeld des Wasserbauers, die Nutzung des oberirdisch abfließenden Wassers. Gemeinsam mit dem unterirdisch abfließenden Wasser stehen ca. 40 % des auf das Festland fallenden Niederschlages zur Verfügung, etwa 60 % verdunsten.

Wasserwirtschaftler und Wasserbauer teilen das Festland in Einzugsgebiete A_E auf, Bild 1.2. Das Einzugsgebiet A_E in km^2 ist die auf eine horizontale Ebene projizierte Fläche von dem Gebiet, aus dem das Wasser ober- und unterirdisch einem Fließgewässer bzw. einem Kontrollpunkt in diesem Fließgewässer zufließt. So beträgt das Einzugsgebiet der Elbe an der tschechisch-deutschen Grenze $51\,394 \text{ km}^2$. Bis Dresden vergrößert es sich auf $53\,096 \text{ km}^2$. Die Unterschiede zwischen ober- und unterirdischem Einzugsgebiet sind meist zum Vernachlässigen klein.

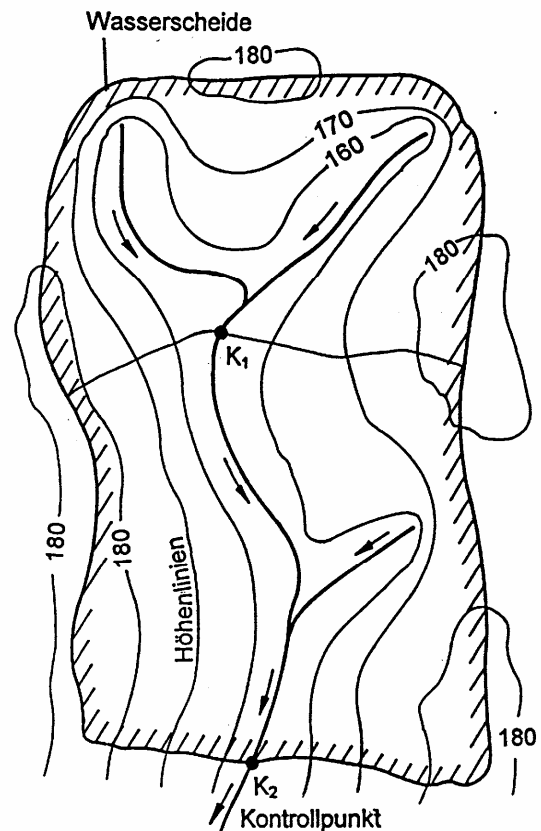


Bild 1.2 Einzugsgebiet

Die Grenzen eines Einzugsgebietes werden als Wasserscheide bezeichnet. Für alle wasserwirtschaftlichen Entscheidungen, die zu wasserbaulichen Maßnahmen führen, ist stets die Gesamtheit des Einzugsgebietes zu betrachten. Politische Grenzen und Eigentumsfragen standen und stehen dem aber sehr oft im Wege.

Eine wichtige Komponente beim Bewirtschaften des Wassers ist das Speichern, um das unterschiedliche Dargebot den Bedürfnissen von Mensch und Natur besser anzupassen.

Auch negative Auswirkungen von Wasserbauwerken sind bekannt, geradezu katastrophal am Aralsee. Um riesige Flächen für die Baumwolle zu bewässern, wurden am Syrdarja und am Amudarja Talsperren errichtet, um sicherzustellen, dass in der warmen Jahreszeit über ein Netz von Bewässerungskanälen die Felder bedarfsgerecht gespeist werden konnten. Am Ende

dieses wasserwirtschaftlichen Systems steht der Aralsee, dem nunmehr die Zuflüsse fehlten. Sein Wasserspiegel sank seit 1960 von etwa 54 m auf ca. 31 m [39]. Dadurch verlor der Aralsee bis 2002 etwa 75 % seiner Oberfläche und über vier Fünftel seines Volumens. Der Salzgehalt stieg von 1 % auf 4 %. 80 % der Fischarten überlebten das nicht. Die mit der Austrocknung des Aralsees verbundenen Umweltprobleme sind enorm. Jährlich gelangen heute etwa 75 Mio. t Sand, Staub und Salze in die Atmosphäre. Mit den Niederschlägen kommen sie zur Erde zurück in Entfernungen von bis zu etwa 10 000 km. Am Aralsee wurde dem Kreislauf des Wassers durch eine andere Nutzung eine Wunde zugefügt, die die Natur allein nicht wieder heilen kann. UNESCO, WHO und Weltbank helfen heute Usbekistan und Kasachstan, die Schäden zu verringern.

Wassernutzung und -steuerung haben Grenzen, die örtlich und zeitlich sehr unterschiedlich sein können. Diese Grenzen auszuloten, Nutzen und Schaden, den Mensch und Natur durch eine Maßnahme haben werden, zu vergleichen, ist heute eine aufwendige Untersuchung im Vorfeld jeder wasserbaulichen Aktivität.

Wichtige Grundlagen zum Beurteilen von Einflüssen, die anthropogene Einwirkungen auf den Wasserkreislauf haben, liefert die Ingenieurhydrologie. Komponenten des Wasserkreislaufs werden gemessen und ausgewertet. Niederschlag, Verdunstung sowie ober- und unterirdischer Abfluss sind grundlegende wasserwirtschaftliche Größen, die der Wasserbauer zugrunde legt, wenn er eine Baumaßnahme plant. Eine möglichst langjährige Messreihe erhöht den Wert jeder Aussage, die auf Messungen und Beobachtungen basiert.

1.2.2 Der Niederschlag

Der Niederschlag – vor allem Regen und Schnee, weniger Tau, Nebel und Reif –

wird als Niederschlagshöhe h_N gemessen, wobei gilt $h_N = 1 \text{ mm} = 1 \text{ l/m}^2$.

Das Messen erfolgt in Deutschland in über 4000 Messstationen mit Hilfe genormter Gefäße und Messwerterfassungen. Fünf Merkmale eines Niederschlages werden festgehalten:

- die Niederschlagshöhe h_N in mm,
- die Niederschlagsdauer T_N in Minuten oder Stunden,
- der Intensitätsverlauf $i_N(t)$ in mm/min oder mm/h,
- die Häufigkeit des Auftretens n bzw. die Jährlichkeit $1/n$,
- die Niederschlagsspende r_N in $\text{l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$ oder $\text{mm}/15 \text{ min}$ o. Ä.

Die jährliche Niederschlagshöhe h_N in mm für einige Gegenden Deutschlands können der Tabelle 1.2 oder wasserwirtschaftlichen Standardwerken entnommen werden. Einen Rekordwert für den 24-stündigen Niederschlag brachte der August 2002 mit 312 mm in Zinnwald im Osterzgebirge.

In jedem größeren Einzugsgebiet sind mehrere Niederschlagsmessstellen vorhanden. Um weitere Kennzahlen zu ermitteln, wird für das Einzugsgebiet die mittlere Gebietsniederschlagshöhe $h_{N,m}$ ermittelt

$$h_{N,m} = \frac{1}{A_E} \cdot \sum_{n=1}^n h_{N,i} \cdot \Delta A_i \quad [\text{mm}] \quad (1.1)$$

Die Dauer eines Niederschlages T_N kann sehr verschieden sein (Gewitterregen, Landregen, Schneefall). Oft (z. B. für die Planung städtischer Kanalisationen) wird der 15-minütige Regen bzw. seine Niederschlagsspende verwendet. Diese Spende beträgt z. B. für Sachsen $106 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$ bzw. $9,5 \text{ mm}/15 \text{ min}$. Für das mittlere Neckartal wurden $140 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$ bzw. $12,6 \text{ mm}/15 \text{ min}$ ermittelt. Auch die im Beispiel 1 (Seite 8) verwendeten Werte können als Ausgangsgrößen angesetzt werden.

1.2.3 Die Verdunstung

Der größere Teil des auf die Erde fallenden Niederschlages kehrt schnell im gasförmigen Aggregatzustand in die Atmosphäre zurück. Dieser Vorgang ist die Verdunstung, gemessen wird sie ebenfalls als Höhe. Die Verdunstungshöhe h_V gibt an, wie viel Wasser in einer Zeiteinheit (meist ein Jahr) in die Atmosphäre gelangt ist. Die Verdunstung ist vor allem abhängig von der Temperatur, den Windverhältnissen und der Landschaft.

Für Mitteleuropa kann z. B. für die Verdunstung von freien Wasserflächen E_W durchschnittlich 800 bis 1000 mm/a angegeben werden, davon etwa 74 % im Sommer- und 26 % im Winterhalbjahr. Die Landverdunstung kann in Deutschland mit 400 bis 500 mm/a angesetzt werden, davon 83 % im Sommerhalbjahr. Eine Betrachtung kleinerer Flächen erfordert auch die Bodenbedeckung (Wald, Feld, Wiese, befestigte Flächen) mit zu betrachten. Großräumig gehen Durchschnittswerte in die Planungen ein, z. B. nach Tabelle 1.2.

Besonders groß wird die Verdunstung, wenn auf Wasserflächen trockene, heiße Winde einwirken können (wie beim Aralsee, vgl. S. 3 ff.). Für wasserwirtschaftliche Planungen in heißen Gegenden ergibt sich ein besonders großer Unterschied zwischen der aktuellen Gebietsverdunstung (gegenwärtige Verdunstung von Wasserflächen und vegetationsbedeckten Landflächen) und der potentiellen Verdunstung. Das ist die maximale Verdunstung, wenn der Wassernachschub nicht begrenzt ist (Wasserflächen, aber auch bewässerte Kulturen, Feuchtbiotope u. Ä.). Das Messen und auch das Berechnen möglicher Verdunstungen wird heute mit Geräten (Verdunstungskessel, Lysimeteranlage) bzw. mit Formeln durchgeführt, die u. a. bei Schröder et al [88] beschrieben sind.

Tabelle 1.2 Jahresmittel für die Größen Niederschlag (h_N), Abfluss (A), Verdunstung (V) in mm für deutsche Gegenden

Flussgebiet	h_N in mm	A in mm	V in mm	A/N in %
Flachlandgebiete				
Obere Netze	460	94	366	20,5
Warthe, Landsberg	512	130	382	25,4
Untere Netze	535	182	353	34,0
Havel, Rathenow	558	108	450	19,4
Gemischte Gebiete				
Untere Saale	613	168	445	27,5
Mittlere Oder	665	175	490	26,3
Aller, Mündung	669	226	443	33,7
Mittlere Weser	744	263	481	35,3
Mulde, Dübener	753	306	447	40,6
Gebirgsgebiete				
Böhmische Elbe	692	192	500	27,8
Obere Elbe	762	238	524	31,3
Weißeritz, Dresden	841	306	535	36,4
Obere Saale	813	364	449	44,7
Obere Oder	809	268	541	33,2
Obere Weser	749	257	492	34,3
Fulda	760	231	529	30,4
Main	657	187	470	28,5
Obere Donau	793	310	483	39,1
Alpenflussgebiete				
Isar, Mündung	986	580	406	58,8
Donau, Obernzell	1000	585	415	58,5
Lech, Mündung	1169	780	389	66,7
Iller, Mündung	1239	885	354	71,5
Inn, Innsbruck	1241	990	251	79,8
Inn, Kufstein	1290	924	366	71,6

1.2.4 Versickerung, Grundwasser und unterirdischer Abfluss

Der auf ein Einzugsgebiet fallende Niederschlag verdunstet oder fließt dem Fließgewässer (Vorfluter) zu, verlässt somit das Einzugsgebiet, oder infiltriert in den Boden. Dieser Anteil gelangt entweder direkt aus dem Niederschlag in den Untergrund oder versickert später aus einem Oberflächengewässer (Fluss, See, Kanal, Speicher), sobald dessen Wasserspiegel höher liegt als der Grundwasserspiegel in der Nähe des Gewässers. Das in den Boden eindringende Niederschlagswasser verzögert den oberirdischen Abfluss, indem es

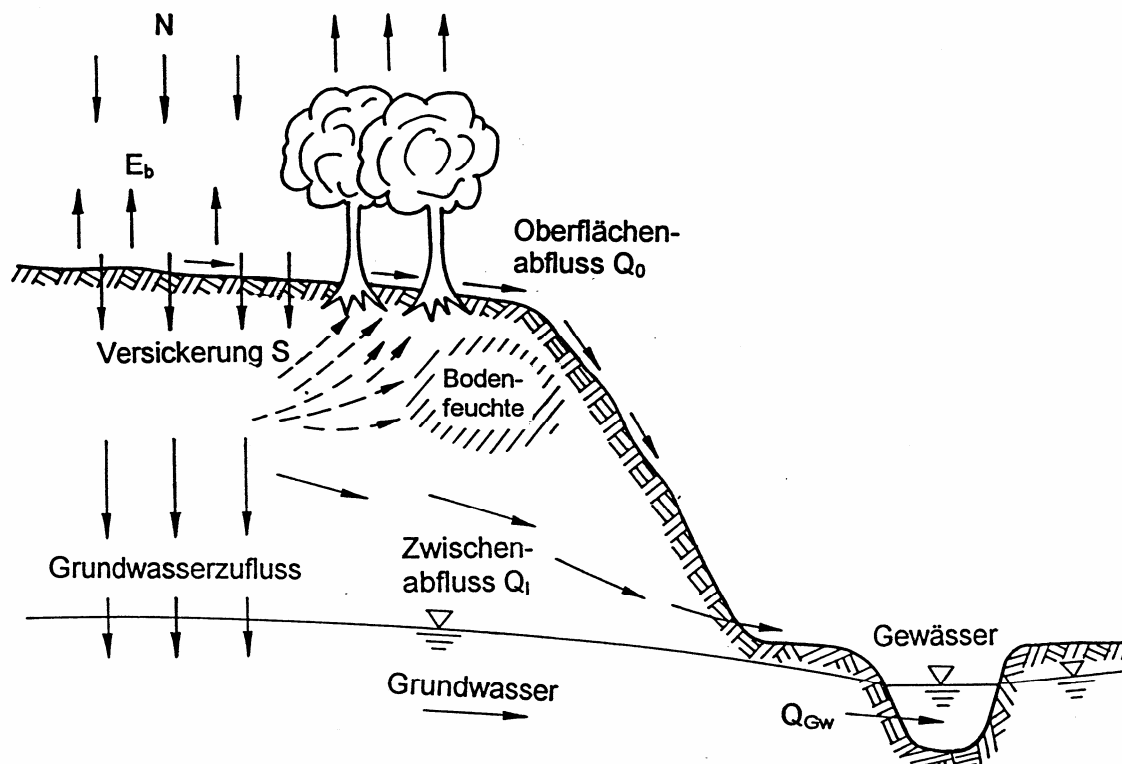


Bild 1.3 Aufteilung des versickernden Niederschlages

Tabelle 1.3 Infiltrationsraten für einige Bodenarten

Infiltrationsklasse		Infiltrationsrate i_j in mm/h	Bodenart (Beispiel)
1	sehr gering	< 1	Lehm, Ton
2	gering	1 bis 5	toniger Schluff
3	gering bis mittel	5 bis 20	sandiger Lehm
4	mittel	20 bis 63	lehmiger Sand
5	mittel bis hoch	63 bis 127	feiner Sand
6	hoch	127 bis 254	grober Sand
7	sehr hoch	> 254	grober Sand, Kies

im Boden gespeichert wird. Drei Wege kann dieses Wasser nehmen, vgl. Bild 1.3.

- Ein Teil gelangt schnell wieder in die Atmosphäre durch Verdunstung vom Boden und über die Vegetation, E_b
- ein Teil fließt zwischen der Oberfläche und dem Grundwasserspiegel dem nächsten Oberflächengewässer zu, ohne das Grundwasser zu erreichen, Q_1
- ein Teil erreicht das Grundwasser und erhöht den Grundwasserspiegel, Q_{Gw} .

Der letzte Teil kann ebenfalls als unterirdischer Abfluss einem Oberflächengewässer

zufließen, sobald dessen Wasserspiegel niedriger liegt als der Grundwasserspiegel. Künstliche Grundwasserabsenkungen für Baugruben oder Tagebaue sowie Wasserentnahmen aus dem Grundwasser (Brunnen) können den unterirdischen Abfluss weiträumig beeinflussen.

Die Infiltrationsrate i_j , gemessen in mm/h hängt vor allem von der Bodenart ab, die durchsickert wird (Tabelle 1.3), darüber hinaus aber auch von Jahreszeit und Bodennutzung. Für Versickerungsraten aus Oberflächengewässern ist in erster Linie maßgebend, ob eingebaute Dichtungen das Sickerwasser zurückhalten oder bevorzug-

te Sickerwege (z. B. entlang von Massivbauwerken) die Versickerung fördern. Gefrorener Boden lässt keine Versickerung zu. Das spielt eine besondere Rolle beim Bemessen von Hochwasserrückhalteanlagen.

Bevor der dritte Teil den Grundwasserspiegel erreicht, folgt er nur der Schwerkraft auf dem meist etwa vertikalen Sickerweg. Mit Erreichen des Grundwasserspiegels geht die vertikale Sickerbewegung in eine mehr horizontale über, deren Antriebskräfte die geringen Höhenunterschiede beim Grundwasserspiegel und somit Druckgefälle sind. Zwei Geschwindigkeiten des sehr langsam (laminar) fließenden Grundwassers sind zu unterscheiden: die tatsächliche Fließgeschwindigkeit eines Wasserteilchens zwischen den Poren des durchsickerten Erdstoffes, die weder messbar noch technisch von Interesse ist, sowie die Fließgeschwindigkeit v_f in m/s, die den Quotienten darstellt aus dem Weg (z. B. einem Abstand zwischen zwei Messstellen) und der Zeit, die das Wasser zum Zurücklegen dieses Weges braucht. Diese Geschwindigkeit hängt von der Durchlässigkeit des Bodens k_f in m/s * und dem vorhandenen Druckgefälle ab. Darcy formulierte als erster diese nach ihm benannte Gleichung

$$v_f = k_f \cdot I_{st} \quad [\text{m/s}] \quad (1.2)$$

I_{st} ist das Standrohrspiegelgefälle, also ein Quotient aus dem Wasserspiegelunterschied in zwei Standrohren (Brunnen, Grundwassermessstellen) und dem Abstand zwischen diesen Rohren. Sicker das Wasser, nur der Schwerkraft folgend, vertikal nach unten, dann wird $I_{st} = 1,0$. Der Durchlässigkeitsbeiwert k_f kann für Vor-

* Eine Angabe der Durchlässigkeit und der Filtergeschwindigkeit in m/d wäre besser vorstellbar, wird auch in der Literatur mitunter angegeben (russische Literatur).

entwürfe u. ä. Arbeiten der Literatur entnommen werden, die sich mit Bodenmechanik, Wasser oder Grundwasser beschäftigt, u. a. [88].

In der einschlägigen Literatur ist stets ein k_f -Wert angegeben (bzw. von-bis-Werte), d. h. dass das durchsickerte Medium homogen und isotrop betrachtet wird. Die natürliche Schichtung des Untergrundes, entstanden durch Sedimentation der Bodenteilchen, aber auch die Belastung durch Bauwerke, führt zu unterschiedlichen Werten für k_f in horizontaler und vertikaler Richtung. Die Durchlässigkeit ist in horizontaler Richtung meist größer als in vertikaler. Diese Bodeneigenschaft kann Einfluss haben auf die Gestaltung und auf die Standsicherheit von Wasserbauten. Vor jeder Entscheidung kommt der genauen Bestimmung der Durchlässigkeitsbeiwerte in einem bodenmechanischen Labor große Bedeutung zu.

1.2.5 Der oberirdische Abfluss

Niederschlagswasser, das nicht verdunstet und nicht versickert, fließt oberirdisch in Fließgewässern ab. Versickertes Wasser kann verzögert folgen. Dem Verlauf der Jahreszeiten und der Niederschläge folgend, kann der oberirdische Abfluss sehr unausgeglichen sein. Die Bedürfnisse von Mensch, Tier und Pflanze, Wasser zur Verfügung zu haben, stehen dem natürlichen Angebot an Wasser meist entgegengesetzt gegenüber. Deshalb ist das Speichern von Wasser, die Zurückhaltung (Retention) in Zeiten großen Angebotes (Gewitter, Schneeschmelze, Hochwasser, Regenzeit) eine wichtige Aufgabe im Wasserbau, zu deren Lösung die Methoden und Bauwerke sehr verschieden sind.

Um den Einfluss einer wasserbaulichen Maßnahme auf ein Fließgewässer zu ermitteln, müssen wichtige Daten des Gewässers bekannt sein: sein Abfluss, die Wasserstände, Laufveränderungen des Fließ-

gewässers, Eis- und Geschiebeverhältnisse, Wasserqualität, Grundwasserstände, Ufervegetation u. v. a. Wichtig ist für den Wasserbauer vor allem die Ermittlung des Abflusses Q in m^3/s , selten auch in l/s . Das kann nur bei sehr kleinen Wasserläufen (Bächen im Quellbereich) sowie im Laborgerinne direkt erfolgen, indem in einer zu stoppenden Zeit alles Wasser in einen Messbehälter geleitet wird. Alle größeren Abflussermittlungen können nur indirekt erfolgen. Das geschieht über die Messung des Wasserstandes W bzw. der Wassertiefe h im Fließgewässer und die Berechnung der Querschnittsfläche A des Fließquerschnittes. Diese Berechnung ist einfach, solange das Gewässer ein künstliches Gerinne (Rechteck, Trapez o. a.) ist. Der Querschnitt eines natürlichen Wasserlaufes kann nur mit Hilfe zahlreicher Peilungen über die Breite des Wasserlaufes ermittelt werden. Da auch der Querschnitt eines Fließgewässers Veränderungen unterliegt, sind ergänzende Messungen später nicht zu umgehen. Mit dem Kontinuitätsgesetz

$$\boxed{Q = A \cdot v_m} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (1.3)$$

kann der Abfluss in einem Querschnitt bestimmt werden, wenn auch v_m , die über den Querschnitt gemittelte Fließgeschwindigkeit in m/s bekannt ist. Auch diese setzt sich aus zahlreichen Einzelmessungen zusammen, deren Durchschnittswert gebildet wird. Die Einzelmessungen erhält man mit dem hydrometrischen Messflügel oder anderen Messverfahren.

Hat man für mehrere Wassertiefen oder Wasserstände die Abflüsse Q gemessen oder berechnet, so kann man die Abflusskurve $Q = f(h)$ bzw. $Q = f(W)$ aufstellen. Das schafft die Möglichkeit, aus einer einfachen Ablesung des Wasserstandes auf den Abfluss zu schließen. Es ermöglicht auch, erste Schlüsse zu ziehen, wie geplante Eingriffe (Einleitungen, Entnahmen von Wasser, Hebung des Wasserspiegels oder Querschnittsänderungen) sich auswirken

werden. Die Abflusskurve ist eine wichtige Voraussetzung, um wasserbauliche Maßnahmen am Fließgewässer bewerten zu können. Zur Ermittlung einer Abflusskurve (auch als Schlüsselkurve bezeichnet) können Kap. 2 und [02] herangezogen werden.

Beispiel 1: Niederschlag und Abfluss in einem kleinen Einzugsgebiet

Ein $A_E = 47,8 \text{ km}^2$ großes Einzugsgebiet eines Flusses (vgl. auch Bild 1.2) im Hügelland Sachsens besteht zu 45 % aus Wald (mitteldicht), 40 % aus Weiden und hat 15 % versiegelte Flächen (Häuser, Straßen usw.). Es soll vergleichsweise von zwei unterschiedlichen Wettersituationen beeinflusst werden, deren Einflüsse auf das Abflussgeschehen am Kontrollpunkt K_2 zu untersuchen sind:

a) Der Basisabfluss am Punkt K_2 beträgt $Q_B = 4,12 \text{ m}^3/\text{s}$, als ein Starkregen der Dauer T_C mit der zugehörigen Niederschlagshöhe $h_N = 60 \text{ mm}$ einsetzt. Der Boden vom Typ B (mittleres Versickerungsvermögen) nimmt Wasser auf, der Rest fließt im Fluss ab bzw. verdunstet.

b) Der Basisabfluss beträgt im Winter nur noch $Q_B = 3,60 \text{ m}^3/\text{s}$, als die Schneeschmelze beginnt. Die gesamte Fläche ist mit 35 cm Altschnee bedeckt, darunter ist der Boden gefroren. Auslöser der Schneeschmelze ist ein Blockregen mit einer mittleren Intensität von $i_N = 5,0 \text{ mm/h}$ und einer Dauer von $T_N = 12$ Stunden. Als Altschnee soll hier Schnee mit einer "Lagerungsdichte" von 40 % angesetzt werden, was der kritischen Lagerungsdichte entspricht, bei der die Wasserabgabe aus der Schneedecke einsetzt. Beim sog. Blockregen werden die Ungleichmäßigkeiten eines natürlichen Regens ausgeglichen, d. h. er wird gleichmäßig über den Zeitraum T_N angenommen.

Lösungen

a) Ziel der Aufgabe ist es, einen Starkregen statistisch einzuordnen und seinen Einfluss auf das Abflussgeschehen im Fluss zu ermitteln. Liegen zum Einzugsgebiet keine analysierbaren Messungen zu anderen Regenereignissen und Abflussveränderungen vor, dann kann der gesuchte Zusammenhang mit Hilfe einer synthetischen Übertragungsfunktion gewonnen werden, die wichtige Kennwerte des Einzugsgebietes berücksichtigt [17].

Zunächst ist für das Einzugsgebiet die Größe von T_c , der Konzentrationsdauer,

nach der empirischen Gleichung (1.4) zu bestimmen:

$$T_c = \left(0,868 \cdot \frac{l^3}{h} \right)^{0,385} \quad [h] \quad (1.4)$$

mit l größte Länge der Fließstrecke im Einzugsgebiet in km, im Beispiel angenommen mit 9,7 km

und h Höhenunterschied zwischen der Wasserscheide und dem Kontrollpunkt K_2 in m, im Beispiel werden 12,5 m gewählt.

Tabelle 1.4 C_N -Werte für die Bodenfeuchteklasse II nach [88]

Bodentyp A	Boden mit großem Versickerungsvermögen auch nach starker Vorbefeuchtung, z. B. tiefe Sand- und Kiesböden.			
Bodentyp B	Böden mit mittlerem Versickerungsvermögen. Tiefe bis mäßig tiefe Böden mit mäßig feiner bis grober Textur, z. B. mitteltiefe Sandböden, Löß, (schwach) lehmiger Sand.			
Bodentyp C	Böden mit geringem Versickerungsvermögen. Böden mit feiner bis mäßig feiner Textur oder mit wasserstauer Schicht, z. B. flache Sandböden, sandiger Lehm.			
Bodentyp D	Böden mit sehr geringem Versickerungsvermögen. Tonböden, sehr flache Böden über nahezu undurchlässigem Material, Böden mit dauernd sehr hohem Grundwasserspiegel.			
Bodennutzung	C_N in % für Bodentyp			
	A	B	C	D
Ödland (ohne nennenswerten Bewuchs)	77	86	91	94
Hackfrüchte, Wein	70	80	87	90
Wein (Terrassen)	64	73	79	82
Getreide, Futterpflanzen	64	76	84	88
Weide (normal)	49	69	79	84
Weide (karg)	68	79	86	89
Dauerwiese	30	58	71	78
Wald (stark aufgelockert)	45	66	77	83
Wald (mittel)	36	60	73	79
Wald (dicht)	25	55	70	77
Versiegelte Flächen	100	100	100	100

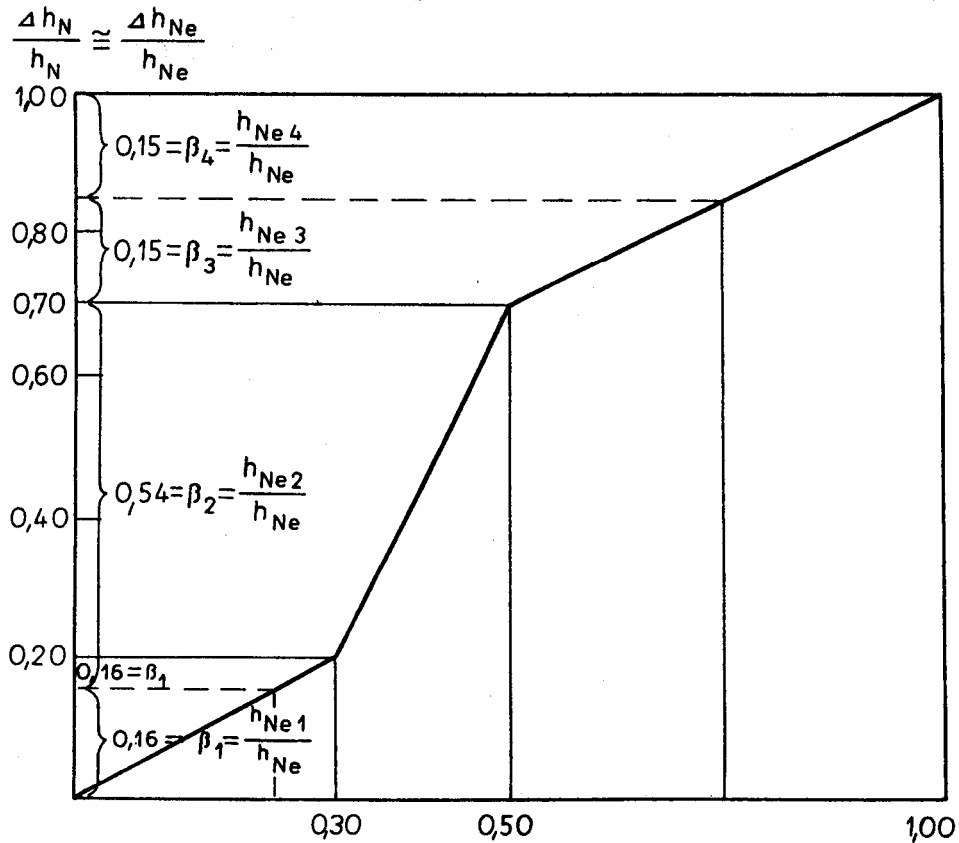


Bild 1.4 Empfohlener Niederschlagsverlauf aus [75]

Mit den oben bereits genannten Werten für $l = 9,7 \text{ km}$ und $h = 12,5 \text{ m}$ ergibt sich:

$$T_c = \left(0,868 \cdot \frac{9,7^3}{12,5} \right)^{0,385} \approx 5 \text{ h}$$

Nach [73] entspricht dieser Niederschlag im angegebenen Einzugsgebiet etwa einer Häufigkeit von $n = 0,04$. Jetzt muss der C_N -Wert des Einzugsgebietes, der Bodentyp und Nutzungsart berücksichtigt, nach Tabelle 1.4 bestimmt werden. Für den angenommenen Bodentyp ergibt sich C_N zu:

$$C_N = 0,45 \cdot 60 + 0,40 \cdot 69 + 0,15 \cdot 100 = 69,6 \%$$

Aus dem Niederschlag wird nur ein kleiner Teil abflusswirksam, der größere Teil versickert, verdunstet und wird gespeichert. Der abflusswirksame Niederschlag h_{Ne} kann nach Gl. (1.5) bestimmt werden:

$$h_{Ne} = \frac{\left[\left(\frac{h_N}{25,4} \right) - \left(\frac{200}{C_N} \right) + 2 \right]^2 \cdot 25,4}{\left(\frac{h_N}{25,4} \right) + \left(\frac{800}{C_N} \right) - 8} \quad (1.5)$$

Für $h_N = 60 \text{ mm}$ wird

$$h_{Ne} = \frac{\left[\frac{60}{25,4} - \frac{200}{69,6} + 2 \right]^2 \cdot 25,4}{\frac{60}{25,4} + \frac{800}{69,6} - 8} = 9,6 \text{ mm}$$

In der Natur ist der Niederschlagsverlauf nicht gleichmäßig über T_N verteilt. Diesem Umstand kann durch Vergrößerung von T_C oder mit Hilfe des vom ATV-DVWK empfohlenen Niederschlagsverlaufs Rechnung

getragen werden. Dieser geht aus Bild 1.4 hervor und soll hier verwendet werden. Mit den Teilzeiten Δt , die höchstens 1,5 Stunden betragen sollen, werden aus Bild 1.4 die Beiwerte β_1 abgelesen. Für die hier gewählten vier Teilzeiten zu je 1,25 Stunden erhält man

$$\begin{aligned} \beta_1 &= 0,16 & h_{\text{Ne},1} &= 0,16 \cdot 9,6 = 1,54 \text{ mm} \\ \beta_2 &= 0,54 & h_{\text{Ne},2} &= 0,54 \cdot 9,6 = 5,18 \text{ mm} \\ \beta_3 &= 0,15 & h_{\text{Ne},3} &= 0,15 \cdot 9,6 = 1,44 \text{ mm} \\ \beta_4 &= 0,15 & h_{\text{Ne},4} &= 0,15 \cdot 9,6 = 1,44 \text{ mm} \end{aligned}$$

Diese abflusswirksamen Niederschlagshöhen ($h_{\text{Ne},1}$ bis $h_{\text{Ne},4}$) verursachen je eine Direktabflussschwelle $Q_{D,i}$, die nach den Gleichungen (1.6) bis (1.10) bestimmt werden kann. Das erfolgt in Tabelle 1.5. Dort wird auch die Gesamtabflusslinie Q_t nach Gl. (1.11) ermittelt, die im Bild 1.5 dargestellt ist.

$$\alpha = 2,41 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{I}} \right)^{-0,574} \quad (1.6)$$

$$k_1 = 0,731 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{I}} \right)^{0,218} \quad (1.7)$$

$$k_2 = 3,04 \cdot k_1^{1,29} \quad (1.8)$$

Mit $I = \frac{12,5}{9700} = 0,0013$ wird

$$\alpha = 2,41 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{0,0013}} \right)^{-0,574} = 0,36$$

$$k_1 = 0,731 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{0,0013}} \right)^{0,218} = 1,51$$

$$k_2 = 3,04 \cdot 1,51^{1,29} = 5,17$$

Die Einheitsganglinie entsteht aus Gl. (1.9)

$$u(t) = \left[\alpha \cdot \frac{t}{k_1^2} \cdot e^{\left(\frac{-t}{k_1}\right)} + (1-\alpha) \cdot \frac{t}{k_2^2} \cdot e^{\left(\frac{-t}{k_2}\right)} \right] \cdot \frac{A_{Eo}}{3,6} \quad (1.9)$$

[m³/s,mm]

$$Q_{D,i}(t) = u(t) \cdot h_{\text{Ne},i} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (1.10)$$

$$u(t) = \left[\begin{aligned} &0,36 \cdot \frac{t}{1,51^2} \cdot e^{\left(\frac{-t}{1,51}\right)} + (1-0,36) \cdot \\ &\frac{t}{5,17^2} \cdot e^{\left(\frac{-t}{5,17}\right)} \end{aligned} \right] \cdot \frac{47,8}{3,6}$$

$$u(t) = 2,096 \cdot t \cdot e^{\left(\frac{-t}{1,51}\right)} + 0,318 \cdot t \cdot e^{\left(\frac{-t}{5,17}\right)}$$

$$Q(t) = \sum Q_{D,i}(t) + Q_B(t) \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (1.11)$$

Tabelle 1.5 Schrittweise Ermittlung der Abflüsse Q im Fluss am Kontrollpunkt K_2 für den angenommenen Regen und Basisabfluss

t	u	Q_{D1}	Q_{D2}	Q_{D3}	Q_{D4}	Q
h	m ³ /s,mm	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
		1,54 mm	5,18 mm	1,44 mm	1,44 mm	(4,12)
1,25	1,457	2,24	-	-	-	6,36
2,50	1,491	2,30	7,72	-	-	14,14
3,75	1,233	1,90	6,39	1,78	-	14,19
5,00	0,986	1,52	5,11	1,42	1,42	13,59
6,25	0,881	1,36	4,56	1,25	1,25	8,42

Mit dem als gleichbleibend angenommenen Basisabfluss $Q_B = 4,12 \text{ m}^3/\text{s}$ entstehen die Gesamtabflüsse Q der Tabelle 1.5. Der Größtabfluss Q_{\max} beträgt $14,2 \text{ m}^3/\text{s}$ und tritt nach 3,75 Stunden auf.

b) Zunächst gilt es, die gesamte Wasserabgabe aus der Schneedecke und dem Regen zu bestimmen. Die Berechnung der Wasserabgabe aus Schnee kann nach [44] erfolgen. Dort ist das hier verwendete Schmelzsetzungsverfahren erläutert. Die Auswertung erfolgt in Tabelle 1.6.

In der Zeile 1 erfolgt die Einteilung des Tages wie in [44]. Der Blockregen soll von 7⁰⁰ Uhr bis 19⁰⁰ Uhr fallen, was Zeile 2 erklärt. Zu diesen Tageszeiten sollen die in Zeile 3 angegebenen mittleren Temperaturen auftreten. Sollten vergleichbare Messwerte vorhanden sein, sind diese einzusetzen. Die potentielle Schneeschmelzrate M_p kann nach Gl. (1.12) ermittelt werden.

$$M_p = a_d \cdot t_L \quad [\text{mm/d}] \quad (1.12)$$

Mit a_d Gradtag-Faktor in mm/d,K
 t_L Tagesmittel der positiven Lufttemperaturen (= Gradtage in °C)

Der Gradtagfaktor a_d wurde nach [44] zu 5 mm/d,K gewählt und auf die Zeitintervalle wie folgt verteilt:

21⁰⁰ bis 7⁰⁰ Uhr $a = 1,25 \text{ mm/K}$

7⁰⁰ bis 14⁰⁰ Uhr $a = 1,50 \text{ mm/K}$

14⁰⁰ bis 21⁰⁰ Uhr $a = 2,25 \text{ mm/K}$

Aus der Schneeschmelzrate kann die Schneehöhenänderung ΔH_s bestimmt werden, Gl. (1.13) und Zeile 5 in Tabelle 1.6.

$$\Delta H_s = \frac{100 M_p}{P_{t,\max}} \quad [\text{mm}] \quad (1.13)$$

Der Höchstwert für die Trockenschneedichte in der neuen Schneedecke $P_{t,\max}$ wird hier mit 24 % angenommen. Er liegt

allgemein in dieser Größenordnung, kann auch nach [44] ermittelt werden. Durch Subtraktion der etwas gerundeten Werte für ΔH_s entsteht die neue Schneehöhe H_{neu} (Zeile 6) am Ende des Zeitintervalls. W_{\max} , der größte Wassergehalt (Zeile 7) ist 40 % der Schneehöhe. Zu diesem Wassergehalt kommt der Regen (Zeile 2) hinzu. Das gesamte akkumulierte Wasseräquivalent (Zeile 8) wird abgegeben, bis die Schneedecke geschmolzen ist oder wieder Frost einsetzt. Die Werte der Zeile 9 entstehen durch Subtraktion der Zeile 7 von Zeile 8.

Mit der Zeile 9 wurde die Belastung des Einzugsgebietes aus Regen und Schneeschmelze errechnet. Diese Ganglinie des Schneedeckenabflusses kann wie eine Belastungsganglinie aus Regen behandelt werden. Somit können die Überlegungen aus der Aufgabe 1a) verwendet werden.

Da der Boden unter dem Schnee gefroren angenommen wurde, erst nach und nach auftaut, wird C_N zunächst mit 100, am zweiten Tag mit 85 und am dritten Tag mit 70 angenommen, Zeile 10. Das ergibt nach Gl. (1.5) und den Niederschlagshöhen der Zeile 9 die Werte für h_{N_e} , Zeile 11.

Der abflusswirksame Niederschlag soll – entsprechend der Tagestemperatur – hier nach Bild 1.4 angenommen werden.

Zu beachten ist, dass der Flächeninhalt der Fläche A_1 gleich 61 mm, der der Fläche A_2 gleich 43 mm sein muss, vgl. Zeile 11 der Tabelle 1.6. Mit diesen abflusswirksamen Niederschlagsintensitäten und der in der Aufgabe 1a) ermittelten Einheitsganglinie für das Einzugsgebiet können die Teilabflüsse Q_{D1} bis Q_{D4} sowie unter Beachtung des Basisabflusses von $Q_B = 3,6 \text{ m}^3/\text{s}$ der Gesamtabfluss Q für den Kontrollpunkt K_2 bestimmt werden. Die Tabelle 1.7 weist aus, dass vier Stunden nach Einsetzen von Regen und Schneeschmelze der größte Abfluss mit $Q = 23,7 \text{ m}^3/\text{s}$ auftritt.

Tabelle 1.6 Ermittlung des abflusswirksamen Niederschlages aus Schneeschmelze und Regen

Zeile	Bez.	Beschreibung		1			2			3		
1		Zeit am Intervallende	Uhr	7	14	21	7	14	21	7	14	21
2	N	Niederschlag	mm	-	35	25	-	-	-	-	-	-
3	t_L	mittl. Temperatur	°C	3	10	5	3	10	5	3	10	5
4	M_p	freies Wasser aus Schneeschmelze = potentielle Schneeschmelzrate	mm	3,75	15	11,25	3,75	15	11,25	3,75	15	11,25
5	ΔH_s	Schneehöhenänderung durch M_p	durch mm	15,6	62,5	46,9	15,6	62,5	46,9	15,6	62,5	46,9
6	H_{neu}	Schneehöhe	mm	334	271	224	208	145	98	82	19	-
7	W_{max}	größter Wassergehalt bei 40 %	mm	134	108	90	83	58	39	33	8	-
8	W_{akk}	akkumuliertes Wasseräquivalent	mm	134	169	133	90	83	58	39	33	8
9	W_{ab}	Wasserabgabe aus Schnee und Regen	mm	-	61	43	7	25	19	6	25	8
10	C_N			100			85			70		
11	h_{Ne}	abflusswirksamer Niederschlag	mm	-	61	43	-	4,22	1,84	-	0,1	-

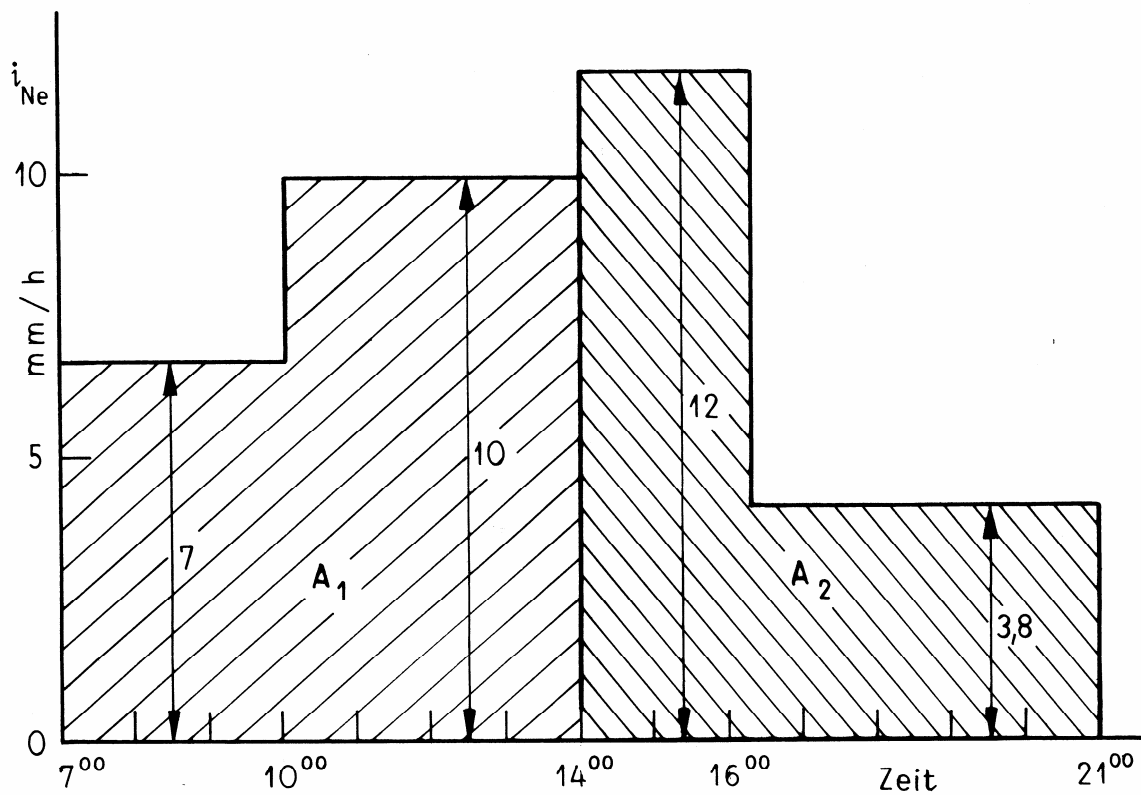


Bild 1.5 Angenommene Verteilung von i_{Ne}

Tabelle 1.7 Abflussermittlung aus Regen u. Schneeschmelze am Kontrollpunkt K₂

t	u	Q_{D1}	Q_{D2}	Q_{D3}	Q_{D4}	Q_{ges}
h	m ³ /s,mm	7 mm/h	10 mm/h	12 mm/h	3,8 mm/h	m ³ /s
0	0	-	-	-	-	3,6
1	1,343	9,4	-	-	-	13,0
2	1,547	10,8	-	-	-	14,4
3	1,395	9,8	-	-	-	13,4
4	1,180	8,3	11,8	-	-	23,7
5	0,986	6,9	9,9	-	-	20,4
6	0,835	5,8	8,4	-	-	17,8
7	0,717	5,0	7,2	-	-	15,8
8	0,625	4,4	6,3	7,5	-	21,8
9	0,551	3,9	5,5	6,6	-	19,6
10	0,488	3,4	4,9	5,9	-	19,7
11	0,432	3,0	4,3	5,2	1,6	17,7
12	0,348	2,7	3,8	4,6	1,5	16,2
13	0,339	2,4	3,4	4,1	1,3	14,8
14	0,300	2,1	3,0	3,6	1,1	13,4

1.3 Gewässerkundliche Ausgangsdaten

1.3.1 Daten für Fließgewässer

1.3.1.1 Wasserstände

Wasserstände werden an Pegeln festgestellt. Der herkömmliche Lattenpegel wird täglich einmal abgelesen, in Hochwassersituationen auch öfter. Heute ist er vor allem zur Kontrolle von automatisch aufzeichnenden Schreibpegeln, die durch Fernübertragung mit zentralen Auswertungsstellen verbunden sind, notwendig. Für Auswertungen ist zu beachten, dass der Nullpunkt eines Pegels nicht mit der Sohle des Fließgewässers identisch sein muss. Ablesungen der Lattenpegel oder Aufzeichnungen der Schreibpegel liefern die Wasserstandsganglinie $W(t)$. Sie gibt den Wasserspiegelverlauf über eine bestimmte Zeit wieder. Für statistische Auswertungen ist es wichtig, einen langen und lückenlosen Beobachtungszeitraum zur Verfügung zu haben. Eine Wasserstandsganglinie sagt nur etwas über die Vergangenheit aus. Um auch für künftig zu erwartende Wasserstände Prognosen erstel-

len zu können bzw. über die Auftretenswahrscheinlichkeit bestimmter Wasserstände Aussagen treffen zu können, sind statistische Auswertungen notwendig. Grundlage von Prognosen sind die Wasserstandsdauerlinien. Eine Wasserstandsdauerlinie entsteht durch Summieren der Tage, an denen ein bestimmter Wasserstand herrschte, und Auftragen der Ergebnisse in ein Koordinatensystem. Das Bild 1.6 zeigt das Schema.

Aus der Ganglinie gehen der höchste und niedrigste Wasserstand (*HW* bzw. *NW*) des Zeitraumes hervor. Die bisher bekannten Extremwerte, also der höchste bisher bekannt gewordene Wasserstand und der niedrigste, werden mit *HHW* und *NNW* bezeichnet. Dabei kann *NNW* auch null sein, d. h. dass der Wasserlauf ausgetrocknet war. Viele Dinge, z. B. der Grundwasserstand in flussnahen Auen oder die Bildung und Veränderung des Flussbettes werden von den kurzzeitig wirkenden Extremwasserständen weniger beeinflusst. Mittlere Wasserstände sind hier entscheidender. Für einen Zeitraum T errechnet sich der Mittelwasserstand nach Gl. (1.14).