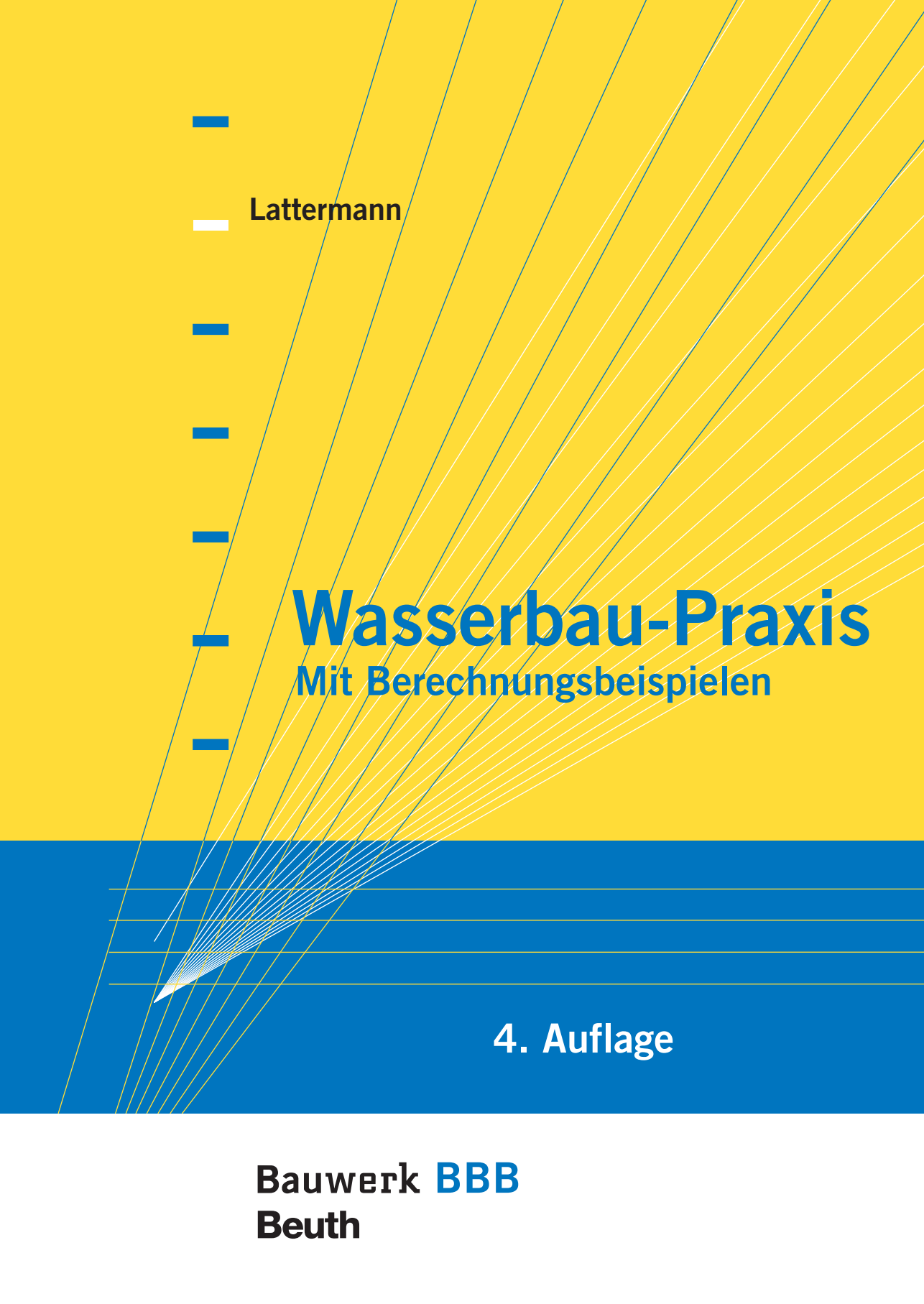




Lattermann

Wasserbau-Praxis

Mit Berechnungsbeispielen

4. Auflage

Bauwerk **BBB**
Beuth

(Leerseite)



Prof. Dr.-Ing. habil Eberhard Lattermann

Wasserbau-Praxis

Mit Berechnungsbeispielen

4., überarbeitete und aktualisierte Auflage 2017

Herausgeber:

DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

Beuth Verlag GmbH · Berlin · Wien · Zürich

Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

© 2017 Beuth Verlag GmbH

Berlin · Wien · Zürich

Am DIN-Platz

Burggrafenstraße 6

10787 Berlin

Telefon: +49 30 2601-0

Telefax: +49 30 2601-1260

Internet: www.beuth.de

E-Mail: kundenservice@beuth.de

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechts ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in elektronische Systeme.

Die im Werk enthaltenen Inhalte wurden von Verfasser und Verlag sorgfältig erarbeitet und geprüft. Eine Gewährleistung für die Richtigkeit des Inhalts wird gleichwohl nicht übernommen. Der Verlag haftet nur für Schäden, die auf Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit seitens des Verlages zurückzuführen sind. Im Übrigen ist die Haftung ausgeschlossen.

© für DIN-Normen DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin

Titelbild: © Berit Breuer

Satz: B & B Fachübersetzergesellschaft mbH, Berlin

Druck: COLONEL, Kraków

Gedruckt auf säurefreiem, alterungsbeständigem Papier nach DIN EN ISO 9706

ISBN 978-3-410-27621-0

ISBN (E-Book) 978-3-410-27622-7

Vorwort

Die „Wasserbau-Praxis“ ist als Einführung in Gebiete und Probleme des Wasserbaus gedacht, ohne die Theorie zu strapazieren. Vor allem Studenten an Universitäten, Hoch- und Fachhochschulen verschiedener Fachrichtungen, die einen Überblick über dieses interessante Fachgebiet erhalten, werden die „Wasserbau-Praxis“ gern als Lehrmaterial verwenden. Das haben die ersten Auflagen bereits gezeigt, die schnell vergriffen waren. Der zu vermittelnde große Umfang, den der Wasserbau nun einmal hat, und das Ziel des Buches, eine Einführung zu sein, führen nur gelegentlich in die Tiefe eines Problems oder in angrenzende Fachgebiete, die wasserbauliche Projekte natürlich auch beeinflussen.

Die „Wasserbau-Praxis“ spiegelt die Vorlesungen und Seminare wider, die ich für Studenten des Bauingenieurwesens, der Wasserwirtschaft, der Landschaftsarchitektur, des Verkehrswesens und des Wirtschaftsingenieurwesens im Direkt- und im Fernstudium gehalten habe. Aber auch Planungsbüros, Behörden und andere Dienststellen können Anregungen für ihre tägliche Arbeit finden. Sowohl die großen Wasserbauwerke als auch die kleinen Probleme anderer Fachgebiete, bei denen der Wasserbau eine Rolle spielt, werden dargestellt. Rekonstruktionen, Modernisierungen und Unterhaltungsarbeiten nehmen ebenso einen Raum ein wie Neubauten und Abbau. Beispiele können als Übungsaufgaben genutzt werden oder einer vertiefenden und anschaulichen Wissensvermittlung dienen.

Gegenüber den ersten drei Auflagen sind Veränderungen vorgenommen worden, die dem Werk sicher gut tun werden.

In meiner Zeit als Professor an der TU Dresden habe ich auch Gutachten erstellen müssen, wenn Schadensfälle aufgetreten waren. In der Anlage stelle ich einige Gutachten vor. Bekanntlich ist man nach dem Schaden und auch nach dem Gutachten klüger als zuvor. Deshalb stellte ich mir nach jedem meiner Gutachten die Frage, wie ich entschieden hätte, wäre ich an der Stelle des Schuldigen am Schadensfall verantwortlich gewesen. Dem Leser kann ich nur empfehlen, sein Heureka zu suchen und die Suche nach dem Schuldigen erst vorzunehmen, bevor er einige Seiten weiter hinten meine Lösung sucht und auch findet.

Sowohl das größer gewordene Europa als auch die europäische Wasserrahmenrichtlinie und die großen Fluten von 2002 und 2013 beeinflussen natürlich ein Buch aus dem Gebiet des Wasserbaus. Gerade Ereignisse wie 2002 und 2013 zeigen immer wieder deutlich, welche großen Aufgaben auch in Europa im Wasserbau noch bewältigt werden müssen. Der Klimawandel, das Streben nach weniger Ausstoß von CO₂, die Renaturierung geschundener oder veränderter Landschaften (Braunkohle) und ihre Umwandlung in Kulturlandschaften beeinflussen immer mehr das Schaffen des Wasserbauers.

Auch den Gegnern wasserbaulicher Projekte wird mehr als nur ein kurzer Blick in dieses Buch empfohlen, um nicht im Übereifer durch falsche Behauptungen Gutes zu behindern, ohne Besseres schaffen zu können.

Die vierte Auflage erscheint wieder in einem Band und erhält eine Anlage, in der ich einige Gutachten aus meiner früheren Tätigkeit vorstelle.

Ich wünsche Ihnen viel Freude, gute Erkenntnisse und ein sicheres Grundlagenwissen, wenn Sie mit diesem Band arbeiten

Dresden, im Mai 2017

Eberhard Lattermann

(Leerseite)

Inhaltsverzeichnis

Einführung	1
1 Gewässerkunde	2
1.1 Die Wasservorräte der Erde	2
1.2 Der Wasserkreislauf	2
1.2.1 Einführung	2
1.2.2 Der Niederschlag	3
1.2.3 Die Verdunstung	4
1.2.4 Versickerung, Grundwasser und unterirdischer Abfluss	4
1.2.5 Der oberirdische Abfluss	6
1.3 Gewässerkundliche Ausgangsdaten	7
1.3.1 Daten für Fließgewässer	7
1.3.1.1 Wasserstände	7
1.3.1.2 Abflüsse	8
1.3.1.3 Geschiebe	8
1.3.2 Daten für Standgewässer	9
1.3.2.1 Wasserstände	9
1.3.2.2 Wellen	10
1.3.2.3 Windstau	13
1.3.3 Eis	14
1.3.3.1 Entstehung und Eigenschaften des Eises	14
1.3.3.2 Belastung von Ufern und Bauwerken durch Eis	15
1.4 Zusammenfassung	19
2 Flussbau	21
2.1 Hydromechanische Grundlagen, Fließformeln	21
2.1.1 Fließformeln für Gerinne	21
2.1.2 Fließformeln für bewachsene Fließgewässer	23
2.1.3 Schleppspannungen an Sohle und Böschung	26
2.2 Natürliche Fließvorgänge und Geschiebe	28
2.2.1 Fließvorgänge in der Geraden	28
2.2.2 Fließvorgänge in Krümmungen	28
2.2.3 Schwebstoffe und Geschiebe	29
2.3 Bauen im und am Fließgewässer	32
2.3.1 Baustoffe und Bauelemente für den Flussbau	32
2.3.2 Sohlensicherungen	33
2.3.3 Sicherung von Böschungen und Böschungsfüßen	38
2.3.4 Trassierung im Flussbau	41
2.3.5 Bauwerke im und am Fließgewässer	42
2.3.5.1 Geröllsperrn, Wildbachverbau	43
2.3.5.2 Wasserentnahmen	44
2.3.5.3 Durchlässe	45
2.3.5.4 Düker	47
2.3.5.5 Pfeiler, Widerlager, Baugruben	48
2.4 Hochwasserregelung	51
2.4.1 Entstehung und Ablauf einer Hochwasserwelle	51
2.4.2 Örtlicher Hochwasserschutz	53
2.4.3 Hochwasserschutzsysteme	57
2.5 Niedrigwasserregelung	59
2.5.1 Ziele und Möglichkeiten einer Niedrigwasserregelung	59

2.5.2	Bauwerke zur Niedrigwasserregelung	60
2.5.3	Auswirkungen und Grenzen der Niedrigwasserregelung	63
2.6	Stauregelung	65
2.6.1	Ziele und Auswirkungen einer Stauregelung	65
2.6.2	Bauwerke einer Staustufe, ihre Anordnung und Herstellung	67
2.6.3	Fischaufstiegsanlagen	70
2.6.3.1	Einleitung	70
2.6.3.2	Raue Rampen mit Störsteinen	71
2.6.3.3	Verbindungsgewässer	72
2.6.3.4	Hydromechanische Bemessung naturnaher Fischaufstiegsanlagen	73
2.6.3.5	Technische Fischwege	75
2.7	Naturnaher Fließgewässerausbau, Renaturierung	76
2.8	Zusammenfassung	78
3	Stauanlagen	79
3.1	Einführung	79
3.2	Wehre	79
3.2.1	Hydromechanische Grundlagen	79
3.2.2	Standssicherheit	82
3.2.2.1	Wirkende Kräfte	82
3.2.2.2	Gleitsicherheit	83
3.2.2.3	Spannungsnachweise	83
3.2.2.4	Auftriebssicherheit	84
3.2.2.5	Nachweis der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch	84
3.2.3	Verschlussorgane beweglicher Wehre	86
3.2.4	Modernisierung von Wehren	87
3.2.4.1	Veranlassung	87
3.2.4.2	Vergrößerung des Abflussvermögens	88
3.2.4.3	Verbesserung der Tosbeckenwirksamkeit	88
3.2.4.4	Verbesserung der Standssicherheit	88
3.2.5	Sonderformen von Wehrkörpern	96
3.3	Talsperren	98
3.3.1	Aufgaben von Talsperren	98
3.3.2	Bauarten von Staumauern	98
3.3.3	Bemessung einer Gewichtsstaumauer	99
3.3.3.1	Wirkende Kräfte und Lastfälle	99
3.3.3.2	Bemessen auf Kippen und Gleiten	100
3.3.4	Konstruktives und Technologisches zum Bau einer Gewichtsstaumauer	102
3.3.4.1	Blockeinteilung und Blockfugen	102
3.3.4.2	Staumauerbeton	103
3.3.4.3	Entwässerung des Betons und der Sohle	104
3.3.4.4	Dichtungsschleier	104
3.3.4.5	Staumauern aus Walzbeton	105
3.3.5	Rekonstruktion alter Staumauern	105
3.3.6	Aufgaben und Bauarten von Staudämmen	107
3.3.7	Durchsickerung und Standssicherheit eines homogenen Dammes	110
3.3.8	Konstruktives und Technologisches zum Bau von Staudämmen	115
3.3.8.1	Übersicht	115
3.3.8.2	Stützkörper	116
3.3.8.3	Der Stützfuß	118
3.3.8.4	Dichtungen des Staudammes	118
3.3.8.5	Untergrundabdichtung	120

3.3.8.6	Filter.....	121
3.3.8.7	Schutzschichten	132
3.3.9	Sanierung von Staudämmen	135
3.3.10	Betriebseinrichtungen von Talsperren	136
3.3.10.1	Hochwasserentlastungsanlagen	136
3.3.10.2	Entnahmeanlagen.....	138
3.3.10.3	Grundablässe.....	139
3.3.10.4	Mess- und Kontrolleinrichtungen	140
3.4	Sedimentationsbecken	141
3.4.1	Aufgaben und Besonderheiten von Sedimentationsbecken	141
3.4.2	Spül- und Absetzvorgänge.....	141
3.4.3	Dämme zur Spülfeldbegrenzung.....	144
3.4.4	Bauwerke für Sedimentationsbecken.....	146
3.5	Zusammenfassung	146
4	Binnenverkehrswasserbau	148
4.1	Binnenschifffahrt und Umwelt	148
4.2	Binnenschiffe und Schiffsverbände	148
4.3	Schifffahrtskanäle	152
4.3.1	Kanaltrassierung im Grundriss, Längsschnitt und Querschnitt	152
4.3.1.1	Allgemeine Gesichtspunkte	152
4.3.1.2	Die gerade Kanalstrecke	153
4.3.1.3	Krümmungen mit $R \leq 2\,000\text{ m}$	156
4.3.1.4	Übergangsbögen	158
4.3.2	Fahrdynamik im Kanal	161
4.3.2.1	Einzel fahrendes Schiff.....	161
4.3.2.2	Schiffsbegegnungen.....	165
4.3.2.3	Der Propellerstrahl.....	167
4.3.3	Dichtungen und Deckwerke.....	168
4.3.3.1	Anforderungen an Dichtungen	168
4.3.3.2	Ausbildung von Kanaldichtungen	169
4.3.3.3	Aufgaben und Beanspruchung einer Sohlschutzschicht.....	170
4.3.3.4	Aufgaben, Beanspruchung und Bemessung eines Deckwerkes	174
4.3.4	Kanalbauwerke	178
4.3.5	Wasserbilanz im Schifffahrtskanal	179
4.3.6	Sanierung, Modernisierung und Rekonstruktion im Kanalbau	180
4.4	Schiffbare Flüsse.....	184
4.4.1	Flussschifffahrt in Vergangenheit und Zukunft.....	184
4.4.2	Flussschifffahrt und Fahrdynamik	185
4.5	Nutzen, Kosten, Perspektiven	187
4.5.1	Der Bundesverkehrswegeplan	187
4.5.2	Das Nutzen-Kosten-Verhältnis	187
4.5.3	Perspektiven	188
4.6	Schleusen	189
4.6.1	Arten und Abmessungen von Binnenschiffsschleusen	189
4.6.2	Bau und Funktion einer Kammerschleuse	190
4.6.2.1	Teile einer Kammerschleuse.....	190
4.6.2.2	Ausbildung des Kammerquerschnittes	191
4.6.2.3	Schleusenhäupter	193
4.6.2.4	Schleusentore	198
4.6.2.5	Umläufe und Umlaufverschlüsse.....	206
4.6.2.6	Revisionsverschlüsse	209

4.6.2.7	Stoßschutzeinrichtungen	209
4.6.3	Bau und Funktion einer Sparschleuse	211
4.6.4	Hydromechanik der Schleusen	212
4.6.4.1	Das Füllen einer Kammerschleuse	213
4.6.4.2	Das Füllen einer Sparschleuse	219
4.6.5	Leistungsfähigkeit von Schleusen	223
4.6.6	Schleusentreppen und Koppelschleusen	223
4.7	Schiffshebwerke	224
4.7.1	Gegengewichtshebwerke	224
4.7.2	Schwimmerhebwerke	226
4.7.3	Die längsgeneigte Ebene	226
4.7.4	Die quergeneigte Ebene	227
4.7.5	Der Wasserkeil	228
4.8	Vorhäfen	228
4.9	Binnenhäfen und Umschlagstellen	234
4.9.1	Einleitung	234
4.9.2	Umschlagstellen und Häfen an Kanälen	235
4.9.3	Umschlagstellen und Häfen an Flüssen	235
4.9.4	Querschnittsgestaltung von Binnenhäfen	236
4.10	Zusammenfassung	240
5	Wasserkraftwerke	242
5.1	Wasserkraft und Umwelt	242
5.1.1	Der Bedarf an elektrischer Energie und seine Deckung	242
5.1.2	Wasserkraft als Quelle regenerativer Energie	244
5.1.3	Ökologische Fragen bei der Wasserkraftnutzung	245
5.1.4	Wirtschaftliche Fragen der Wasserkraftausnutzung	245
5.1.5	Potentiale der Wasserkraft	247
5.2	Leistung und Arbeit eines Wasserkraftwerkes	247
5.3	Turbinen	251
5.4	Kraftwerkskanäle	254
5.5	Arten von Wasserkraftwerken	260
5.5.1	Laufwasserkraftwerke	260
5.5.2	Spitzenwasserkraftwerke	261
5.5.3	Pumpspeicherwerke	262
5.5.4	Gezeitenkraftwerke	263
5.5.5	Wellenkraftwerke	264
5.5.6	Kleinwasserkraftwerke	264
5.6	Zusammenfassung	265
	Verzeichnis verwendeter und weiterführender Literatur	267
	Verzeichnis häufig verwendeter Symbole	272
	Sachwortverzeichnis	276
	Anlage	280

Einführung

Ohne Wasser gäbe es kein Leben. Um Leben auf allen Kontinenten unseres Erdballs dauerhaft zu erhalten und lebenswerter zu machen, muss mit Wasser verantwortungsvoll umgegangen werden. Mensch und Natur standen und stehen nicht immer im Einklang, wenn es um Wasser geht.

Von allen Bauschaffenden steht der Wasserbauer der Natur am nächsten, oft mittendrin, 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. Das sind vor allem:

- Schutz vor immer häufiger auftretenden Naturkatastrophen (Überschwemmungen und Dürre),
- Bereitstellung von Trink- und Brauchwasser,
- Nutzung der Gewässer für die Energiewirtschaft (Ökostrom), Schifffahrt, Fischerei, Erholung,
- Schutz der Landschaft – nicht nur am Rande der Gewässer.

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

Heute spielen ökologische Bewertungen (sehr oft auch nur als Vermutung) eine viel zu große Rolle bei der Vorbereitung oder der Verhinderung eines Wasserbauwerkes. Nur mit dem Ziel, das Vorhandene in der Natur zu erhalten, werden geplante Wasserbauten heute oft verhindert. Das Wort *Eingriff* (z. B. in die Landschaft) wird grundsätzlich negativ gesehen – ganz im Gegensatz zum Eingriff eines Arztes. Ökologische Vorzüge einer

wasserbaulichen Maßnahme werden erst erkannt, wenn z. B. aus wirtschaftlichen Gründen das Bauwerk entfernt werden soll. Dann müssen Wasserstände erhalten bleiben wegen nun vorhandener Feuchtbiotope oder auch das ganze Bauwerk auf Wunsch des Denkmalschutzes. Die Vorzüge eines Wasserbauwerkes müssen künftig vor allem aus der Sicht der Umwelt objektiver dargestellt werden, auch wenn sie erst später sichtbar sind.

Ausgleichsmaßnahmen mindern die kurzzeitigen Nachteile eines Eingriffs der Wasserbauer in die Natur. 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 Tiere und Pflanzen pro Art sich durch viele Begleitmaßnahmen vergrößert haben.

In vielen Einzelfragen, die den Entscheidungen im Wasserbau vorausgehen, spielen Prognosen eine wichtige Rolle. Wasserstände, Wellenhöhen und Abflussmengen sind ebenso vorauszusagen wie künftige Bedürfnisse der Menschen, der Wirtschaft und der Umwelt. Der Klimawandel spielt für die Prognosen eine wichtige Rolle.

Grundlage vieler Planungen für den Wasserbau sind hydrologische Daten. Aus verbesserten hydrologischen Daten, aus dem Verändern von Vorschriften (z. B. europäische Wasserrahmenrichtlinie) ergeben sich neue wasserbauliche Aufgaben.

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 wie Bauwerke für den Hochwasserschutz oder die Niedrigwasserregelung werden im Abschnitt 1.3 vorgestellt.

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 2013 im Bereich der Einzugsgebiete von Elbe und Donau 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 Fluten Millionen von Kubikmetern Hochwasser zurückgehalten, die in trockenen Sommern wie 2015 Mensch, Tier und Pflanze zur Verfügung standen. Es reichte nicht aus, um die Jahrhundertfluten 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 Wasserbaustrategie 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

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

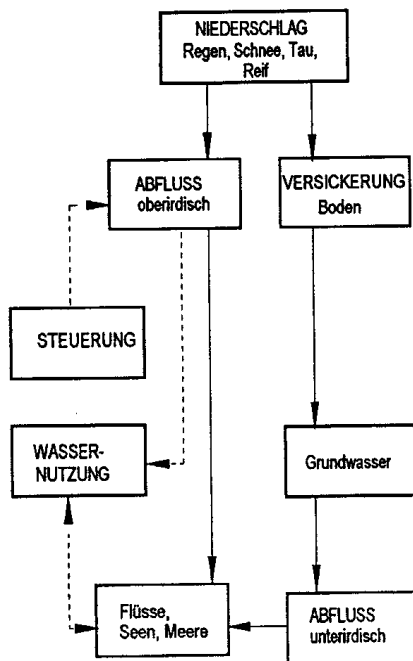


Bild 1.1 Teil des Wasserkreislaufes

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 km^2 . Bis Dresden vergrößert es sich auf 53 096 km^2 . Die Unterschiede zwischen ober- und unterirdischem Einzugsgebiet sind meist zum Vernachlässigen klein.

Die Grenzen eines Einzugsgebietes werden als Wasserscheide bezeichnet. Für alle wasserwirtschaftlichen Entscheidungen, die zu wasserbaulichen Maßnahmen führen, ist stets die Gesamtheit des Einzugsgebietes zu be-

trachten. Politische Grenzen und Eigentumsfragen standen und stehen dem aber sehr oft im Wege.

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 4 000 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 $\text{l/(s} \cdot \text{ha)}$ oder mm/15 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 l/(s · ha).

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 1 000 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). 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 werden 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, Dübén	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	1 000	585	415	58,5
Lech, Mündung	1 169	780	389	66,7
Iller, Mündung	1 239	885	354	71,5
Inn, Innsbruck	1 241	990	251	79,8
Inn, Kufstein	1 290	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

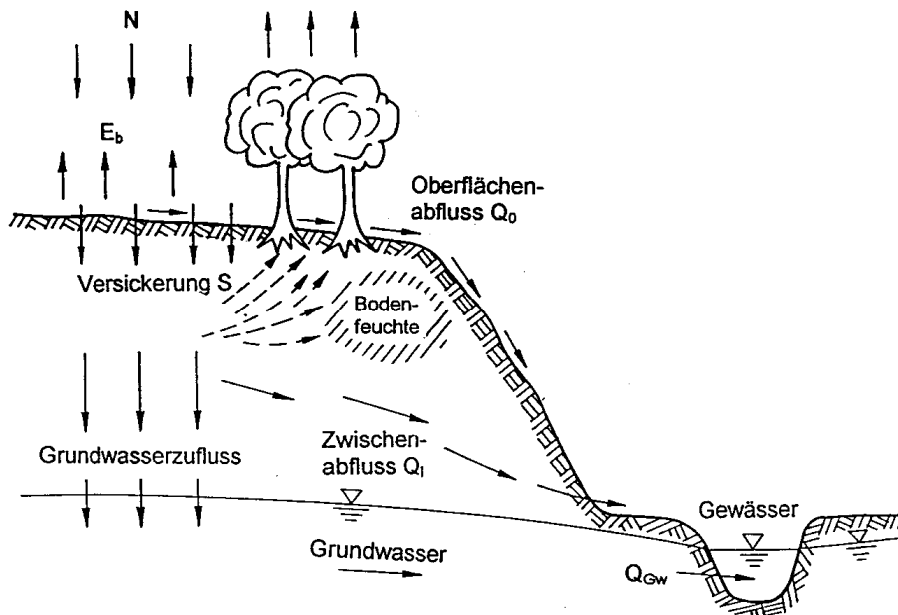


Bild 1.2 Aufteilung des versickernden Niederschlages

dem Niederschlag in den Untergrund oder versickert später aus einem Oberflächengewässer (Fluss, See, Kanal, Speicher), sobald sein Wasserspiegel höher liegt als der Grundwasserspiegel in der Nähe des Gewässers. Das in den Boden eindringende Niederschlagswasser verzögert den oberirdischen Abfluss, indem es im Boden gespeichert wird.

Drei Wege kann dieses Wasser nehmen, vgl. Bild 1.2:

- 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 weiträu-

mig beeinflussen. Für Versickerungsraten aus Oberflächengewässern ist in erster Linie maßgebend, ob eingebaute Dichtungen das Sickerwasser zurückhalten oder bevorzugte Sickerwege (z. B. entlang von Massivbauwerken) die Versickerung fördern. Gefrorener Boden lässt keine Versickerung zu. 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. Die Fließgeschwindigkeit v_f in m/s ist der Quotient 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

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

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

I_{st} ist das Standrohrspiegelgefälle, also ein Quotient aus dem Wasserspiegelunterschied in zwei Standrohren (Brunnen, Grundwassermessstellen) und dem Abstand zwischen diesen Rohren. Sickert das Wasser, nur der Schwerkraft folgend, vertikal nach unten, dann wird $I_{st} = 1,0$. Der Durchlässigkeitsbeiwert k_f kann für Vorentwürfe u. ä. Arbeiten der Literatur entnommen werden, die sich mit Bodenmechanik, Wasser oder Grundwasser beschäftigt, u. a. [88].

In der einschlägigen Literatur ist stets nur ein k_f -Wert angegeben. Das bedeutet, 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 Standicherheit 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 unausgeglichener 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 Fließgewässers, 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

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

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 hydro-metrischen Messflügel oder anderen Messverfahren.

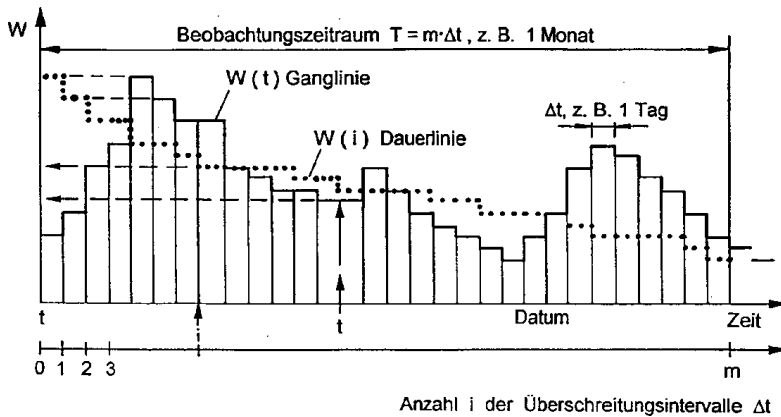


Bild 1.3 Ermittlung der Wasserstandsdauerlinie aus der Wasserstandsganglinie

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 Ableitung 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.

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 an den Lattenpegeln 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 erstellen 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 1.3 zeigt das Schema.

Aus der Ganglinie gehen der höchste und der 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. NNW kann 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 Extremwasserständen weniger beeinflusst. Mittlere Wasserstände sind hier entscheidender. Für einen Zeitraum T errechnet sich der Mittelwasserstand nach Gl. (1.4).

$$MW = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T W \cdot dt \quad (1.4)$$

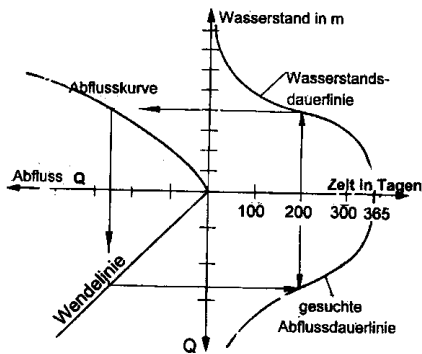


Bild 1.4 Ermittlung der Abflussdauerlinie aus Wasserstandsdauerlinie und Abflusskurve

1.3.1.2 Abflüsse

Aus der Wasserstandsganglinie $W(t)$ und der Abflusskurve $Q(W)$ kann die Abflussganglinie $Q(t)$ einfach, z. B. grafisch, bestimmt werden. Das Bild 1.4 zeigt das Prinzip der Ermittlung einer Abflussganglinie.

1.3.1.3 Geschiebe

Auf der Sohle eines Fließgewässers bewegen sich Feststoffe, sobald eine für die Bewegung ausreichende Strömungsgeschwindigkeit vorhanden ist. Reicht die Strömung zur Fortbewegung eines Kornes nicht mehr aus, dann kommt es zum Ablagern des Teilchens (Sedimentation). Änderungen der Strömungsvorgänge – naturgegeben oder vom Menschen beeinflusst – verändern auch den Geschiebetransport im Fließgewässer. Neben der Strömungsgeschwindigkeit im Gewässer bestimmen auch Dichte und Korngröße des Geschiebes, ob es sich bewegt oder absetzt und auch wie es sich bewegt. Kleine Körnungen oder auch spezifisch leichte werden schwebend transportiert, folglich als Schweb-

stoffe bezeichnet. Mineralische Geschiebekörner haben allg. eine Dichte von etwa $2,65 \text{ t/m}^3$, so dass die Grenze zwischen schwebender und auf dem Boden rollender und springender Bewegung aus Gl. (1.5) bestimmt werden kann.

$$d_{\text{gr}} = \frac{v^2}{360 \cdot g} \quad [\text{m}] \quad (1.5)$$

Ein $0,5 \text{ mm}$ großes Sandkorn würde sich folglich bei

$$v \geq \sqrt{360 \cdot 9,81 \cdot 0,0005} = 1,33 \text{ m/s}$$

als Schwebstoff bewegen, ein $0,1 \text{ mm}$ großes Korn (Feinsand) bei $v \leq 0,60 \text{ m/s}$ zur Sohle gelangen und dort als Geschiebe transportiert werden. Geschiebe im Fließgewässer kann Baggerungen notwendig machen (Schiffahrt), auch Bauabläufe beeinflussen (Dückerverlegung), Stauräume verlanden lassen oder zu Kolken und Uferabbrüchen führen. Auch Geschiebebewegungen müssen langfristig beobachtet, gemessen und ausgewertet oder berechnet werden, damit über künftig zu erwartende Situationen Aussagen getroffen werden können, vgl. auch Abschnitt 2.2.3.

Mit dem im Bild 1.5 dargestellten Diagramm können aus der Abflussdauerlinie die Dauerlinie der Geschiebeführung und die Geschiebefracht eines Jahres ermittelt werden. Wie die Geschiebefunktion (auch als Geschiebemengen-Schlüsselkurve bezeichnet) ermittelt werden kann, wird im Abschnitt 2.2.3 erläutert, hier soll sie als gegeben angenommen werden. Da der Beginn der Geschiebebewegung subjektiv durch Beobachtung festgestellt werden muss, erscheint im Bild 1.5 ein Streuungsbereich.

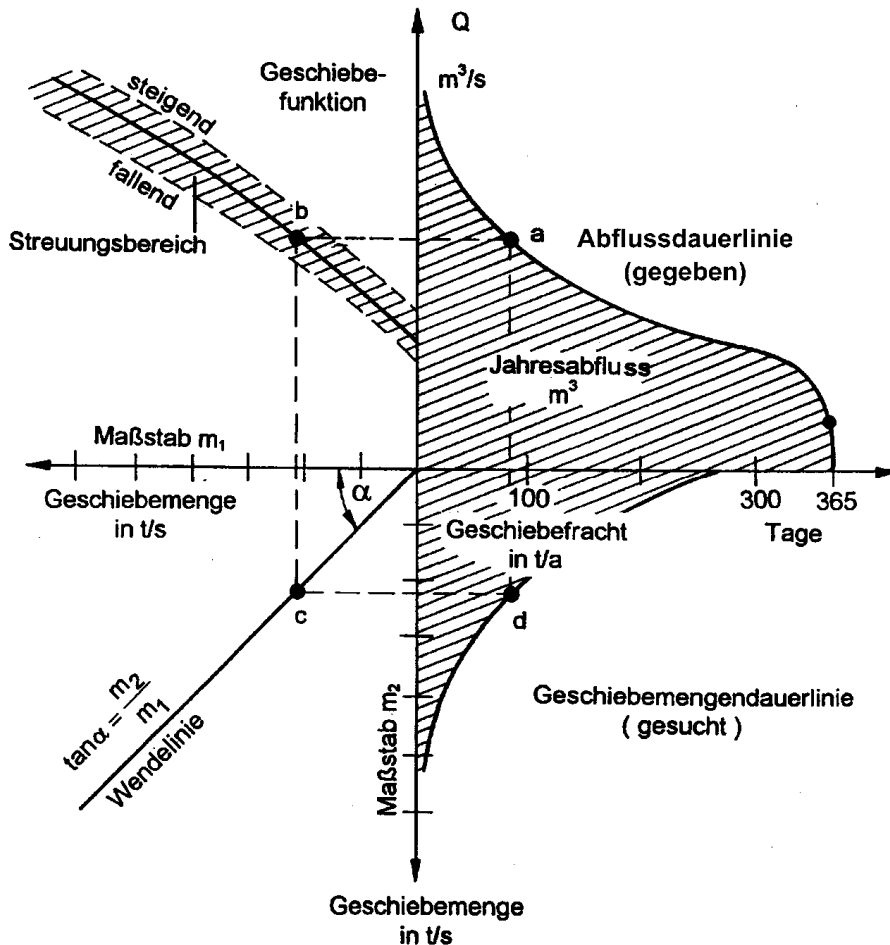


Bild 1.5 Grafische Ermittlung der Dauerlinie der Geschiebeführung und der Geschiebefracht

In einem Fließgewässerabschnitt wird nur so viel Geschiebe bewegt, wie nach der Geschiebefunktion $m_G = f(h)$ (siehe Gleichung (2.26) im Abschnitt 2.2.3 transportiert werden kann. Die Geschiebefunktion gibt also Auskunft über die Transportkapazität des Abschnittes.

Ein Fließgewässerabschnitt, der nach unterhalb genauso viel Geschiebe abgibt wie er von oberhalb erhält, steht im Geschiebegleichgewicht. Erhält er mehr Geschiebe von oben als er weitertransportieren kann, so kommt es zur sehr oft unerwünschten Ablagerung im Fließgewässerabschnitt (die Schifffahrt behindernde Untiefen, Sohlbänke). Im umgekehrten Fall entnimmt die Strömung im Fließgewässerabschnitt Geschiebe

(Erosion), um ein Defizit auszugleichen. Die Fließgewässersohle vertieft sich. Gelingt dieser Ausgleich z. B. über Sohlen, deren Körnungen aus grobem Material wie Grobkies oder Steinen bestehen, nicht, spricht man von latenter Erosion, vgl. auch Abschnitt 2.2.3.

1.3.2 Daten für Standgewässer

1.3.2.1 Wasserstände

Als Standgewässer werden in diesem Abschnitt natürliche Binnenseen, Stauseen hinter großen Wehren und Talsperren, die Oberbecken von Pumpspeicherwerken sowie geflutete Tagebaurestlöcher bezeichnet. Schwankende Wasserstände in Standgewässern haben hauptsächlich zwei Ursachen:

- Unterschiede zwischen Zu- und Abflüssen, vor allem oberhalb von Wehren und Talsperren, oder durch den Betrieb der Pumpspeicherwerke hervorgerufen (vgl. Abschnitt 5.5.3),
- Wind, Sturm bzw. Orkan, die besonders bei großer Stärke und/oder großer Dauer Wassermassen in Windrichtung drücken und den Wasserspiegel im Standgewässer neigen.

Für die Binnengewässer ist der Windstau im Zusammenhang mit dem betriebsbedingten Füllungsgrad – im Bemessungsfall natürlich der größtmögliche Füllungsgrad – zu sehen. Mit jedem Wind sind auch Wellen verbunden, die im Abschnitt 1.3.2.2 betrachtet werden.

Die Ausgangsdaten für Windstau und Wellenberechnungen liefern dem Wasserbauer die Meteorologen mit möglichst langjährigen Messungen der Windverhältnisse an nahe gelegenen Stationen. Der Wind wird verteilt nach den Häufigkeiten seiner Richtung und der Geschwindigkeit ermittelt und den Berechnungen zugrunde gelegt. Dabei können sich daraus Schwierigkeiten ergeben, dass die nächstgelegene Messstation so weit entfernt ist, dass Topografie, Bebauung und Bewuchs die Messwerte stark beeinflussen.

1.3.2.2 Wellen

Wellen sind Schwingungsformen der Wassermassen, die durch Wind hervorgerufen werden. Der Wind überträgt durch Schubspannungen Energie in die Wassermasse, das Wasser kommt in Bewegung, an der Oberfläche sind die Wellen die sichtbare Form der Wasserbewegung. Auf Binnengewässern sind meist nur kleine Streichlängen, also Abmessungen des Gewässers in Windrichtung, vorhanden und oft auch Einflüsse von den Ufern her, besonders in Gebirgstälern. Die sehr unterschiedlichen topografischen und meteorologischen Bedingungen, die an den einzelnen Standorten vorhanden sind, machen es schwierig, eine allgemeingül-

tige Prognosemethode für künftig zu erwartende Wellen zu entwickeln. Auch der Vergleich mit ähnlichen Standgewässern kann nur sehr bedingt gültige Aussagen liefern. Um Wasserbauern trotzdem Anhaltspunkte über zu erwartende Belastungen der Bauwerke am oder im Standgewässer zu liefern, wurden zahlreiche Berechnungsverfahren entwickelt, teils aus Naturmessungen, teils auf theoretischen Ansätzen beruhend. Bei allen Berechnungen zu erwartender Wellenbelastungen muss mit Unsicherheiten gerechnet werden.

Wichtigste Größe für die Ermittlung von Belastungen auf Wasserbauwerke am oder im Standgewässer ist die Wellenhöhe. Die Fachliteratur unterscheidet verschiedene Wellenhöhen. Besonders wichtig sind:

- die mittlere Wellenhöhe H_m , der Mittelwert aus einem Spektrum (Kollektiv) gemessener Wellen,
- die signifikante Wellenhöhe H_S , der Mittelwert aus dem Drittel der höchsten Wellen,
- die maximale Wellenhöhe H_{max} , die größte zu erwartende Wellenhöhe,
- die n -%-Wellenhöhe, die mit der Wahrscheinlichkeit von n % zu erwartende bzw. gemessene Wellenhöhe, z. B. würde die Höhe der $H_{1\%}$ -Welle von einer von hundert gemessenen Wellen überschritten,
- die Bemessungswellenhöhe H_{Bem} , eine festzulegende Wellenhöhe, die je nach Bedeutung des Bauwerkes auch überschritten werden kann (z. B. die 1%-Welle).

Zur Ermittlung dieser Wellenhöhen sind zahlreiche Verfahren bekannt, die den in den verschiedenen Ländern gültigen Normen zugrunde liegen.

Die Wellenberechnung nach Bretschneider, Gl. (1.6), zur Bestimmung der signifikanten Wellenhöhe hat sich bewährt, wird heute auch verwendet und wurde in Details erweitert und vervollkommen.

$$\begin{aligned}
 H_S' &= 0,283 \cdot \tanh\left(0,53 \cdot h'^{0,75}\right) \\
 &\quad \cdot \tanh \frac{0,0125 \cdot L_S'^{0,42}}{\tanh 0,53 \cdot h'^{0,75}} \\
 H_S' &= \frac{g \cdot H_S}{(v_{w,10})^2}; L_S' = \frac{g \cdot L_S}{(v_{w,10})^2}; \\
 h' &= \frac{g \cdot h}{(v_{w,10})^2}
 \end{aligned}
 \quad [\text{m}] \quad (1.6)$$

Zur signifikanten Wellenhöhe gehört eine signifikante Wellenperiode T , die nach der Gl. (1.7) bestimmt werden kann.

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{7,536 \cdot v_{w,10}}{g} \cdot \tanh\left(0,833 \cdot h'^{0,375}\right) \\
 &\quad \cdot \tanh \frac{0,077 \cdot L_S'^{0,25}}{\tanh\left(0,833 \cdot h'^{0,375}\right)}
 \end{aligned}
 \quad [\text{s}] (1.7)$$

Mit bekannten Ausgangswerten für die Streichlänge L_S , die Wassertiefe h , für die ein mittlerer Wert eingesetzt werden muss, können für verschiedene Windgeschwindigkeiten v_W verschiedene Wellenhöhen H_m nach Bild 1.6 ermittelt werden. Ist auch die Dauer t des Windes bekannt, kann sie ebenfalls als Ausgangswert verwendet werden. Der weiter links liegende (also der kleinere!) Wert ist auf der Abszisse zu verwenden. Auch die Wellenperiode T kann bestimmt werden.

Eine anschauliche Möglichkeit zur Bestimmung der mittleren Wellenhöhe $H_m = \bar{H}$ – ist das Verfahren „Krylov II“, Bild 1.6. Diese mittlere Wellenhöhe wird mit einem Faktor k_i multipliziert, der die Auftretenswahrscheinlichkeit berücksichtigt und nach Tabelle 1.3 bestimmt werden kann. Die Höhe der 1%-Welle würde also das 2,52-Fache der mittleren Wellenhöhe betragen.

Tabelle 1.4 Faktoren k_i

Auftretenswahrscheinlichkeit in %	Multiplikationsfaktor k_i
0,1	3,00
1	2,52
5	1,91
10	1,69
20	1,38
30	1,21
50	0,93
70	0,69
90	0,37

Beispiel: Wellenbestimmung

Ein im Mittel 40 m tiefes Tagebaurestloch wurde zu einem See mit Ufern ohne große Buchten oder Landzungen geflutet. Aus NW weht folgender Bemessungswind: $v_W = 22 \text{ m/s}$, $t = 2,5 \text{ h}$. Am südöstlichen Ufer soll ein Hafen für Sportboote gebaut werden. Von NW nach SO hat der Wind eine Streichlänge von 5,1 km.

- Welche signifikante Wellenhöhe tritt auf, welche Wellenperiode gehört dazu?
- Einige Segelbootbesitzer wünschen mindestens gegen die 1%-Welle geschützt zu werden. Wie groß ist diese Welle?

Lösungen

- a) Nach Gl. (1.6) wird:

$$\begin{aligned}
 H_S &= \frac{484}{9,81} \cdot 0,283 \cdot \tanh \left[0,53 \cdot \left(\frac{9,81 \cdot 40}{484} \right)^{0,75} \right] \\
 &\quad \cdot \tanh \frac{0,0125 \cdot \left(\frac{9,81 \cdot 5100}{484} \right)^{0,42}}{\tanh \left[0,53 \cdot \left(\frac{9,81 \cdot 40}{484} \right)^{0,75} \right]} \\
 &= 13,96 \cdot \tanh 0,453 \cdot \tanh \frac{0,0877}{\tanh 0,453} \\
 &= 13,96 \cdot 0,42 \cdot 0,21 = 1,23 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T &= 16,9 \cdot \tanh \left[0,833 \cdot \left(\frac{9,81 \cdot 40}{484} \right)^{0,375} \right] \\
 &\quad \cdot \tanh \frac{0,077 \cdot \left(\frac{9,81 \cdot 5100}{484} \right)^{0,25}}{\tanh \left[0,833 \cdot \left(\frac{9,81 \cdot 40}{484} \right)^{0,375} \right]} \\
 &= 16,9 \cdot \tanh 0,77 \cdot \tanh \frac{0,2455}{\tanh 0,77} \\
 &= 16,9 \cdot 0,65 \cdot 0,36 = 3,95 \text{ s}
 \end{aligned}$$

b) Für Bild (1.6) wird benötigt:

$$\begin{aligned}
 \frac{g \cdot L_S}{v_W^2} &= \frac{9,81 \cdot 5100}{484} = 103 \\
 \frac{g \cdot h}{v_W^2} &= \frac{9,81 \cdot 40}{484} = 0,81 \\
 \frac{g \cdot t}{v_W} &= \frac{9,81 \cdot 2,5 \cdot 3600}{22} = 4013
 \end{aligned}$$

Maßgebend ist der Wert 103, siehe gestrichelte Linie im Bild 1.6.

Das im Bild 1.6 eingetragene Beispiel ergibt für eine Wassertiefe von $h_m = 40$ m, Streichlänge $L_S = 5,1$ km, Dauer des Windes $> 2,5$ Stunden bei einer Windgeschwindigkeit 10 m über der Wasseroberfläche $v_{W,10} = 22$ m/s die Zwischenwerte

$$0,0185 = \frac{9,81 \cdot H_m}{484} \rightarrow H_m = 0,91 \text{ m}$$

$$H_1 \% = 2,52 \cdot 0,91 = 2,30 \text{ m}$$

Mit Gl. (1.7) wird die zugehörige Wellenperiode errechnet.

$$\begin{aligned}
 T &= 16,9 \cdot \tanh \left[0,833 \cdot \left(\frac{9,81 \cdot 40}{484} \right)^{0,375} \right] \\
 &\quad \cdot \tanh \frac{0,077 \cdot \left(\frac{9,81 \cdot 5100}{484} \right)^{0,25}}{\tanh \left[0,833 \cdot \left(\frac{9,81 \cdot 40}{484} \right)^{0,375} \right]} \\
 &= 16,9 \cdot \tanh 0,77 \cdot \tanh \frac{0,2455}{\tanh 0,77} \\
 &= 16,9 \cdot 0,65 \cdot 0,36 = 3,95 \text{ s}
 \end{aligned}$$

b) Für Bild (1.6) wird benötigt:

$$\begin{aligned}
 \frac{g \cdot L_S}{v_W^2} &= \frac{9,81 \cdot 5100}{484} = 103 \\
 \frac{g \cdot h}{v_W^2} &= \frac{9,81 \cdot 40}{484} = 0,81 \\
 \frac{g \cdot t}{v_W} &= \frac{9,81 \cdot 2,5 \cdot 3600}{22} = 4013
 \end{aligned}$$

Maßgebend ist der Wert 103, siehe gestrichelte Linie im Bild 1.6.

Das im Bild 1.6 eingetragene Beispiel ergibt für eine Wassertiefe von $h_m = 40$ m, Streichlänge $L_S = 5,1$ km, Dauer des Windes $> 2,5$ Stunden bei einer Windgeschwindigkeit 10 m über der Wasseroberfläche $v_{W,10} = 22$ m/s die Zwischenwerte

$$0,0185 = \frac{9,81 \cdot H_m}{484} \rightarrow H_m = 0,91 \text{ m}$$

$$H_1 \% = 2,52 \cdot 0,91 = 2,30$$

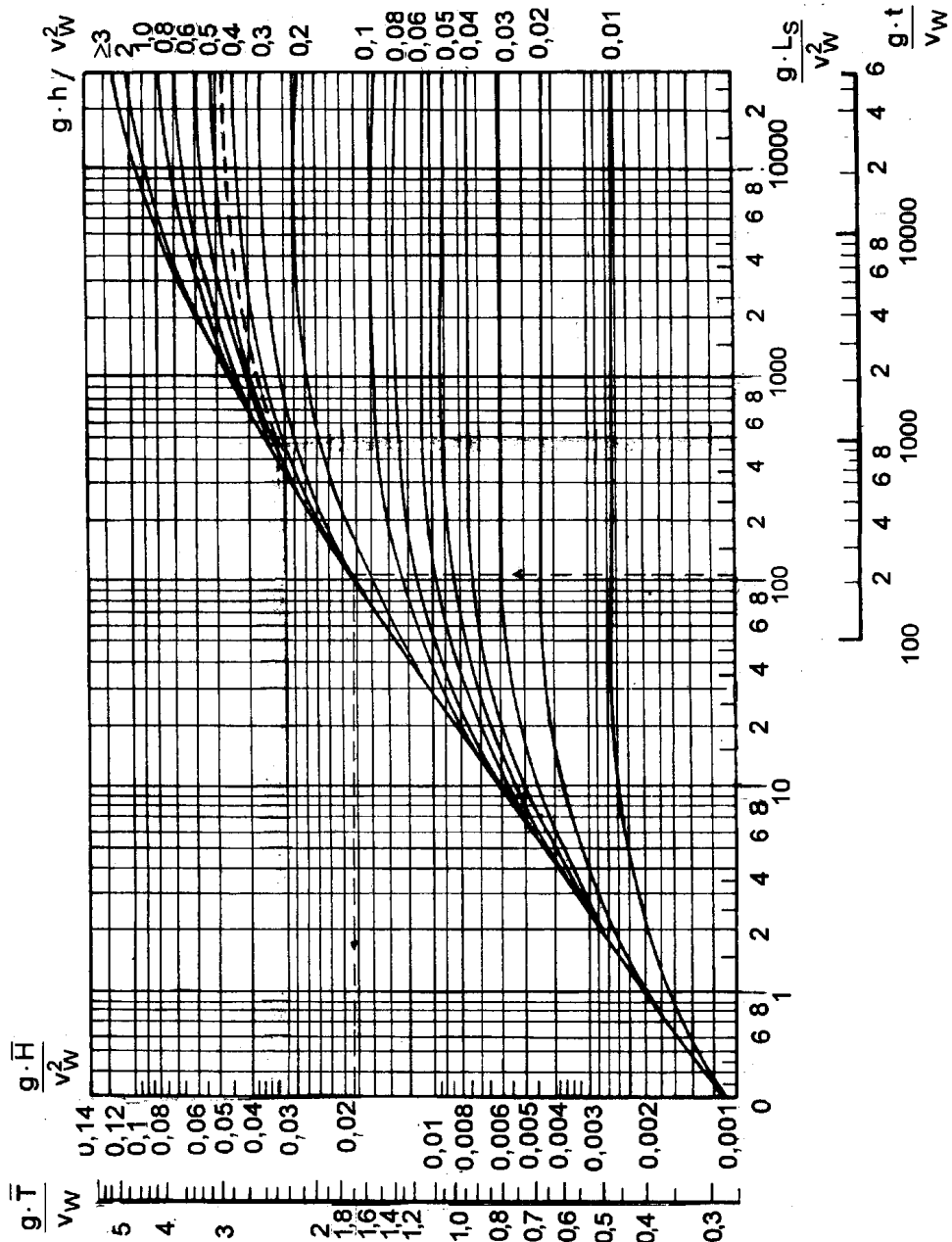


Bild 1.6 Diagramm zur Bestimmung der mittleren Wellenhöhe nach Krylov

1.3.2.3 Windstau

Ein länger anhaltender Wind aus gleicher Richtung mit annähernd gleichbleibender Geschwindigkeit erzeugt eine Wasserspiegelanhebung Δh_W an der dem Wind abge-

wandten Seite. Ihre Größe kann nach der Gleichung (1.9) bestimmt werden.

$$\Delta h_W = \frac{v_W^2 \cdot L_s}{4861 \cdot h_m} \cdot \cos \alpha \quad [\text{m}] \quad (1.8)$$

α Winkel zwischen Windrichtung und Richtung der Böschungsfälllinie, meist ist $\cos \alpha = 1$

L_S Streichlänge in [km]

Während an den Küsten der Windstau oft Ursache von Hochwasserereignissen ist, ergeben sich im Binnenland nur kleine Werte für Δh_W .

1.3.3 Eis

1.3.3.1 Entstehung und Eigenschaften des Eises

Eis bildet sich durch Wärmeabgabe des Wassers bei einer Temperatur von 0°C . Die Wärmeabgabe erfolgt an die kältere Außenluft. Das Bild 1.7 zeigt die Änderung der Dichte bei der Eisbildung und im Temperaturbereich bis -40°C .

Eis bildet sich im Fließgewässer erst, wenn sich die gesamte Wassermasse auf null Grad abgekühlt hat. Die durch die turbulente Strömung erfolgende Mischung zögert die Eisbildung hinaus. Durch die stärkere Unterkühlung des Ufers und wegen der geringeren Fließgeschwindigkeit in Ufernähe bildet sich zuerst das **Randeis** aus. Bei länger anhaltendem Frost kann vom Rand zur Mitte hin eine geschlossene Eisdecke entstehen.

Grundeis wird gebildet, wenn im Wasser schwebende Eisteilchen sich an der rauen Gewässersohle festsetzen und durch Anfriren weiterer Eiskerne sich zu einer Eisschicht vereinigen. Auftrieb und Strömungsdruck reißen dieses Grundeis von der Sohle los und bringen es zum Aufschwimmen. Festgefrorene Schlamm- und Geschiebeteilchen kennzeichnen das Grundeis. Für manche Bauwerke (Rechen) kann der **Eisschlamm (Eisbrei)** besonders gefährlich werden. Er bildet sich durch die Vereinigung von im Wasser schwebenden Eiskristallen mit Schwebstoffen des Wassers. Aufschwimmendes Grundeis und von der Strömung abgerissenes Randeis bilden das **Treibeis**. Ist das Treibeis im fließenden Gewässer von Ufer zu Ufer zum Stehen gekommen und zusammengefroren, spricht man vom **Eisstand**. Zuerst kommt es im Oberwasser von Stauhaltungen, dann oberhalb von scharfen Krümmungen und von Einbauten im Fluss zum Eisstand.

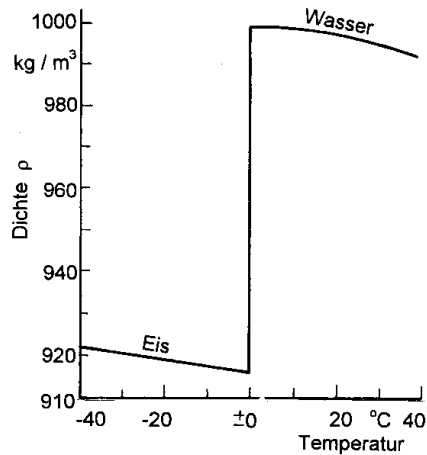


Bild 1.7 Dichte von Eis und Wasser

Schiebt sich das weiterhin hinzuschwimmende Eis unter und auf das ruhende, dann entsteht der **Eisstoß**. Den Höhepunkt dieser Vorgänge bilden schließlich **Eisversetzungen**. Mit einsetzendem Tauwetter beginnt der **Eisgang**. Er kann von der Mündung auf flussaufwärts durch ein künstliches Aufbrechen der Eisdecke gefördert werden. Eisversetzungen können zu Hochwasserständen und Überschwemmungen führen, obwohl der Abfluss geringer ist als bei einem Hochwasser ohne Eis.

Fließgewässer in Mitteleuropa weisen nur in besonders kalten Wintern eine geschlossene Eisdecke auf. Unter dieser Eisdecke kommt es fast immer noch zu einem geringen Abfluss. Salze und andere Inhaltsstoffe des Wassers verändern die Eisbildung. So gefriert z. B. das Meerwasser mit einem Salzgehalt von 3,5 % erst bei $-1,8^\circ\text{C}$.

Für zahlreiche Flüsse Europas sagt eine Eisstatistik aus dem 20. Jahrhundert wenig aus, weil die starken Verschmutzungen die Eisbildungen erheblich hinausgezögert haben. Die in den letzten Jahren durchgeführten umfangreichen Maßnahmen zur Wiederbelebung und Reinhaltung der Flüsse führen zu künftig verstärkter Eisbildung. Hinzu kommt eine von Klimaexperten vorausgesagte Vergrößerung der Extremwerte, also auch der kalten Winter. Diese sollen zwar seltener, aber mit größeren Frösten auftreten. Der Belastung von Bauwerken und Ufern durch Eis muss

deshalb trotz Erderwärmung auch künftig große Aufmerksamkeit geschenkt werden.

1.3.3.2 Belastung von Ufern und Bauwerken durch Eis

Die Kräfte, denen Bauwerke aus einer Eisbelastung ausgesetzt sind, werden vor allem durch die Dicke h_E der Eisdecke und die Eisdruckfestigkeit σ_0 bestimmt. Die Vorausbestimmung einer möglichen Eisdeckenstärke ist schwierig und nur überschläglich möglich, aber auch eine Frage der Eintrittswahrscheinlichkeit. Für Talsperren des Osterzgebirges werden in [56] Werte von 50 cm genannt, wenn ein Wiederkehrintervall von 50 Jahren zugrunde gelegt wird. In Russland errechnet man die Dicke der Eisdecke nach den Gleichungen (1.8) und (1.9) für stehende Gewässer.

$$h_E = 2,0 \cdot \sqrt{\sum T} \quad [\text{cm}] \quad (1.9)$$

Bzw. für fließende Gewässer

$$h_E = 3,68 \cdot \sqrt{\sum T} \quad [\text{cm}] \quad (1.10)$$

Darin ist $\sum T$ die Summe der durchschnittlichen Tagestemperaturen unter 0°C vom Tag der Eisbildung an, wie auch Bild 1.8 zeigt.

Zählt man die negativen Tagestemperaturen auf Bild 1.8 zwischen dem 15.1. (Beginn der Eisbildung) und dem 15.2. (Beginn des Tauwetters) zusammen, erhält man 248 K. Aus Gl. (1.8) würde sich eine Eisdicke von $h_E = 31,5 \text{ cm}$ für ein Fließgewässer ergeben.

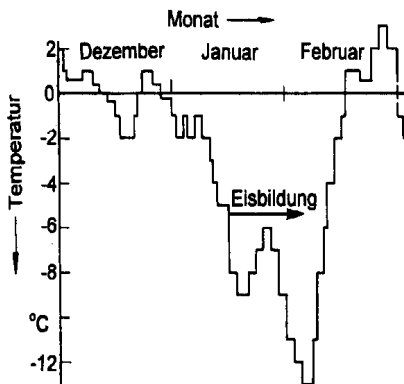


Bild 1.8 Durchschnittliche Tagestemperaturen im Winter an einer Messstelle

Strömungsgeschwindigkeit und örtliche Besonderheiten des Fließgewässers können mit Gl. (1.8) nicht berücksichtigt werden. Statistische Auswertungen gemessener Eisdicken können aussagekräftigere Werte ergeben, wenn sie nicht durch Kühlwasser oder Wasserverschmutzungen (Salze) beeinflusst sind.

Die Eisdruckfestigkeit σ_0 wird z. B. in [18] angegeben mit:

$\sigma_0 = 1,50 \text{ MN/m}^2$ für den norddeutschen Küstenraum,

$\sigma_0 = 1,80 \text{ MN/m}^2$ für die Ostsee,

$\sigma_0 = 2,50 \text{ MN/m}^2$ für Binnengewässer (Süßwassereis).

Die Biegezugfestigkeiten können mit $\frac{1}{3} \cdot \sigma_0$,

Scherfestigkeiten mit $\frac{1}{6} \cdot \sigma_0$ angesetzt werden.

Für die Zugfestigkeit steht in [18]:

Zugrichtung senkrecht zur Eisoberfläche: $1,5 \text{ MN/m}^2$ für Süßwassereis und $0,8$ bis $1,0 \text{ MN/m}^2$ für Meerwassereis.

Zugrichtung parallel zur Eisoberfläche:

$0,8 \text{ MN/m}^2$ für Süßwassereis und $0,3$ bis $0,5 \text{ MN/m}^2$ für Meerwassereis.

Belastet werden Ufer und Bauwerke vor allem durch Druckkräfte und Biegemomente. Statischer, dynamischer und thermischer Eisdruck sowie eine angefrorene Eisdecke, verbunden mit Wasserspiegelschwankungen, sind die Ursachen für Kräfte und Momente.

Die statische Eisdruckkraft entsteht durch unter der Eisdecke strömendes Wasser und aus der Kraftwirkung des Windes. Die statische Eisdruckkraft F_{stat} kann bei Stauseen oder zugefrorenen Flüssen maßgebend sein. Ihre Größe kann durch folgende empirische Gleichungen errechnet werden:

$$F_{\text{stat}} = A_{\text{Eis}} \cdot \left[\begin{array}{l} (F_1 + F_2 + F_3) \cdot \sin \rho' \\ + F_4 \cdot \sin \beta_W \end{array} \right] \quad [\text{kN}] \quad (1.13)$$

$$F_1 = 5 \cdot 10^{-3} \cdot v \quad [\text{kN/m}^2] \quad (1.14)$$

$$F_2 = \frac{50 \cdot h_E \cdot v^2}{100 \cdot L_E} \quad [\text{kN/m}^2] \quad (1.11)$$

$$F_3 = 0,92 \cdot h_E \cdot I \quad [\text{kN/m}^2] \quad (1.11a)$$

$$F_4 = 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot v_W \quad [\text{kN/m}^2] \quad (1.12)$$

Beispiel: Statische Eisdruckkraft an einem Wehr

Oberhalb einer Staustufe hat sich eine $h_E = 0,5$ m dicke, 200 m breite und $L_E = 2$ km lange geschlossene Eisdecke gebildet. Unter dieser Eisdecke fließt das Wasser mit $v = 1,2$ m/s dem Wehr zu und in Fließrichtung weht der Wind mit $v_W = 10$ m/s. Im Staubereich beträgt das Fließgefälle $I = 0,012$ %. Welcher statische Eisdruck wirkt auf das sowohl vom Wind mit $\beta_W = 90^\circ$ als auch vom Wasser ($\rho = 90^\circ$) senkrecht angeströmte Wehr?

Lösung

$$F_1 = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ kN/m}^2$$

$$F_2 = \frac{50 \cdot 0,5 \cdot 1,44}{100 \cdot 2000} = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ kN/m}^2$$

$$F_3 = 0,92 \cdot 0,5 \cdot 0,12 \cdot 10^{-3} = 0,55 \cdot 10^{-4} \text{ kN/m}^2$$

$$F_4 = 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot 10 = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ kN/m}^2$$

$$F_{\text{stat}} = 200 \cdot 2000 \cdot \left[(60 + 1,8 + 0,55) \cdot 10^{-4} + 1,5 \cdot 10^{-4} \right]$$

$$= 2554 \text{ kN (12,77 kN/m)}$$

Die dynamische Eisdruckkraft entsteht, wenn Eisschollen auf Pfeiler, Wände oder Böschungen auftreffen. Für vertikale Pfähle ergibt sich unabhängig von der Querschnittsform des Pfahles die empirische Gleichung aus [18]

$$F_{\text{dyn}} = 0,36 \cdot \sigma_0 \cdot d^{0,5} \cdot h_E^{1,1} \quad [\text{kN}] \quad (1.16)$$

in die die Pfahldicke d und die Eisdicke h_E in cm, σ_0 in MN/m^2 einzusetzen sind. Für Pfahlgruppen kann die Summe der Lasten auf

Einzelpfähle der der Strömung zugekehrten Pfahlreihe gebildet werden.

Bei geneigten Pfählen (ab 6 : 1) kann Scherbruch oder Biegebruch eintreten, bevor das Eis zerdrückt würde. Folglich wäre dann die jeweils kleinere Last für die Bemessung maßgebend.

Auf Böschungen schiebt sich das Eis auf und geht durch Überschreiten der Biegezugfestigkeit zu Bruch. Diese ist geringer als die Druckfestigkeit. Nach [18] sollen 100 kN/m in ungünstiger Höhenlage waagrecht wirkend angesetzt werden.

Der thermische Eisdruck entsteht beim Ausdehnen des Eises durch Temperaturänderung. Große Eisflächen reißen dann auf, in die Spalten dringt Wasser, das schnell gefriert. Besonders die durch steile (senkrechte) und starre Bauwerke begrenzten Wasserflächen mit geschlossenen Eisdecken entwickeln dabei Belastungen auf die Ufer, die oft zu sichtbaren Verformungen führen. Diese Belastungen gehen langsam vor sich. Durch das zeit- und temperaturabhängige Spannungs-Verformungs-Verhalten des Eises wird die Grenze der Druckfestigkeit nicht erreicht, bevor es zu Verformungen kommt.

Auch beim thermischen Eisdruck bestimmen die Eiseigenschaften die Größe wirkender Belastungen. Das führte je nach Versuchsbedingungen zu sehr unterschiedlichen Gleichungen und Grenzwerten für den thermischen Eisdruck. Für seine Größe sind vor allem die Dicke des Eises h_E , die Ausgangstemperatur und die Geschwindigkeit, mit der sich das Eis erwärmt, maßgebend. Eine Berechnung der vom Eis bei Erwärmung erzeugten Linienlast ist nach Gl. (1.15) möglich.

$$F_{\text{therm}} = 9 \cdot h_E \cdot (T_0 + 1) \cdot \sqrt[3]{\frac{T_0}{t_E} \cdot (T_0 + 1)^2} \quad [\text{kN/m}] \quad (1.17)$$

T_0 gemittelte Anfangstemperatur des Eises (Absolutbetrag)

t_E Zeit in Stunden, in der sich das Eis erwärmt

Abweichungen in den Ergebnissen zwischen Formel und Diagramm erklären sich aus

unterschiedlichen Bedingungen, aus denen beide hervorgegangen sind.

Angefrorene Eisdecken belasten Ufer, sobald der Wasserstand sich ändert. Solche Wasserstandsschwankungen können gewollt sein (zur Eiszerstörung in Fluss-Stauhaltungen oder bei Speicherbecken) oder durch steigende Wasserstände entstehen. Aus der angefrorenen Eisdecke werden dabei Kräfte und auch Momente auf das Ufer übertragen, die zu Standsicherheitsproblemen und Zerstörungen führen können. Ihre Größe wird vor allem von Eisdicke und Geschwindigkeit der Wasserspiegeländerung bestimmt.

Aus eigenen [56] und weiteren Untersuchungen kann festgehalten werden:

- Die auf das Bauwerk übertragenen Kräfte sind in ihrem Absolutbetrag beim Heben und Senken des Wasserspiegels gleich groß.
- Die Momente unterscheiden sich beim Heben und Senken, weil das Verhalten des Eises über den Querschnitt gesehen temperaturabhängig ist.
- Für praktisch vorkommende Fälle ist für die Belastung eines Ufers oder Bauwerkes das Grenzmoment maßgebend, das aus den zulässigen Zug- und Druckspannungen des Eises unter Beachtung der zeitabhängigen Eiseigenschaften berechnet werden kann.

Da die Belastung aus einer angefrorenen Eisdecke recht groß werden kann, soll ein Beispiel die Ermittlung ausführlicher erläutern. Es muss auch hier betont werden, dass die Ergebnisse auch von Eiseigenschaften, Temperaturverlauf u. a. abhängig sind, stark variieren können.

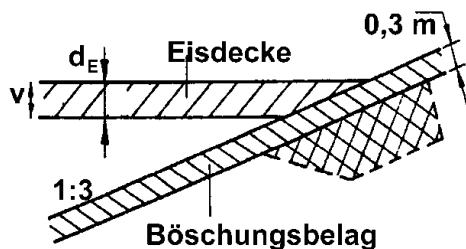


Bild 1.9 Böschungsbelag mit angefrorener Eisdecke

Beispiel: Eisbelastung eines Deckwerkes bei Wasserspiegelschwankung

In einem großen Wasserbecken, z. B. im Oberbecken eines Pumpspeicherwerkes (Abschnitt 5.5.3), hat sich eine geschlossene Eisdecke mit einer Dicke von $h_E = 0,35$ m gebildet. Sie haftet fest am Belag aus Bitumenbeton, der in erster Linie dichtende Funktion hat. Das Bild 1.10 zeigt einen Schnitt durch den Belag mit der angefrorenen Eisdecke. Gesucht ist die Belastung, die die Eisdecke beim Heben und Senken des Wasserspiegels und damit der Eisdecke auf den Belag ausübt. Die Temperatur des Eises soll $t_E = -2$ °C betragen. Wasserspiegelbewegungen sind mit einer Vertikalgeschwindigkeit $v_v = 0,4$ m/h in beiden Richtungen über insgesamt $t_d = 2$ Stunden möglich.

Lösungen

Friert die Eisdecke am Böschungsbelag an (Bild 1.10), dann entsteht ein fester Verbund zwischen Belag und Eisdecke. Dabei ist die Haftspannung größer als die Biegezugfestigkeit des Eises. Beim Heben oder Senken des Wasserspiegels belasten Gewichts- bzw. Auftriebskräfte sowie ein Einspannmoment den Belag. Diese Belastungen erreichen ein Maximum, unmittelbar bevor der erste Riss in der Eisdecke am Ufer entsteht. Für die Belastung eines Böschungsbelages ist besonders das Einspannmoment von Bedeutung. Vor allem sind Deckwerke, die aus nicht miteinander verbundenen Platten bestehen, in ihrer Standsicherheit gefährdet.

Nach [56] kann mit folgenden Kräften und Momenten auf das Eis beim Heben und Senken gerechnet werden

$$F = 200 \cdot v \cdot t_d \cdot \sqrt[4]{\frac{h_E^3}{\phi}} \quad [\text{kN/m}] \quad (1.18)$$

$$M = 2 \cdot v \cdot t_d \cdot \sqrt[4]{\frac{h_E^3}{\phi}} \quad [\text{MNm/m}] \quad (1.19)$$

v Geschwindigkeit des Hebens oder Senkens des Wasserspiegels in m/h

t_d Zeit, in der sich die Eisdecke beim Heben bzw. Senken verformt, in h

$$\phi = 1 + \frac{300}{\mu} \cdot \left[t_d + 50 \cdot \left(1 - e^{-0,4 \cdot t_d} \right) \right] \quad (1.20)$$

$$\mu = \left(3,3 - 0,28 \cdot t_E + 0,083 \cdot t_E^2 \right) \cdot 10^4 \quad (1.21)$$

Mit $t_E = -2^\circ\text{C}$ ergibt sich:

$$\mu = (3,3 - 0,28 \cdot 2 + 0,083 \cdot 4) \cdot 10^4 = 3,07 \cdot 10^4$$

$$\phi = 1 + \frac{300}{3,07 \cdot 10^4} \cdot \left[2 + 50 \cdot \left(1 - e^{-0,4 \cdot 2} \right) \right] = 1,29$$

$$F = 200 \cdot 0,4 \cdot 2 \cdot \sqrt[4]{\frac{0,35^3}{1,29}} = 68,3 \text{ kN/m}$$

$$M = 2 \cdot 0,4 \cdot 2 \cdot \sqrt[4]{\frac{0,35^3}{1,29}} = 0,292 \text{ MNm/m} = 292 \text{ kNm/m}$$

Das Moment kann aber nie größer als ein Grenzmoment M_o werden, das aus den Grenzfestigkeiten des Eises bei Zug (σ_Z) und Druck (σ_0) nach Gl. (1.21) gebildet wird:

$$M_o = \frac{h_E^2 \cdot \sigma_Z' \cdot \sigma_0' \cdot (1 + 2 \cdot k_E)}{6 \cdot (\sigma_Z' + \sigma_0')} \quad [\text{MNm/m}] \quad (1.22)$$

Diese Grenzfestigkeiten berücksichtigen das Relaxationsverhalten des Eises

$$\sigma_Z' = \sigma_Z \cdot e^{-\frac{400 \cdot \tau^*}{\mu}} \quad [\text{MN/m}^2] \quad (1.23)$$

$$\sigma_0' = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{400 \cdot \tau^*}{\mu}} \quad [\text{MN/m}^2] \quad (1.24)$$

In diesen Gleichungen bedeuten:

τ^* die Zeit, in der sich der Wasserspiegel um die Dicke des Eises h_E ändert in h

μ Beiwert nach Gl. (1.31) zu bestimmen

σ_0, σ_Z mittlere Werte für die Eisfestigkeit bei Zug bzw. Druck in MN/m^2 , zu bestimmen aus Versuchen, nach Tabelle 1.4 oder nach [18]

Tabelle 1.5 Eisfestigkeiten auf Zug und Druck

t_E in $^\circ\text{C}$	σ_Z in MN/m^2	σ_0 in MN/m^2
oberer Teil der Eisdecke		
0 bis -2	0,7	1,8
-3 bis -10	0,8	2,5
-11 bis -20	1,0	2,8
unterer Teil der Eisdecke		
0 bis -2	0,5	1,2

Tabelle 1.5 k_E -Werte für Gl. (1.21)

$\frac{400 \cdot \tau^*}{\mu}$			
$e^{-\frac{400 \cdot \tau^*}{\mu}}$	$\leq 0,8$	0,85	$\geq 0,9$
k_E	1,0	1,5	2,0

Zwischenwerte geradlinig interpolieren.

Im Beispiel ist

$$\tau^* = \frac{0,35}{0,4} = 0,875 \text{ Stunden}$$

Mit $\sigma_0 = 1,8 \text{ MN/m}^2$ und $\sigma_Z = 0,7 \text{ MN/m}^2$ werden

$$\sigma_0' = 1,8 \cdot e^{-\frac{400 \cdot 0,875}{30700}} = 1,78 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma_Z' = 0,7 \cdot e^{-\frac{400 \cdot 0,875}{30700}} = 0,69 \text{ MN/m}^2$$

Bei dieser noch als recht schnell anzusehenden Wasserspiegeländerung kommt das Relaxationsverhalten des Eises nicht zum Ausdruck, folglich kann in Gl. (1.21) auch die Eisfestigkeit nach [18] direkt eingesetzt werden:

$$M_o = \frac{0,35^2 \cdot 0,69 \cdot 1,78 \cdot (1 + 2 \cdot 2)}{6 \cdot (0,69 + 1,78)} = 0,051 \text{ MNm/m bzw. } 51 \text{ kNm/m}$$

$$M_o = \frac{0,35^2 \cdot 0,70 \cdot 1,80 \cdot (1 + 2 \cdot 2)}{6 \cdot (0,70 + 1,80)} = 0,051 \text{ MNm/m bzw. } 51 \text{ kNm/m}$$

Beide Werte sind in diesem Fall gleich, vor allem aber kleiner als 292 kNm/m nach Gl. (1.29), also als Belastung maßgebend.

Ausführliche Untersuchungen zum Eis können bei Carstensen (5) nachgelesen werden.

1.4 Zusammenfassung

Wasserbauten können nur errichtet werden, nachdem umfangreiche Ausgangsdaten ausgewertet worden sind. Am fertigen Bauwerk werden, solange es besteht, weitere Daten erfasst, ständig ausgewertet und oft als Grundlage von Veränderungen am Bauwerk verwendet. Im ersten Abschnitt wurden Daten vorgestellt, die die Natur vorgibt. Jedes Wasserbauwerk beeinflusst die Werte eines Gewässers. Dabei müssen künftig auch die positiven Werte für die Umwelt mehr hervorgehoben, mindestens aber erwähnt werden.

Der Wasserkreislauf bestimmt zahlreiche Prozesse auf der Erde. Niederschlag, Verdunstung und Versickerung sind örtlich sehr unterschiedlich.

Eine besonders wichtige Aufgabe fast aller Wasserbauwerke ist das Verzögern des Abflusses, auch als Retention bezeichnet, auf der Erdoberfläche bzw. vor allem in den Fließgewässern, damit Mensch, Tier und Pflanze ein ihrem Bedarf angepasstes Wasserangebot zur Verfügung haben.

Die vor der Menschheit und unserer Umwelt stehende Klimaänderung beeinflusst schon heute alle Planungen im Wasserbau. Sie vorausschauend zu beachten, ist gegenwärtig von ebenso großer Bedeutung wie das Planen mit Werten, die durch Auswertung von meteorologischen Ereignissen aus der Vergangenheit ermittelt wurden. Das Entsiegeln von Flächen führt nicht zum Verbessern von Ausgangswerten, da der Wasserbauer als Ingenieur immer mit dem ungünstigsten Wert rechnen muss. In Sachen Versickerung ist das der gefrorene und schneebedeckte Boden, auf den plötzlich ein warmer Regen fällt.

Zusammenhänge zwischen Wasserständen, Abflussmengen und Sedimentbewegungen sind wichtige Ausgangsdaten für Änderungen an Fließgewässern. Sie können durch Natur-

messungen oder Berechnungen gewonnen werden.

Große Standgewässer wie Seen und Talsperren werden vor allem der Einwirkung der Windwellen ausgesetzt. Die Voraussage und die Berechnung zu erwartender Belastungen aus Wellen bestimmen wesentlich die Lebensdauer der Wasserbauwerke an natürlichen oder künstlichen Seen, z. B. Anlegestellen für Schiffe und Boote. In Fragen der Belastung und Bemessung von Anlegestellen für Boote kann auch auf den Band 2 der zweiten Auflage der Wasserbaupraxis zurückgegriffen werden.

In vielen Standgewässern wie Speichern, Becken und Teichen kann die Eisbelastung ausschlaggebend sein für die Bemessung von Ufersicherungen. Die Eisbelastung eines Wasserbauwerkes zu bestimmen, ist mit Unsicherheiten verbunden, weil die Qualität des Eises sowohl am geplanten Bauwerk als auch bei bisherigen Untersuchungen, die oft zu Berechnungsverfahren und Formeln führten, sehr unterschiedlich (gewesen) sein kann. Frühere Wasserverschmutzungen führten zu geringerer und auch später beginnender Eisbildung und somit auch Eisbelastung.

In den weiteren Kapiteln dieses Buches werden die Forderungen der Menschen nach Wasser in ausreichender Menge und gleichmäßiger Verteilung im Vordergrund stehen. Durch Wasserbauten erfüllt sich die Gesellschaft heute zahlreiche Wünsche. Die Werte der Natur gebührend zu beachten, ist stets eine wichtige Aufgabe beim Errichten eines Wasserbauwerkes. Wie gut das frühere Generationen von Wasserbauern beachtet haben, bekommt der Wasserbauer immer zu spüren, wenn er ein altes marodes Wasserbauwerk beseitigen will oder muss. Dann stehen dem Abriss neue Umweltfragen entgegen. Wasserstände müssen erhalten bleiben, da neben dem abzureißenden Wasserbauwerk neue Biotope sich gebildet haben, die möglichst erhalten bleiben sollen.

Wunden in der Natur, durch Baustellen verursacht, heilen langsam – heute stets geforderte Ausgleichsmaßnahmen verbessern nachhaltig die Umwelt.