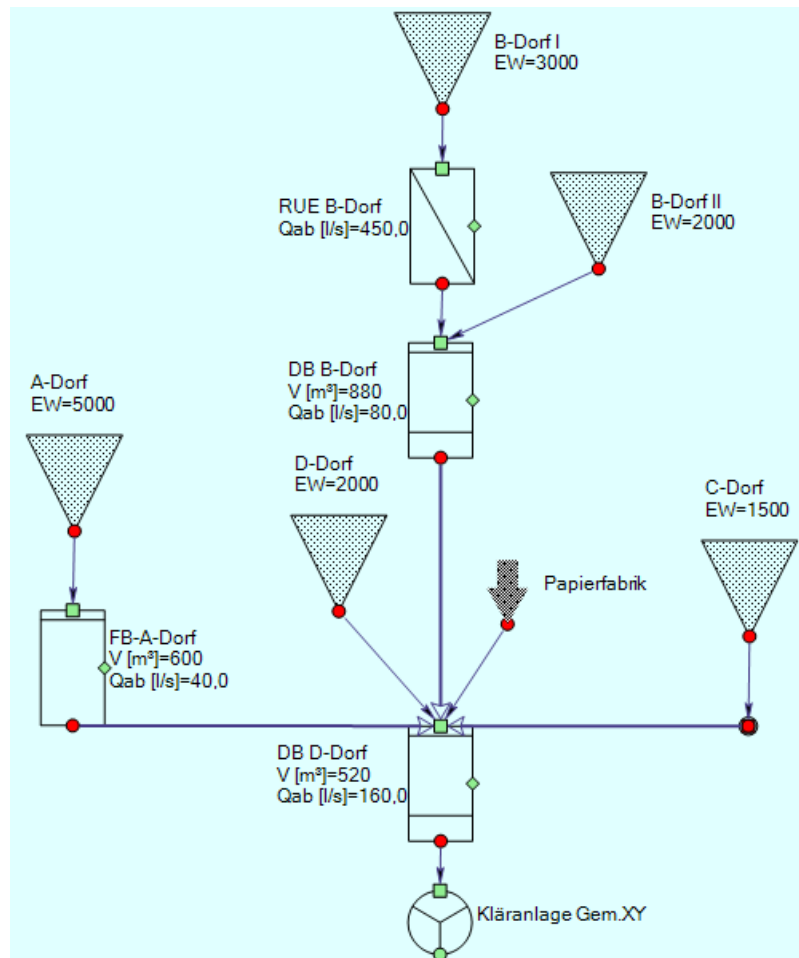


# Kontinuierliche Simulation zur Bemessung von Speicherbauwerken in urbanen Entwässerungssystemen



## KOSIM 7.3

Programm-Varianten KOSIM-MW, KOSIM-RW, KOSIM-XL

## Modellbeschreibung

Stand: 22.10.2009



Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH  
Hannover

**Copyright © 2009 itwh GmbH, Hannover**

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk und Teile davon dürfen in keiner Form, mit keiner Methode und zu keinem Zweck vervielfältigt werden.

itwh GmbH gibt keine Garantie, außer der in der Überlassungserklärung festgelegten, weder ausdrücklich noch implizit, auf die Verkaufseignung oder Tauglichkeit einer bestimmten Anwendung dieser Materialien und stellt diese Materialien lediglich in der augenblicklichen Form zur Verfügung.

itwh GmbH kann keinesfalls und gegenüber niemandem für besondere kollaterale, zufällige oder indirekte Schäden, die sich aus dem Kauf oder der Benutzung dieser Materialien ergeben, haftbar gemacht werden. Im Falle einer Haftung seitens itwh GmbH beträgt die Haftbarkeitssumme höchstens den Kaufpreis der hier beschriebenen Materialien.

itwh GmbH behält sich das Recht vor, seine Produkte nach eigenem Gutdünken zu revidieren oder zu verändern. Diese Publikation beschreibt den Zustand dieses Produktes zum Zeitpunkt der Veröffentlichung und muss nicht mit zukünftigen Versionen des Produktes übereinstimmen.

**Anmerkung:**

Fast alle weiteren Software- und Hardware-Bezeichnungen sind gleichzeitig eingetragene Warenzeichen und sollten als solche betrachtet werden.

## Inhalt

<b>Wegweiser durch die Modellbeschreibung</b>	<b>vii</b>
Intention der Modellbeschreibung	vii
Geltungsbereich der Modellbeschreibung	vii
Struktur der Modellbeschreibung	viii
Konventionen der Modellbeschreibung	viii

## Teil 1: Anforderungen, grundlegende Konzepte, Installation

<b>1</b>	<b>Programmanforderungen und Support</b>	<b>2</b>
1.1	Software-Anforderungen	2
1.2	Hardware-Anforderungen	2
1.3	Vorkenntnisse des Anwenders	2
1.4	Kursinformation, Bezugsadresse und Support*	3
<b>2</b>	<b>Einführung in das Programm KOSIM</b>	<b>4</b>
2.1	Einsatzbereich des Programms	4
2.1.1	Bauwerksarten	4
2.1.2	Nachweis mit kontinuierlicher Simulation	5
2.1.3	Bemessung	5
2.1.4	Optimierung eines vorhandenen Systems	6
2.2	Geltungsbereich des Programms	6
2.2.1	Mischwasserentlastungsbauwerke (KOSIM-MW + XL)	6
2.2.2	Zentrale und dezentrale Versickerungsanlagen (KOSIM-RW + XL)	8
2.2.3	Regenrückhaltebecken (KOSIM-RW + XL)	9
2.2.4	Retentionsbodenfilter (KOSIM-MW + XL)	9
2.2.5	Regenwassernutzungsanlagen (KOSIM-RW + XL)	10
2.3	Funktionsumfang des Programms	11
2.4	Grundlegende Konzepte von KOSIM	12
2.4.1	Das Prinzip der Langzeitsimulation	12
2.4.2	Belastungsdaten	13
2.4.3	Prinzipien der Sensitivitätsuntersuchung und der Optimierung	14
2.5	Systemelemente	16
2.5.1	Gebiete	16
2.5.1.1	Gebietsflächen	16



2.5.1.2	Trockenwetterabfluss aus Gebieten . . . . .	16
2.5.1.3	Einzeleinleiter . . . . .	18
2.5.1.4	Einzelflächen . . . . .	18
2.5.2	Verbindungselemente . . . . .	18
2.5.3	Speicherbauwerke . . . . .	19
2.6	Übergeordnete Abflussklassen, Abflusstypen und Objekte . . . . .	19
2.7	Historie . . . . .	22
2.7.1	Neuerungen der Programmversion 7.3 . . . . .	22
2.7.2	Neuerungen der Programmversion 7.2 . . . . .	23
2.7.3	Neuerungen der Programmversion 7.1 . . . . .	24
2.7.4	Neuerungen der Programmversion 6.3 . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Die KOSIM-Installation . . . . .</b>	<b>27</b>
3.1	Hinweise zur Installation . . . . .	27
3.2	Verzeichnisse . . . . .	27
3.3	KOSIM deinstallieren . . . . .	28
 <b>Teil 2: Modellbeschreibung/Fachtechnik</b>		
<b>4</b>	<b>Simulation periodischer Trockenwetterprozesse . . . . .</b>	<b>30</b>
4.1	Schmutzwasser . . . . .	30
4.2	Fremdwasser . . . . .	32
4.3	Berechnung des Trockenwetterabflusses . . . . .	33
<b>5</b>	<b>Abflussbildung . . . . .</b>	<b>34</b>
5.1	Niederschlagsbelastung . . . . .	34
5.1.1	Diskretisierung der Niederschlagszeitreihen . . . . .	34
5.1.2	Länge der Niederschlagszeitreihen . . . . .	35
5.1.3	Ungleichmäßige Überregnung . . . . .	35
5.1.4	Räumliche Übertragbarkeit von Niederschlagszeitreihen . . . . .	36
5.2	Befestigte Flächen . . . . .	36
5.2.1	Regenphase . . . . .	36
5.2.2	Trockenphase . . . . .	44
5.2.3	Zusammenstellung der Arbeitsgleichungen . . . . .	46
5.2.4	Hinweise zur Wahl der Ansätze und Parameterwerte . . . . .	47



5.3	Unbefestigte Flächen . . . . .	48
5.3.1	Benetzungs- und Interzeptionsverluste . . . . .	49
5.3.2	Infiltration . . . . .	50
5.3.3	Muldenverluste und Änderung des abflusswirksamen Anteils der Flächen . . . . .	55
5.3.4	Hinweise zur Parameterwahl . . . . .	57
5.4	Natürliche Flächen . . . . .	59
<b>6</b>	<b>Abflusskonzentration . . . . .</b>	<b>60</b>
6.1	Das Superpositionsprinzip der Einheitsganglinie . . . . .	62
6.2	Lineare Abflusskonzentrationsberechnung . . . . .	65
6.2.1	Linearer Einzelspeicher . . . . .	65
6.2.1.1	Volumentreue . . . . .	67
6.2.1.2	Einschränkungen . . . . .	69
6.2.2	Lineare Speicherkaskade . . . . .	71
6.3	Nichtlineare Abflusskonzentrationsberechnung . . . . .	74
6.3.1	Nichtlinearer Einzelspeicher . . . . .	74
6.3.2	Nichtlineare Speicherkaskade . . . . .	77
6.4	Berechnung von Abflusskonzentrationsparametern . . . . .	79
6.4.1	Mittlere Speicherkonstanten für befestigte und unbefestigte Flächen . . . . .	79
6.4.2	Mittlere Speicherkonstanten für natürliche Flächen . . . . .	80
6.4.3	Parameter der nichtlinearen Speicherkaskade . . . . .	81
<b>7</b>	<b>Abflusstransport . . . . .</b>	<b>84</b>
7.1	Berechnung mit Translation . . . . .	85
7.2	Berechnung mit Retention . . . . .	86
7.3	Berechnung mit Retention und Rückstau . . . . .	91
7.4	Abflussbeschränkung . . . . .	94
<b>8</b>	<b>Sonderbauwerke . . . . .</b>	<b>95</b>
8.1	Regenüberläufe und Verzweigungen . . . . .	95
8.1.1	Zuflussabhängige Abflussberechnung . . . . .	95
8.1.2	Verzweigung . . . . .	97
8.1.3	Regenüberlauf . . . . .	98
8.2	Speicherbauwerke . . . . .	99
8.2.1	Hydraulische Grundlagen zur Abflussberechnung aus Speicherbauwerken . . . . .	99
8.2.2	Wasserstandsabhängige Abflussberechnung . . . . .	100

8.2.3	Mischwasserbauwerke (KOSIM-MW + XL)	104
8.2.3.1	Fangbecken - Geometrie und Abfluss	104
8.2.3.2	Durchlaufbecken - Geometrie und Abfluss	105
8.2.3.3	Stauraumkanal - Geometrie und Abfluss	105
8.2.4	Versickerungsanlagen (KOSIM-RW + XL)	106
8.2.4.1	Mulde - Geometrie und Abfluss	107
8.2.4.2	Muldenbett - Geometrie und Abfluss	112
8.2.4.3	Rigole - Geometrie und Abfluss	114
8.2.5	Regenwassernutzungsanlagen - Geometrie und Abfluss (KOSIM-RW + XL)	120
8.2.6	Regenrückhaltebecken - Geometrie und Abfluss (KOSIM-RW + XL)	122
8.3	Bauwerke zur Regenwasserbehandlung (KOSIM-MW + XL)	128
8.3.1	Allgemeines	128
8.3.2	Mechanische Verfahren	129
8.3.2.1	Rechen und Siebe	129
8.3.2.2	Mikrosiebe	131
8.3.2.3	Hydrodynamischer Abscheider	131
8.3.3	Physikalisch-chemische Verfahren	133
8.3.4	Biologische Verfahren	134
8.3.4.1	Teiche	135
8.3.4.2	Bodenfilter	136
8.3.5	Regenwasserbehandlungsanlagen - Geometrie und Abfluss	138
<b>9</b>	<b>Schmutzfrachtberechnung</b>	<b>141</b>
9.1	Generelle Beschreibung des Schmutzfrachtgeschehens	141
9.2	Schmutzfrachtbildung	143
9.2.1	Konstante Verschmutzung des Regenwasserabflusses	143
9.2.2	Variable Verschmutzung des Regenwasserabflusses	144
9.2.3	Berechnungsmodi in KOSIM zur niederschlagsbedingten Schmutzfrachtbildung	148
9.2.4	Verschmutzung des Trockenwetterabflusses	151
9.2.5	Hinweise zur Parameterwahl	151
9.3	Berechnung von Frachtganglinien	152
9.4	Schmutzüberlagerung	153
9.5	Schmutztransport	154
9.5.1	Berechnung mit Translation	154
9.5.2	Schmutztransport mit Retention	155
9.5.3	Schmutztransport mit Retention und Rückstau	155
9.6	Stoffaufteilung in Mischwasserbauwerken (KOSIM-MW + XL)	156
9.6.1	Regenüberlauf	158
9.6.2	Durchlaufbecken	158
9.6.3	Fangbecken	159
9.6.4	Konzentrationsberechnung	160
9.6.5	Absetzwirkung in Mischwasserbauwerken	161



9.7	Stoffaufteilung in Regenwasserbehandlungsanlagen (KOSIM-MW + XL)	164
9.8	Stoffaufteilung in Mulden-Rigolen-Elementen (KOSIM-RW + XL)	166
9.9	Stoffaufteilung in Regenwassernutzungsanlagen (KOSIM-RW + XL)	167
9.10	Stoffaufteilung in Regenrückhaltebecken (KOSIM-RW + XL)	168
<b>10</b>	<b>Statistische Auswertung</b>	<b>169</b>
<b>11</b>	<b>Systemoptimierung</b>	<b>172</b>
11.1	Sensitivitätsuntersuchung	173
11.2	Optimierung	175
11.2.1	Zielgrößen	176
11.2.2	Globale und lokale Restriktionen	176
11.2.3	Unabhängige Größen	176
11.2.4	Modifikation von Entwässerungssystemen mit genetischen Methoden	178
11.2.5	Interner Berechnungsgang	179
11.2.6	Steuerung der internen Berechnungen	181
11.2.7	Vorgehensweise zur Durchführung von Optimierungen	182
 <b>Teil 3: Anhänge und Literaturverzeichnis</b>		
<b>Anhang A: Ergebnisauswertung und Abkürzungen</b>		<b>184</b>
<b>Anhang B: Wertebereiche und Vorgaben für neue Datensätze</b>		<b>185</b>
<b>Anhang C: Bereitgestellte Datensätze für Tagesganglinien</b>		<b>193</b>
<b>Anhang D: Bereitgestellte Parametersätze für Flächen</b>		<b>195</b>
	Parameter befestigte Flächen	195
	Parameter teilbefestigte Flächen	196
	Parameter unbefestigte Flächen	197
	Parameter natürliche Flächen	198
<b>Anhang E: Das MD-Format zur Speicherung von Massendaten</b>		<b>199</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>206</b>

## Wegweiser durch die Modellbeschreibung

### Intention der Modellbeschreibung

Die vorliegende Modellbeschreibung enthält grundlegende Informationen über das kontinuierliche Simulationsmodell KOSIM und erläutert wesentliche Konzepte, die dem Programm zu Grunde liegen.

Die ausführliche Beschreibung der Programmoberfläche sowie konkrete Hinweise zur Projektbearbeitung mit KOSIM finden Sie in der Online-Hilfe Ihres Programms. In das Inhaltsverzeichnis der Online-Hilfe gelangen Sie über den Menüpunkt [Hilfe]-[Inhalt].

### Geltungsbereich der Modellbeschreibung

Die Software KOSIM kann für verschiedene Aufgabenschwerpunkte eingesetzt werden. Sie ist deshalb in verschiedenen Produkt-Varianten erhältlich:

- ◆ KOSIM-MW (Bemessung von Mischwasserbauwerken und Regenwasserbehandlungsanlagen)
- ◆ KOSIM-RW (Bemessung von Regenrückhaltebecken, Mulden-Rigolen-Systemen und Regenwassernutzungsanlagen)
- ◆ KOSIM-XL (Gesamtpaket, das alle anderen Varianten umfasst)

Diese Modellbeschreibung beschreibt die Grundlagen aller Produkt-Varianten und damit den gesamten KOSIM-Funktionsumfang.

#### **Hinweis**

*Wenn Sie mit einer der Programm-Varianten MW oder RW arbeiten, sind einzelne Abschnitte der Modellbeschreibung für Sie nicht relevant. Entsprechende Hinweise enthalten ggf. die Kapitelüberschriften.*

Die Modellbeschreibung erläutert auch die verschiedenen Verfahren zur Systemoptimierung. Das Modul zur Systemoptimierung kann mit allen drei Programm-Varianten zusammen eingesetzt werden.

## Struktur der Modellbeschreibung

Die Modellbeschreibung gliedert sich in drei Teile:

- ◆ **"Teil 1: Anforderungen, grundlegende Konzepte, Installation":**

Das Kapitel 1 "Programmanforderungen und Support" gibt einen Überblick über die Voraussetzungen für den Einsatz von KOSIM und nennt nützliche Bezugsadressen.

Kapitel 2 "Einführung in das Programm KOSIM" informiert über Einsatzbereich, Funktionsumfang und grundlegende Konzepte des Programms.

Kapitel 3 "Die KOSIM-Installation" gibt Hinweise zur Installation, zur Verzeichnisstruktur u. Ä.

- ◆ **"Teil 2: Modellbeschreibung/Fachtechnik":**

Die hier untergeordneten Kapitel beschreiben die wesentlichen Merkmale der einzelnen Modellkomponenten.

- ◆ **"Teil 3: Anhänge und Literaturverzeichnis":**

In den Anhängen finden Sie u. a. Informationen zur Ergebnisauswertung und zu den KOSIM-Vorbelegungen.

Das Literaturverzeichnis verweist auf einschlägige Veröffentlichungen, die im Zusammenhang mit KOSIM von Interesse sind.

## Konventionen der Modellbeschreibung

### Verzeichnisangaben

Sie können KOSIM auf einem Festplattenlaufwerk Ihrer Wahl installieren (siehe Kapitel 3 "Die KOSIM-Installation"). Alle in der Dokumentation genannten Verzeichnisangaben beziehen sich auf die von der Installation vorgegebenen Standardverzeichnisse.



---

# **Teil 1:**

**Anforderungen,  
grundlegende Konzepte, Installation**



# 1 Programmanforderungen und Support

## 1.1 Software-Anforderungen

Das Programm KOSIM wurde als Anwendung für Microsoft Windows entwickelt. Die Liste der empfohlenen Windows-Betriebssysteme finden Sie im CD-Heft der Programm-CD.

Für den Einsatz von KOSIM ist neben dem jeweiligen Betriebssystem das .NET-Framework erforderlich, das von uns mitgeliefert und ggf. automatisch installiert wird. Die Online-Hilfe und die Ergebnis-Schnellansicht erfordern den Internet Explorer 6.0 SP 1 oder neuer. Ergebnis-Berichte erfordern einen PDF-Reader.

## 1.2 Hardware-Anforderungen

Es gelten im Allgemeinen die Hardware-Anforderungen des verwendeten Betriebssystems als maßgebend für die benötigte Hardware-Ausstattung.

## 1.3 Vorkenntnisse des Anwenders

Beim Erwerb von KOSIM empfehlen wir dringend die Teilnahme an einer unserer regelmäßigen Schulungen, um Ihnen den Einstieg und die Einarbeitung in dieses leistungsfähige und umfangreiche Programm in möglichst kurzer Zeit zu erleichtern.

Die zu wählende Vorgehensweise bei der Dimensionierung bzw. beim Nachweis der Funktionsfähigkeit von Mischwasserentlastungsbauwerken, bei der Dimensionierung von Versickerungsanlagen bzw. Regenrückhaltebecken wird in einigen Bundesländern bestimmt durch die Maßgaben verschiedener DWA (früher: ATV)-Arbeits- und Merkblätter (siehe auch Kapitel 2).

Wenn Sie KOSIM für die Bearbeitung entsprechender Projekte einsetzen, sollten Sie daher mit den Inhalten des jeweiligen Arbeitsblattes vertraut sein.

DWA-(ATV-)Arbeitsblätter sind zu beziehen über die:

◆ **DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.**

Theodor-Heuss-Allee 17

53773 Hennef

Tel: 0 22 42 / 872-0

E-Mail: [info@dwa.de](mailto:info@dwa.de)

Kenntnisse über die allgemeine Handhabung des Betriebssystems werden vorausgesetzt.

## **1.4 Kursinformation, Bezugsadresse und Support\***

Kurs- und Bezugsinformationen zu KOSIM und verwandten Programmen erhalten Sie unter der folgenden Adresse:

◆ **itwh GmbH**

Engelbosteler Damm 22

30167 Hannover

Tel: +49 511/97193-0

Fax: +49 511/97193-77

E-Mail: [itwh@itwh.de](mailto:itwh@itwh.de)

Internet: [www.itwh.de](http://www.itwh.de)

**Im Falle eines Problems mit KOSIM** gehen Sie folgendermaßen vor:

1. Sichern Sie alle Dateien, die zu dem Problemprojekt gehören, da wir diese evtl. für eine spätere Analyse benötigen.
2. Senden Sie ein Fax oder eine E-Mail mit einer Beschreibung Ihres Problems an itwh GmbH, +49 511/97193-77 bzw. an [support-kosim@itwh.de](mailto:support-kosim@itwh.de).

Sie können auch das Support-Formular auf unserer Internet-Seite für eine Support-Anfrage nutzen (unter: [www.itwh.de/S\\_Service.htm](http://www.itwh.de/S_Service.htm)).

(\* Für die Beantwortung von Support-Anfragen empfehlen wir Ihnen den Abschluss eines Service-Vertrages. Nähere Informationen zu diesem Thema erhalten Sie unter der Telefon-Nr. +49 511/97193-0.)

Ihre Fragen, Anregungen und Wünsche sind uns ebenfalls jederzeit willkommen.

## 2 Einführung in das Programm KOSIM

Dieses Kapitel enthält grundlegende Informationen zum Einsatz- und Geltungsbereich von KOSIM. Es informiert Sie über die allgemeine Programm- und Datenstruktur des Programms sowie über grundlegende Konzepte des Programms.

### 2.1 Einsatzbereich des Programms

#### 2.1.1 Bauwerksarten

Für Entwässerungsnetze im Mischsystem ist die Anordnung von Entlastungsbauwerken erforderlich, da im Regenwetterfall nicht der gesamte Abfluss der Kläranlage zugeleitet werden kann bzw. darf. Kläranlagen werden in der Regel so bemessen, dass zumindest der Trockenwetterabfluss hydraulisch verkraftet werden kann. Darüber hinausgehende Abflüsse müssen im Entwässerungssystem entweder zwischengespeichert oder in das Fließgewässer abgeschlagen werden. Übliche Entlastungs- bzw. Speicherbauwerke sind:

- ◆ einfache Regenüberläufe
- ◆ Regenüberlaufbecken als
  - Durchlaufbecken oder
  - Fangbeckenjeweils angeordnet im
  - Hauptschluss oder
  - Nebenschluss
- ◆ Kanalstauräume mit
  - untenliegender Entlastung oder
  - obenliegender Entlastung

Zur Vermeidung des Mischwasserabflusses bzw. zur Verringerung des Anteils des Regenwassers im Mischwasserabfluss kann das Regenwasser dezentral, d.h. "vor Ort", bewirtschaftet werden. Hierzu werden Speicherbauwerke mit Versickerungs- bzw. Nutzungsmöglichkeiten geplant:

- ◆ Anlagen zur dezentralen Regenwasserbewirtschaftung
  - Mulden

- Rigolen
- Regenwassernutzungsanlagen

Zusätzlich können

- ◆ Regenrückhaltebecken

sowie

- ◆ Regenwasserbehandlungsanlagen

berücksichtigt werden.

Vorgaben von Regelwerken (z. B. DWA-Regelwerk, Arbeitsblatt A 128) können in KOSIM berücksichtigt werden.

### 2.1.2 Nachweis mit kontinuierlicher Simulation

Das kontinuierliche Simulationsmodell KOSIM dient der Dimensionierung von Speicherbauwerken sowie dem Nachweis der Funktionsfähigkeit derselben mit Hilfe der Langzeitsimulation. Die Vorgaben des Arbeitsblattes A 128 und des Merkblattes M 177 der DWA können berücksichtigt werden. Außerdem wird die Bemessung von Regenrückhaltebecken entsprechend den Vorgaben des A 117 und des A 138 unterstützt.

Die Berechnungsgrundlagen der kontinuierlichen Simulation werden im "Teil 2: Modellbeschreibung/Fachtechnik" erläutert.

### 2.1.3 Bemessung

Die (Vor-)Bemessung ausgewählter Anlagen ist mit KOSIM möglich. Im Gegensatz zum Nachweis sind bei der Bemessung keine Bauwerksdaten als Eingangsdaten notwendig. Mit der Bemessung wird ein mehr oder weniger der Aufgabenstellung angepasstes Volumen ermittelt. Der Nachweis der Funktionsfähigkeit ist jedoch nicht möglich. Zweckmäßigerweise erfolgt im ersten Schritt eine Vorbemessung und anschließend ein Nachweis der Funktionsfähigkeit gemäß Kapitel 2.1.2.

Die Berechnungsgrundlagen sind den einschlägigen Regelwerken zu entnehmen.

### 2.1.4 Optimierung eines vorhandenen Systems

Mit Hilfe der Verfahren Sensitivitätsuntersuchung bzw. Optimierung können vorhandene Systeme analysiert und optimiert werden. Bei der Sensitivitätsuntersuchung werden für einzelne Bauwerke (z. B. Mischwasserbauwerke) des Systems ausgesuchte Eingabewerte (z. B. Drosselabflüsse) variiert und es werden die Auswirkungen auf das System überprüft. Im Rahmen der Optimierung versucht KOSIM automatisiert einem zuvor definierten Ziel (z. B. Minimierung der Entlastungsfracht) durch Variation ausgesuchter Eingabewerte (z. B. Drosselabflüsse) einzelner Bauwerke möglichst nahe zu kommen. Die Optimierung führt nicht zu einer unumstößlichen Lösung, sondern unterstützt den Planer bei der Suche nach der optimalen Systemgestaltung. Einzelheiten zu den genannten Verfahren enthält auch das Kapitel 2.4.3 "Prinzipien der Sensitivitätsuntersuchung und der Optimierung".

## 2.2 Geltungsbereich des Programms

### 2.2.1 Mischwasserentlastungsbauwerke (KOSIM-MW + XL)

Das Arbeitsblatt A 128 sieht die Dimensionierung mit Hilfe eines Bemessungsdiagramms, also statische Dimensionierungsberechnungen vor. Alternativ ist das Nachweisverfahren immer möglich. Unter bestimmten Voraussetzungen ist gemäß A 128 ein Nachweisverfahren zwingend erforderlich.

Da die Arbeitsblätter der DWA allgemein anerkannte Regeln der Technik darstellen, aber nicht zwingend verbindlich sind, bleibt es den Länderverwaltungen überlassen, solche Arbeitsblätter dem Inhalt nach für das jeweilige Bundesland einzuführen. Einige Bundesländer haben daher Bestimmungen erlassen, die von dem Arbeitsblatt A 128 abweichen. Von dieser Möglichkeit haben eindeutig die Bundesländer Niedersachsen und Hessen Gebrauch gemacht.

Für die Bundesrepublik Deutschland ergibt sich derzeit folgendes (heterogene) Bild:

#### Niedersachsen

Der Nachweis der Mischwasserentlastungen erfolgt mit dem Langzeit-Kontinuums-Modell KOSIM oder einem nach einem Vergleich mit KOSIM zugelassenen anderen Modell. Das Land stellt landesweit regional gültige Regenreihen zur Verfügung. Die Schmutzfrachtberechnung erfolgt nach der Komponentenmethode für den Parameter CSB. Die Schmutzkonzentration des von befestigten Flächen

abfließenden Regenwassers wird unter Berücksichtigung des örtlich vorliegenden abflusswirksamen Niederschlagsanteils aus einem vorgegebenen Schmutzpotenzial auf der Oberfläche von  $500 \text{ kg CSB}/(\text{ha}_{\text{red}} \cdot \text{a})$  festgelegt. Zielgröße des Nachweises ist die Einhaltung einer Entlastungsfracht von  $250 \text{ kg CSB}/(\text{ha}_{\text{red}} \cdot \text{a})$ .

### **Sachsen-Anhalt**

Die Vorgehensweise entspricht grundsätzlich der in Niedersachsen. Die Regendaten sind jedoch i.d.R. über den Deutschen Wetterdienst zu beziehen.

### **Nordrhein-Westfalen**

Gemäß Runderlass des Ministeriums für Umwelt müssen  $(100 - e_0)$  Prozent des abfließenden Niederschlages einer zentralen mechanisch-biologischen Abwasserbehandlungsanlage zugeführt werden. Die Definition der Entlastungsrate  $e_0$  erfolgt nach dem Arbeitsblatt A 128. Der Anteil der auf der Kläranlage behandelten Wassermenge kann aus Messungen im Zulauf (Jahresabwassermenge und Schmutzwassertageswerte) ermittelt werden. Der Nachweis kann auch mit Hilfe einer Langzeitsimulation (10 Jahre), also auch mit KOSIM, durchgeführt werden. Die Modellanwendung ist mit dem Landesumweltamt abzustimmen. Außerdem ist das Modell anhand von Messungen an repräsentativen Stellen im Netz zu kalibrieren.

Die Dimensionierung kann nach dem A 128 durchgeführt werden. Für den messtechnischen Nachweis empfiehlt sich ein Nachweis der Entlastungsrate mit KOSIM.

### **Hessen**

Dieses Bundesland hat das Kontinuums-Modell SMUSI als Prüfprogramm eingeführt. Repräsentative (einjährige) Niederschlagsreihen werden zur Verfügung gestellt. Hinsichtlich der hydrologischen Ansätze und der Schmutzfrachtermittlung ist SMUSI dem Modell KOSIM vergleichbar. Die Modellparameter einschließlich der Güteparameter sind jedoch weitestgehend fixiert und durch den Anwender nicht veränderbar. Zielgröße ist wie in Niedersachsen eine zulässige Entlastungsfracht von  $250 \text{ kg CSB}/(\text{ha}_{\text{red}} \cdot \text{a})$ . Einer Projektbearbeitung mit KOSIM steht nichts entgegen.

### Bayern

In Bayern ist das neue Arbeitsblatt A 128 verbindlich eingeführt. Die Anwendung dieses Arbeitsblattes führt zur Festlegung eines erforderlichen Gesamtspeichervolumens für das Entwässerungsgebiet. Die Anordnung und Festlegung der einzelnen Beckengrößen kann sowohl nach dem vereinfachten Aufteilungsverfahren gemäß A 128 als auch mit einem beliebigen Kontinuumsmodell erfolgen.

### Übrige Bundesländer:

Teilweise existieren keine Verwaltungsvorschriften, in welcher Form und mit welchem Instrumentarium die Mischwasserentlastungsanlagen zu bemessen sind bzw. der Nachweis einer hinreichenden Planung zu erbringen ist. Es bleibt somit den einzelnen Aufsichtsbehörden überlassen, wie hier zu verfahren ist. Vielfach bildet das Arbeitsblatt A 128 die Grundlage der Bemessung bzw. ist das Arbeitsblatt eingeführt. Besondere Berechnungsvorschriften, wie z. B. die Ausweitung des Anwendungsbereiches des Anhangs 3 des A 128 über 2 l/(s ha) hinaus, können im Einzelfall mit KOSIM berechnet werden.

## 2.2.2 Zentrale und dezentrale Versickerungsanlagen (KOSIM-RW + XL)

Nicht vernetzte, dezentrale Versickerungsanlagen werden häufig nach Arbeitsblatt A 138 dimensioniert. Hinweise zur Vordimensionierung gibt die ATV-Arbeitsgruppe 1.4.1, ATV [1995].

Für zentrale oder vernetzte Versickerungsanlagen (z. B. Mulden-Rigolen-Systeme) sollte nach einem Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 1.4.1 eine Langzeitsimulation durchgeführt werden. Mit KOSIM ist diese Simulation möglich.

Versickerungsanlagen werden z. B. für folgende Planungsaufgaben angewendet:

- ◆ **Entwässerungstechnische Sanierung:**

Die bestehenden Kanalisationsnetze sind z. T. infolge ansteigender Versiegelung überlastet. Die "normalerweise" angewandte Sanierung durch Neubau der Sammler mit größeren Profilen kann vermieden werden, wenn im Kanalisationsgebiet geeignete Flächen von der Kanalisation abgekoppelt und mittels dezentraler Methoden, z. B. dem Mulden-Rigolen-System, entwässert werden.

- ◆ **Erschließung von Neubaugebieten:**

Es gibt bereits Planungen, bei denen praktisch nur durch die Anwendung der dezentralen Regenwasserentsorgung eine Erschließung von Baugebieten möglich wurde, weil die im Baugebiet unterhalb vorhandene Kanalisation keine zusätzlichen Regenwasserabflüsse hätte aufnehmen können.

Die durch dezentrale Verfahren bewirkte Abflussdrosselung ist so stark, dass - selbst wenn das Wasser nicht in ein Gewässer geleitet wird - die vorhandene Kanalisation des unterhalb gelegenen Gebietes noch ausreicht und ein Ausbau nicht erforderlich ist.

- ◆ **Auswirkung dezentraler Versickerungsanlagen im Mischsystem:**  
Durch die Abkoppelung von Teilflächen im Mischsystem und die Anordnung von Versickerungsanlagen wird das Abflussgeschehen im verbleibenden Mischsystem signifikant beeinflusst. Mit KOSIM-XL kann die Auswirkung von Flächenabkoppelung auf die Speicherbauwerke nachgewiesen werden.

### 2.2.3 Regenrückhaltebecken (KOSIM-RW + XL)

Regenrückhaltebecken sind zentrale Speicherräume, die das Fließgewässer vor übermäßiger hydraulischer Belastung schützen sollen. Derartige Speicherräume werden häufig nach dem Arbeitsblatt A 117 bemessen.

In diesem Arbeitsblatt werden Regenrückhaltebecken in der Form verallgemeinert, dass sie auch als Regenrückhalteraum bezeichnet werden. Damit wird verdeutlicht, dass nicht nur reine Becken als Speicherraum, sondern auch eine beliebige Form von Speicherräumen, die eine Retention bewirken, zur Regenrückhaltung genutzt werden können. Regenrückhaltebecken, bzw. -räume werden sowohl in Mischsystemen als auch in Trennsystemen angeordnet.

In Mischsystemen werden Regenrückhaltebecken in der Regel durch Überläufe aus sogenannten Regenbecken (z. B. Fang- oder Durchlaufbecken) beschickt.

In Trennsystemen stellen Regenrückhaltebecken häufig die alleinige Form einer zentralen Retention dar. Sie können aber auch in Kombination mit dezentralen Maßnahmen, wie z. B. Versickerungsmulden oder anderen dezentralen Bewirtschaftungselementen, angeordnet werden.

Mit KOSIM kann die Funktionsweise von Regenrückhaltebecken mit Hilfe der Langzeitsimulation nachgewiesen werden.

### 2.2.4 Retentionsbodenfilter (KOSIM-MW + XL)

Regenwasserbehandlungsanlagen, wie z. B. Bodenfilter, sind Stoffsenken und beeinflussen die Emission in Fließgewässer in erheblichem Maße. Mit KOSIM können Bodenfilter dimensioniert bzw. deren Wirkungsweise nachgewiesen werden. Wesentliche Größen zur Festlegung der Abmessungen (z. B. Stapelhöhe) werden berechnet. Zusätzlich kann die Wirkungsweise von Bodenfiltern im Entwässerungssystem aus emissionsbezogener oder auch aus immissionsbezogener Sicht quantifiziert werden.



### 2.2.5 Regenwassernutzungsanlagen (KOSIM-RW + XL)

Mit KOSIM kann die Wirkungsweise von Regenwassernutzungsanlagen sowohl zur Dimensionierung als auch zur Berücksichtigung der Auswirkungen auf nachfolgende Bauwerke berechnet werden.

## 2.3 Funktionsumfang des Programms

Das Modell KOSIM wurde ursprünglich am Institut für Wasserwirtschaft der Universität Hannover entwickelt mit dem Ziel, Niederschlag-Abfluss-Ereignisse nachzubilden, die man aus umfangreichen Messungen in der Trennkanalisation der Stadt Hildesheim gewonnen hatte.

Die Intensivierung der Diskussionen zur Schmutzfrachtberechnung führte zu einer wiederholten Modifikation und Erweiterung der Berechnungs- und Auswertungsalgorithmen, so dass der Funktionsumfang der aktuellen Version von KOSIM eine Vielzahl praktischer Anwendungsziele abdeckt. Dazu zählen für die Gesamtversion KOSIM-XL u. a.:

- ◆ die Bemessung und der Nachweis von Speicherbauwerken
- ◆ die Erfassung von Verschmutzungsschwerpunkten im Netz
- ◆ die Anordnung und Bemessung von Speicherbauwerken im Mischsystem mit Leistungsnachweis
- ◆ die Minimierung der Entlastungstätigkeit von Bauwerken
- ◆ die Überprüfung und Korrektur der Gesamtkonzeption von Entwässerungssystemen
- ◆ die Bewirtschaftung von Systemelementen auch unter Berücksichtigung qualitativer Aspekte
- ◆ die Ermittlung der Prioritätsfolge einzelner Sanierungsmaßnahmen innerhalb einer Gesamtkonzeption
- ◆ die Ermittlung des Ausmaßes der Gewässerbelastung durch Regen- oder Mischwasserabflüsse als Eingangsgrößen für Gewässergütemodelle

Die von KOSIM simulierten Ganglinien werden einer statistischen Analyse unterzogen. Die Bezugszeiträume sind sowohl die einzelnen Jahre als auch der gesamte Simulationszeitraum. Neben diversen Summen- und Mittelwertbildungen werden vor allem die an den Entlastungsbauwerken auftretenden Überlaufereignisse hinsichtlich ihrer Menge, Schmutzfracht und Häufigkeit erfasst und ihre monatsbezogene Verteilung dargestellt. Für die einzelnen Schmutzparameter können die Unterschreitungshäufigkeiten der Überlaufkonzentrationen bezogen auf die Überlaufwassermenge ausgegeben werden.

## 2.4 Grundlegende Konzepte von KOSIM

Die folgenden Abschnitte behandeln einige wesentliche Konzepte, die in KOSIM zur Anwendung kommen. Sie geben einen Überblick über die Modellkomponenten und die Datenstrukturen bei der EDV-technischen Umsetzung.

### 2.4.1 Das Prinzip der Langzeitsimulation

Berechnungsmethoden, die mit Block- oder Modellregen operieren, verlangen vor Beginn der Berechnungen eine statistische Aufbereitung des Niederschlages (Regenreihen, Modellregenverläufe, usw.). Im Gegensatz dazu kann bei der Langzeitsimulation auf eine statistische Aufbereitung des Niederschlagskontinuums verzichtet werden. Statistische Untersuchungen werden hier erst an den Zielgrößen, z. B. Überlauffrachten, Überlaufmengen, vorgenommen.

Die ATV-Arbeitsgruppe 1.2.6 - Hydrologie der Stadtentwässerung schlägt vor, die Bezeichnung "Langzeitsimulation" für den Bereich der Siedlungswasserwirtschaft inhaltlich wie folgt zu verwenden:

"Mit der Langzeitsimulation wird der Abflussprozess in Kanalsystemen, der sich aus einer Folge von Einzelregen ergibt, mathematisch nachgebildet. Dabei ist Voraussetzung, dass als Belastungsdaten für ein verwendetes Berechnungsmodell gemessene Regenereignisse in ihrem natürlichen zeitlichen Verlauf Verwendung finden.

Es besteht die Möglichkeit, die zeitliche Abfolge verschiedener Ereignisse zu verändern, wenn die Ereignisse hinsichtlich der Berechnungsergebnisse unabhängig voneinander sind. Der Intensitätsverlauf der Einzelereignisse darf hingegen nicht verändert werden."

Bei der Langzeitsimulation finden Einzelereignisse (Langzeitseriensimulation) oder das gesamte Niederschlagskontinuum aus einer Reihe kontinuierlich gemessener Regendaten mehrerer Jahre (Langzeitkontinuumssimulation) Verwendung. Um den Teilbegriff "Langzeit" ausreichend zu würdigen, sollten die gemessenen Regendaten von mindestens zehn Jahren zur Simulation herangezogen werden.

Insbesondere im Zusammenhang mit der Entlastungstätigkeit im Bereich von Becken gibt es zwei wesentliche Gründe für eine Kontinuumssimulation:

- ◆ Bei Ereignisbeginn sind Benetzungs- und Muldenverluste eventuell noch nicht abgetrocknet. Es kommt dann wegen verringerter Anfangsverluste ein größerer Anteil der Niederschläge zum Abfluss, der die Überlaufdaten ungünstig beeinflussen kann. Eine Vernachlässigung bereits teilweise abgedeckter Anfangsverluste bedeutet für die Bemessung von Speicherbauwerken eine zu günstige und somit unzulässige Annahme.

- ◆ Nach Ende eines Niederschlag-Abfluss-Ereignisses können Becken noch Teilfüllungen enthalten, die zu Beginn der darauffolgenden Trockenphase abgegeben werden. Die Entleerungszeiten können bei Drosselorganen mit geringer Leistung und bei Speicherbauwerken mit großem spezifischem Stauvolumen sehr groß sein. Tritt während der Entleerungsphase ein weiteres Niederschlag-Abfluss-Ereignis ein, kann nicht das gesamte, sondern nur das noch verbleibende Volumen genutzt werden.

Beide Gründe beziehen sich zwar lediglich auf den Niederschlag-Abfluss-Prozess, sind aber für die Bemessung von Speichern von Bedeutung. Insbesondere die Mechanismen der Entleerung müssen bei der Berechnung berücksichtigt werden.

KOSIM unterscheidet deshalb Niederschlags- und Trockenphasen und verwendet phasenweise unterschiedliche Simulationsalgorithmen. Eine strikte Trennung der Phasen ist allerdings nicht möglich. Während nach Niederschlagsende die Reduzierung der Abflussbereitschaft simuliert wird, müssen aus dem Entwässerungsgebiet noch auftretende Abflüsse sowie Entleerungsprozesse wie in der Niederschlagsphase weiter berechnet werden.

Die Zahl der im Verlauf einer Simulationsperiode auftretenden Abflussphasen unterscheidet sich demzufolge von der Zahl der Niederschlagsphasen. Dies ist für die Ermittlung der Überlaufhäufigkeit von Bedeutung, da das Modell KOSIM für ein Niederschlagsereignis jeweils höchstens ein Überlaufereignis zählt, unabhängig davon, ob mehrgipflige Abflussereignisse an Regenüberlaufbauwerken mehrfach zu Entlastungen führen. Bei großen Beckenvolumina und kleinen Drosseldurchmessern errechnen sich nur wenige Überlaufereignisse, aber große mittlere Überlaufdauern.

#### 2.4.2 Belastungsdaten

Die Vorgabe des Niederschlagskontinuums für die Kontinuumssimulation basiert auf folgender Annahme:

"Wird ein ausreichend langer Zeitraum betrachtet, so wird das statistische Niederschlagsverhalten in der Zukunft genauso sein, wie es in der Vergangenheit war."

Mit dieser Annahme ist es möglich, auf ein historisches Niederschlagsgeschehen als Belastungsdaten zurückzugreifen. Dabei sind zwei Bedingungen zu beachten:

- ◆ Bisherige Erfahrungen zeigen, dass der "ausreichend lange Zeitraum" zehn Jahre betragen sollte. Nur bei Verwendung eines Zeitraums mit dieser Dauer werden die statistischen Verhältnisse in einem ausreichenden Maße

berücksichtigt. Dabei kann der Wert von zehn Jahren nur als ein "Faustwert" angegeben werden.

Im Einzelfall sollte die erforderliche Länge der Zeitreihe mit der Überlaufhäufigkeit des vorhandenen Systems in Zusammenhang gebracht werden. Es macht z. B. keinen Sinn, die Überlaufhäufigkeit eines großen Speichers, der alle fünf Jahre überläuft z. B. ein Mulden-Rigolen-Element, mit einer einjährigen Niederschlagszeit nachzuweisen. Dementsprechend sollte zur Dimensionierung von Mulden-Rigolen-Anlagen (i.d.R.  $n \leq 1$ ) die Niederschlagszeitreihe **mindestens** zehn Jahre lang, besser 20 Jahre oder länger, sein. Auf der anderen Seite kann es in Ausnahmefällen sinnvoll sein, die Überlauftätigkeit eines kleinen Speichers (z. B. ein typisches Mischwasserentlastungsbauwerk), der mehrmals im Jahr überläuft, mit einem repräsentativen Niederschlagsjahr nachzuweisen.

- ◆ Immer wieder stellt sich die Frage, inwieweit die Niederschlagsdaten einer Station auf andere Örtlichkeiten übertragen und dort angewendet werden dürfen. Zwar kann sich die Niederschlagsdynamik, die nicht zuletzt wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis hat, auch bei Stationen mit gleicher mittlerer Jahresniederschlagssumme deutlich unterscheiden (Einfluss von unterschiedlichen klimatologischen und topographischen Verhältnissen). Dennoch ist es i.d.R. zulässig, auf eine Station mit einer mittleren Jahresniederschlagssumme in gleicher Größenordnung zurückzugreifen, wenn örtliche Niederschlagsreihen nicht verfügbar sind.

Standardmäßig kommen in KOSIM Niederschlagsdaten zur Anwendung, die in 5-Minuten-Intervallen diskretisiert sind. KOSIM ermöglicht es, mehrere Stationen zu berücksichtigen, d.h. jedem Gebiet kann eine Niederschlagsstation zugeordnet werden. Dabei wird von gebietsweiser, gleichmäßiger Überregnung ausgegangen. Für jedes Gebiet kann ein Regenschreiber angegeben werden. Es können somit maximal so viele Regenschreiber berücksichtigt werden wie Gebiete und Einzelflächen vorhanden sind.

### 2.4.3 Prinzipien der Sensitivitätsuntersuchung und der Optimierung

Die Sensitivitätsuntersuchung bietet die Möglichkeit, zu bereits bestehenden Systemelementen unabhängige Größen mit variablen Werten zu definieren. Die variablen Werte einer unabhängigen Größe (z. B. Länge eines Rückhaltebeckens) sind: Minimalwert und Maximalwert (z. B. Länge von 10-20 m), sowie die Diskretisierung (z. B. Änderung der Länge in Schritten von je 1 m). Durch Festlegung von

Minimalwert, Maximalwert und Diskretisierung wird eine unabhängige Größe definiert. Das bestehende System wird dann mit den variablen Größen simuliert mit dem Ziel den Einfluss eines umdefinierten Elementes auf das Systemverhalten beurteilen zu können.

Hinweis für Nutzer des Programms SENSOR für KOSIM 6:

Früher wurden Sensitivitätsuntersuchungen für KOSIM-Projekte (der Versionen 6.x) in dem eigenständigen Programm SENSOR durchgeführt. Ab KOSIM 7.2 sind Sensitivitätsuntersuchungen direkt in KOSIM möglich. Das Verfahren wurde allerdings überarbeitet und effektiver gestaltet. In SENSOR war es möglich, beliebig viele unabhängige Größen zu definieren. Dies führte zu einer unübersichtlichen Menge von Ergebnisdateien und erschwerte die Beurteilung/Qualifizierung der Ergebnisse. In KOSIM können daher nur noch maximal zwei unabhängige Größen definiert werden. Die Ergebnisse werden in die neue KOSIM-Ergebnisdatei geschrieben, die alle Simulationsergebnisse enthält, und lassen sich in zweidimensionalen Diagrammen einfach darstellen bzw. als Bericht ausgeben. SENSOR-Projekt- oder Ergebnisdateien können in KOSIM 7 nicht eingelesen werden.

Bei der Optimierung variiert KOSIM selbständig das System innerhalb vorgegebener Grenzen und versucht so für eine gewünschte Zielgröße, z. B. "Minimierung der Entlastungsfracht", das optimale System zu finden. Die vorgegebenen Grenzen werden durch den Anwender mit dem Wertebereich der zu variierenden Größen (z. B. Drosselabflüsse von Bauwerken) vor der Berechnung festgelegt. Innerhalb der definierten Grenzen erzeugt KOSIM intern  $n$  Entwässerungssysteme mit zufällig gewählten unabhängigen Größen und führt für diese Systeme jeweils eine Langzeitsimulation durch. Anschließend wird durch zufällige Änderung (Mutation) einzelner variabler Größen oder durch eine zufällige Verschneidung von zwei Entwässerungssystemen versucht, die Zielgröße zu verbessern. Die Optimierung wird durchgeführt bis keine weitere Verbesserung der Zielgröße zu erwarten ist.

Detaillierte Erläuterungen zur Systemoptimierung finden Sie im Teil 2: Modellbeschreibung/Fachtechnik, Kapitel 11.

## 2.5 Systemelemente

Mit Hilfe der Systemelemente werden in KOSIM die für die Simulation relevanten, realen Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet nachgebildet. Unterschieden wird zwischen Gebietselementen, Verbindungselementen und Speicherbauwerken.

### 2.5.1 Gebiete

Jedem Gebiet können beliebig viele Flächen zugeordnet werden. Hinzu kommt der Trockenwetterabfluss.

#### 2.5.1.1 Gebietsflächen

Die Flächenkomponenten sind maßgebend für den Regenwasserabfluss. In KOSIM wird unterschieden zwischen

- ◆ befestigten Flächen,
- ◆ teilbefestigten Flächen,
- ◆ unbefestigten Flächen und
- ◆ natürlichen Flächen.

#### Abflussbildungseigenschaften und Regenwasserverschmutzung

Die Abflussbildungseigenschaften der Flächen und die Regenwasserverschmutzung können definiert werden. Die Definition erfolgt in Parametersätzen, die mit beliebig vielen Flächen verknüpft werden können, so dass lediglich die mindestens notwendige Zahl an Parametersätzen zu definieren ist.

Die Verschmutzung des Regenwassers von befestigten und teilbefestigten Flächen kann als konstant oder variabel angesetzt werden. Über eine jährlich von der befestigten Oberfläche abgespülten Schmutzfracht kann eine konstante Verschmutzungskonzentration oder eine auf Grundlage von Akkumulations- und Abtragsprozessen variable Schmutzfracht berechnet werden. Die Abflüsse von unbefestigten und natürlichen Flächen werden als konstant angenommen.

#### 2.5.1.2 Trockenwetterabfluss aus Gebieten

Der Trockenwetterabfluss eines Gebietes setzt sich aus Schmutz- und Fremdwasserabfluss zusammen. Der Schmutzwasserabfluss kann zyklischen Schwankungen unterliegen.

In KOSIM werden diese Schwankungen mit Hilfe von Perioden nachgebildet, die zusammengesetzt werden aus

- ◆ Tagesganglinien (für alle Wochentage einheitlich oder verschieden)
- ◆ Jahresganglinien.

Im Laufe der Simulation wird der Schmutzwasserabfluss jeweils mit dem Faktor multipliziert, der sich aus der Periode ergibt.

### **Trockenwetterverschmutzung**

Die mittlere Verschmutzung des Trockenwetterabflusses kann angegeben werden über:

- ◆ Einwohnerequivalente [g/(EGW\*d)]
- ◆ Tagesfracht [kg/d]
- ◆ Trockenwetterkonzentration [mg/l]

Damit können häuslicher und gewerblicher Schmutzwasseranfall sowie Messdaten gleichermaßen gut verarbeitet werden.

### **Parametersatz Trockenwetter-Gebietsabflussspende**

- ◆ Die periodischen Komponenten,
- ◆ der Wasserverbrauch,
- ◆ die Fremdwasserspende und
- ◆ die Verschmutzung

werden im Parametersatz Trockenwetter-Gebietsabflussspende definiert und können mit beliebig vielen Gebieten verknüpft werden, so dass gebietsübergreifend identische Spenden mit individuellen Gebietsmerkmalen verknüpft werden können.

**2.5.1.3 Einzeleinleiter**

Einzeleinleiter (z. B. Indirekteinleiter) können Trockenwetterabflüsse in das Entwässerungssystem emittieren. Dazu gehören Schmutz- und Fremdwassereinleitungen, die mit periodischen Komponenten beaufschlagt sein können. Die periodischen Komponenten werden als Parametersatz definiert und dem Einzeleinleiter zugeordnet.

**2.5.1.4 Einzelflächen**

Es können beliebig viele Einzelflächen definiert werden, die mit einem Parametersatz verbunden Regenabflüsse in das Entwässerungssystem liefern.

**2.5.2 Verbindungselemente**

Die berechneten Abflüsse der Gebiete werden den Bauwerken entweder direkt oder über Verbindungselemente zugeführt. Als Verbindungselemente werden i.d.R. nur die größeren Sammler berücksichtigt. Nebenstränge werden über das Fließzeitverhalten bei den Flächen nachgebildet. Unterschieden wird zwischen

- ◆ Transportelementen mit beliebig vielen Vorgängern und genau einem Nachfolger, und
- ◆ Verzweigungen, mit beliebig vielen Vorgängern und genau zwei Nachfolgern.

Die Transportelemente werden je Berechnungsart unterschieden zwischen

- ◆ Transportstrecken (Berechnung mit konstanter Fließzeit oder mit Kalinin-Miljukov-Verfahren)
- ◆ Haltungen (Berechnung mit Kalinin-Miljukov-Verfahren)
- ◆ Verbindungen (Fließzeit=0)

Für Transportstrecken und Haltungen kann mit dem Kalinin-Miljukov-Verfahren mit einem von einem Speicherbauwerk ausgehenden hydrostatischen Einstau des Verbindungselementes gerechnet werden.

### 2.5.3 Speicherbauwerke

In Anlehnung an das Arbeitsblatt A 128 können in KOSIM folgende Bauwerkstypen berücksichtigt werden:

- ◆ Regenüberlauf (RUE)
- ◆ Fangbecken im Hauptschluss (FBH)
- ◆ Fangbecken im Nebenschluss (FBN)
- ◆ Durchlaufbecken im Hauptschluss (DBH)
- ◆ Durchlaufbecken im Nebenschluss (DBN)
- ◆ Stauraumkanal mit untenliegender Entlastung (SKUE)
- ◆ Stauraumkanal mit obenliegender Entlastung (SKOE)

Als dezentrale Bewirtschaftungselemente können berücksichtigt werden:

- ◆ Mulden
- ◆ Rigolen
- ◆ Regenwassernutzungsanlagen

Als zentrale Bewirtschaftungselemente können berücksichtigt werden:

- ◆ Regenrückhaltebecken
- ◆ Regenwasserbehandlungsanlagen

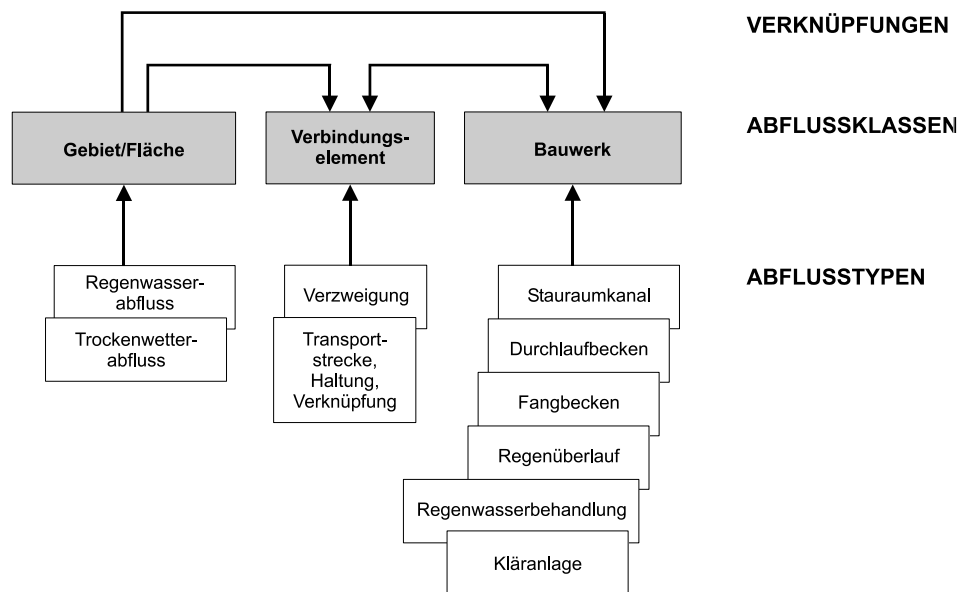
## 2.6 Übergeordnete Abflussklassen, Abflusstypen und Objekte

Analog zu den unter 2.5 aufgezeigten Modellkomponenten wurden die folgenden übergeordneten Abflussklassen definiert:

- ◆ Gebiete
- ◆ Verbindungselemente
- ◆ Bauwerke

Diese Abflussklassen stehen gleichberechtigt nebeneinander. Jeder Abflussklasse ist eine bestimmte Anzahl von Abflusstypen zugeordnet; diesen wiederum die einzelnen Systemelemente, die als eigenständige Objekte erfasst und gespeichert werden. Beliebig viele Abflussobjekte können einem Abflusstyp zugeordnet werden. Die Objekte der drei Abflussklassen können nicht beliebig miteinander verknüpft werden.

Die Abb. 2-1 beschreibt Gesamtstruktur und zulässige Verknüpfungen für die Simulation von Mischwasserentlastungen und Regenwasserbehandlungsanlagen wie sie in KOSIM-MW + XL zur Verfügung stehen. Einzeleinleiter sind wie Gebiete einzuordnen.



**Abb. 2-1** Abflussklassen, Abflusstypen und zugeordnete Objekte

Analog zur Abb. 2-1 stehen in KOSIM-RW + XL Mulden-Rigolen-Systeme, Regenwassernutzungsanlagen und Regenrückhaltebecken als Abflusstypen/Bauwerk zur Verfügung.

### Parameter für Flächen und Trockenwetterabflüsse

Für die Objekte der Abflussklassen "Verbindungselemente" und "Bauwerke" werden Objekteigenschaften unmittelbar im Datensatz des jeweiligen Objekts erfasst.

Für die Abflussklasse "Gebiete" ergibt sich eine komplexere Datenstruktur:

- ◆ Je Gebiet sind n Flächen möglich.
- ◆ Eigenschaften der Flächen und Trockenwetterabflüsse (Gebiet und Einzeleinleiter) werden durch Parametersätze festgelegt.

### Überregnung

Jedem Gebiet kann max. ein Regenschreiber zugeordnet werden. Somit wird jedes einzelne Gebiet gleichmäßig überregnet. Wenn Sie allen Gebieten denselben Regenschreiber zuordnen, wird das Gesamtgebiet gleichmäßig überregnet. Um das Gesamtgebiet ungleichmäßig überregnen zu lassen, ordnen Sie verschiedenen Gebieten unterschiedliche Regenschreiber zu.

Die folgende Darstellung veranschaulicht die oben beschriebene Struktur.

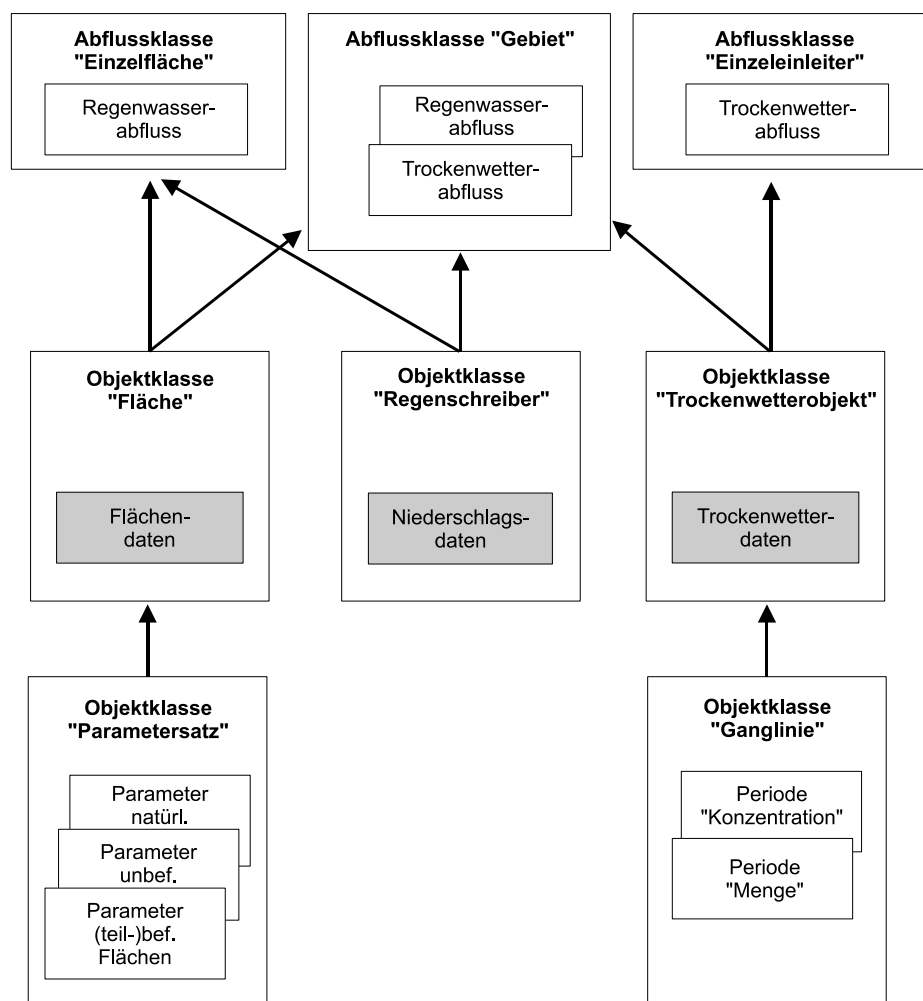


Abb. 2-2 Struktur in KOSIM

## 2.7 Historie

### 2.7.1 Neuerungen der Programmversion 7.3

Die Version KOSIM 7.3 enthält gegenüber der Vorgängerversion KOSIM 7.2 folgende wesentliche Neuerungen:

#### **Mehrfachzuweisung von Werten**

KOSIM 7.3 bietet zwei neue Wege, beliebig vielen Objekten gleichen Typs bestimmte Werte gleichzeitig zuzuweisen. Dies kann die Datenerfassung erheblich beschleunigen. Innerhalb von KOSIM steht ein Dialog zur Mehrfachzuweisung zur Verfügung. Alternativ können KOSIM-Daten über die neue \*.idbf-Schnittstelle in eine Datenbank exportiert, in einer Fremdanwendung - wie z. B. Microsoft ACCESS - bearbeitet, und wieder eingelesen werden.

#### **Umfang der Ergebnisdaten individuell bestimmen**

Über die Programmeinstellungen kann KOSIM so konfiguriert werden, dass zusätzliche Ergebnisdateien automatisch erzeugt werden. Der Umfang der Ergebnisausgabe lässt sich aber auch einschränken. Z. B. kann die HTML-Schnellansicht abgeschaltet werden, oder die Ausgabe der Einstauereignisse lässt sich unterdrücken. So kann die Ergebnisausgabe in KOSIM besonders für sehr große Systeme deutlich beschleunigt und somit die Rechenzeit verringert werden.

#### **Neuer Lizenzassistent**

Ein neuer Lizenzassistent unterstützt und vereinfacht jetzt die Lizenzierung des Programms. Der Assistent wird in identischer Form auch von anderen, neuen itwh-Anwendungen genutzt.

#### **Sonstiges**

- ◆ Die Tabellenansicht lässt sich jetzt auch nach Bezeichnungen (Objektnamen) filtern und sortieren.
- ◆ Der Transportalgorithmus zur Retentionsberechnung nach dem Kalinin-Miljukov-Verfahren wurde für Transportelemente, die eine hohe Anzahl an internen Berechnungsabschnitten erfordern (z. B. steile Transportelemente), erweitert.
- ◆ Für Regenschreiber können relative Pfade angegeben werden. Das erleichtert die Weitergabe eines Projektes.

- ◆ Die Anordnung der Systemgrafik in Fließrichtung wurde überarbeitet.
- ◆ Im Batchbetrieb können neue Parameter für die Datumsangabe genutzt werden. So können - unabhängig vom definierten Simulationszeitraum in der Projektdatei - ausgewählte Ereignisse berechnet werden.
- ◆ Der Drosselabfluss von Bauwerken kann jetzt auch extern, mit Hilfe von itwh CONTROL gesteuert werden.

### **2.7.2 Neuerungen der Programmversion 7.2**

Die Version KOSIM 7.2 enthält gegenüber der Vorgängerversion KOSIM 7.1 folgende wesentliche Neuerungen:

#### **Neuer Betriebsmodus [Systemoptimierung]**

KOSIM 7.2 unterstützt das neue Modul "Systemoptimierung". Dieses Modul stellt den gleichnamigen Betriebsmodus zur Verfügung und ermöglicht die Optimierung eines definierten Systems, sowohl in KOSIM-MW, als auch in KOSIM-RW oder XL. Es stehen die Verfahren "Optimierung" und "Sensitivitätsuntersuchung" zur Verfügung, die wahlweise aufgerufen werden können. Mit dem Verfahren "Sensitivitätsuntersuchung" wurde die alte Funktionalität des Programms SENSOR für KOSIM 6 wieder aufgegriffen und für eine bessere Handhabung überarbeitet. Weitere Einzelheiten zu den Prinzipien von Optimierung und Sensitivitätsuntersuchung finden Sie Kapitel 2.4.3. Die Modi-Philosophie in KOSIM bleibt insgesamt erhalten. D. h. die Definition des Systems und die Nachweis-Simulation erfolgen im Modus [Nachweis]. Die Modi [Fiktives Zentralbecken], [Bemessung] und [Systemoptimierung] stellen jeweils eine an die Aufgabe angepasste Sicht auf die Daten zur Verfügung und ermöglichen die entsprechenden Berechnungen. Die Ergebnisse der Optimierung werden über den Berichtsassistenten ausgegeben. Für die Sensitivitätsuntersuchung wird eine grafische Darstellung der Ergebnisse im Diagramm oder wahlweise in Tabellenform aufgerufen.

#### **Visualisierung von statischem Kanalstauvolumen**

In KOSIM ist die Berücksichtigung von hydrostatischem Einstau ("Rückstau") in Transportstrecken oder Haltungen ausgehend von Speicherbauwerken möglich. Um dem Anwender einen besseren Überblick über das Rückstauverhalten zu ermöglichen, können jetzt für Speicherbauwerke, die mit Rückstau definiert sind, Längsschnittdarstellungen aufgerufen werden. Sie zeigen in einem separaten Dialog den Längsschnitt des aktiven Bauwerks und aller rückwärts angeordneten Transportelemente mit Rückstau.

**Sonstiges**

- ◆ Einstau-Ereignisse lassen sich mit Hilfe der entsprechenden KOSIM-Ergebnisberichte auswerten. Zusätzlich können sie jetzt durch Setzen eines entsprechenden Schalters zur Weiterverarbeitung in anderen Anwendungen in den Formaten CSV oder TXT ausgegeben werden.
- ◆ Beispieldateien werden jetzt beim ersten Programmstart in das jeweilige Benutzerprofil kopiert. Der frühere Speicherort - das Programmverzeichnis - ist unter Windows Vista aufgrund der Standard-Sicherheitseinstellungen nicht für alle Benutzer freigegeben, so dass mit den Beispieldateien dort nicht gearbeitet werden konnte.
- ◆ Im Menü [Ansicht] steht eine neue Funktion zur Verfügung, die das aktuelle Element in der Fokus rückt. Wenn Sie die Systemgrafik z. B. stark vergrößern und mit der Übersichtsfunktion verschieben, verschwindet unter Umständen das aktuelle Element aus dem sichtbaren Bereich. Die neue Funktion erspart Ihnen das Wiederauffinden innerhalb der Grafik.

**2.7.3 Neuerungen der Programmversion 7.1**

Die folgende Stichwortliste gibt Ihnen einen kurzen Überblick über die Änderungen von KOSIM 7.1 gegenüber den Vorgängerversionen KOSIM 6.3 und älter.

**Bedienung**

- ◆ Das Programm hat eine vollständig überarbeitete Oberfläche.
- ◆ Ein Ersatzsystem wird über die Systemgrafik in Verbindung mit dem Eigenschaftsfenster definiert. Dialoge entfallen weitgehend.
- ◆ Vorbelegungen werden in der Baumansicht ausgewählt und im Eigenschaftsfenster bearbeitet. Entsprechende Dialoge entfallen weitgehend.
- ◆ Verbindungen zwischen zwei Elementen (Zulauf, Drosselabfluss und Überlauf) werden per Maus durch Ziehen einer Linie in der Systemgrafik definiert und anschließend im Eigenschaftsfenster bearbeitet.
- ◆ Die Systemgrafik kann gedruckt und/oder als Grafikdatei in verschiedenen Formaten gespeichert werden.
- ◆ Für jedes Berechnungsverfahren gibt es einen eigenen Betriebsmodus mit einer an die jeweilige Aufgabe angepassten Sicht auf die Daten.

### DV-Technik

- ◆ Als Altdaten werden nur noch Daten von KOSIM 6 unterstützt.
- ◆ Die Zusammenarbeit mit SENSOR 1.0 wird nicht unterstützt (die Funktionalität von SENSOR soll in einer späteren Programmversion in KOSIM integriert werden).
- ◆ Es gibt nur noch eine Ausgabedatei, die alle Ergebnisse enthält und diese für Auswertungen zur Verfügung stellt.
- ◆ Ergebnisse können im Browser ausgewertet werden (HTML-Schnellansicht) oder lassen sich im PDF-Format für die Druckausgabe speichern.

### Fachtechnik

- ◆ Elemente wurden überarbeitet bzw. ergänzt:
- ◆ Einführung des Elementes Einzeleinleiter zur expliziten Berücksichtigung von Starkeinleitern (z. B. Fabriken)
- ◆ Gebiete (mit untergeordneten Flächen) und Einzelflächen können parallel berücksichtigt werden
- ◆ Umbenennung des Elementes EXTRAN-Knoten in Schacht
- ◆ Einführung des Elementes Knoten (neues Element)
- ◆ Einführung der Kläranlage (neues Element)
- ◆ Optionale Berücksichtigung des hydrostatischen Einstaus in Transportstrecken oder Haltungen ausgehend von Speicherbauwerken
- ◆ Hydrologische Abfluss-Transport-Berechnung in Transportstrecken und Haltungen mit einem modifizierten Kalinin-Miljukov-Verfahren
- ◆ Schmutzfrachtberechnung mit der Berücksichtigung von Akkumulations- und Abtragsprozessen mit vordefinierten oder benutzerdefinierten Parametersätzen
- ◆ Optionale Abflusskonzentrationsberechnung mit proportional zum Abflussgeschehen variablen Speicherkonstanten
- ◆ Parametrisierung des A 128

### Vertrieb

- ◆ Es gibt nur noch zwei Grundmodule: RW (Regenwasser - früher MRS und RRB), MW (Mischwasser).

#### 2.7.4 Neuerungen der Programmversion 6.3

Mit der Programmversion 6.3 werden neben der Programmpflege im Wesentlichen Vorgaben aus dem ATV-DVWK-Regelwerk umgesetzt. Das Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 117 im Weißdruck von 2001 wird ebenso berücksichtigt wie das Merkblatt ATV-DVWK-M 177 von 2001.

Bei der Bemessung von Regenrückhaltebecken, Mulden und Rigolen wird demnach eine neue Formel zur Abschätzung der Wiederkehrzeit zugrundegelegt (vgl. Gleichung 10-1 in Kapitel 10, sowie ATV, 2001 a), Seite 24).

Bei Mischwasserbauwerken erfolgt die Erhöhung der entlasteten Schmutzfracht bei vorgelagertem statischen Kanalstauvolumen in Fangbecken anteilig über den Volumenanteil, der wie ein Stauraumkanal mit untenliegender Entlastung wirkt. Somit können jetzt auch Stauraumkanäle mit mittiger Entlastung berücksichtigt werden. Für Durchlaufbecken wird gemäß ATV-DVWK-M 177 vorab über den Nachweis der Klärbedingung (vgl. ATV, 2001 b), Kapitel 4.2.2 bis 4.2.7) geprüft, ob eine Erhöhung der entlasteten Schmutzfracht erforderlich ist.

Das mittlere Mischverhältnis  $m$  wird in KOSIM 6.3 gemäß ATV-DVWK-M 177 berechnet (vgl. ATV, 2001 b), Kapitel 5.5).

Bei der Ergebnisausgabe für Mischwasserbauwerke wird in KOSIM 6.3 ebenfalls das ATV-DVWK-M 177 berücksichtigt. Danach werden für Überlaufereignisse jetzt auch die Anzahl der Kalendertage mit Einstau und Überstau ausgewiesen (vgl. ATV, 2001 b), Kapitel 5.7.4).

## 3 Die KOSIM-Installation

### 3.1 Hinweise zur Installation

Mit der Installationsroutine `setup.exe` installieren Sie KOSIM auf Ihrem PC. Die Installationsdatei liegt im Hauptverzeichnis der Programm-CD.

Erläuterungen zu den Installationsschritten liefert Ihnen der Installationsdialog selbst. Folgen Sie den Angaben in diesem Dialog. Eine Zusammenfassung der Installationsschritte finden Sie auch im CD-Heft der Programm-CD.

### 3.2 Verzeichnisse

KOSIM wird grundsätzlich lokal auf einem Einzelplatzrechner installiert. Dies trifft auch zu, wenn Sie das Programm für den Netzbetrieb lizenzieren möchten.

Bei der Installation werden standardmäßig folgende Verzeichnisse angelegt:

- ◆ Ein übergeordnetes Basisverzeichnis für Anwendungen des **itwh**  
Vorgabe ist: `... \Programme \ITWH`  
Ggf. ist dieses Verzeichnis schon vorhanden, wenn bereits **itwh**-Anwendungen installiert sind.
- ◆ Das KOSIM-Programmverzeichnis  
Vorgabe ist:  
`... \Programme \ITWH \KOSIM <Versionsnummer>`  
Das Programmverzeichnis wird, ebenso wie die Programmverzeichnisse für andere **itwh**-Anwendungen, im übergeordneten Verzeichnis angelegt, sein Name wird automatisch vergeben.
- ◆ Verzeichnis für den Programmstart und die Dokumentation im PDF-Format (Anwendungsbeispiele zur Einarbeitung und Modellbeschreibung)  
Vorgabe ist das ...  
`START-Menü \Programme \ITWH`
- ◆ Verzeichnis für die Konfigurationsdatei und die Vorbelegungen  
Vorgabe (unter Windows XP) ist:  
`C:\Dokumente und Einstellungen\<Benutzername>\Anwendungsdaten\itwh\Kosim\<Versionsnummer>`  
Die hier abgelegten Dateien werden beim ersten Programmstart in dieses Verzeichnis kopiert und werden vom Programm auch immer an dieser Stelle erwartet.

- ◆ Verzeichnis für die Einzelplatz-Lizenzierung des Programms  
Vorgabe unter Windows XP ist:  
`C:\Dokumente und Einstellungen\All Users\Anwendungsdaten\itwh\KOSIM\<Versionsnummer>`  
Vorgabe unter Windows Vista ist:  
`C:\ProgramData\itwh\KOSIM\<Versionsnummer>`  
Verwenden Sie zur Lizenzierung unbedingt den eingebauten Lizenzassistenten, den Sie über das Menü [Extras] starten. Rufen Sie bei Bedarf innerhalb des Assistenten die eingebundene Online-Hilfe auf.
- ◆ Verzeichnis für die mitgelieferten Beispieldateien  
Vorgabe (unter Windows XP) ist:  
`C:\Dokumente und Einstellungen\<Benutzername>\Eigene Dateien\KOSIM <Versionsnummer>\Beispiel`  
Beispieldateien, die im Dateinamen das Wort "Demo" enthalten, können verwendet werden, solange KOSIM im Demobetrieb läuft, d. h. auch bereits direkt nach der Installation. Alle anderen Beispieldateien lassen sich erst aufrufen, wenn KOSIM bereits lizenziert wurde. Die PDF-Datei zur Einarbeitung (Anwendungsbeispiele), die Sie über das START-Menü aufrufen, nimmt auf die mitgelieferten Beispieldateien Bezug.

### 3.3 KOSIM deinstallieren

Sie entfernen KOSIM mit Hilfe der Windows Deinstallationsroutine:

1. Wählen Sie über das START-Menü (unter Windows XP):  
[Einstellungen]-[Systemsteuerung]-[Software].
2. Wählen Sie in der angezeigten Software-Liste den Programmeintrag (z. B. itwh KOSIM 7.2) und starten Sie die Deinstallation über die Schaltfläche [Entfernen...].

Lizenzierungsdateien aus dem Verzeichnis für die Lizenzierung (vgl. Kapitel 3.2) werden nicht automatisch entfernt. D. h. das eine bereits vorhandene Lizenzdatei noch lauffähig ist, auch wenn Sie das Programm z. B. von einer Patch-CD neu installieren müssen. Bei Bedarf löschen Sie die Lizenzierungsdateien manuell.



---

## **Teil 2:**

### **Modellbeschreibung/Fachtechnik**

## 4 Simulation periodischer Trockenwetterprozesse

Über die Trockenwetterabflüsse liegen in der Regel relativ genaue Kenntnisse vor. Sie lassen sich messtechnisch leicht erfassen. Kenntnisse über die Abflussqualität (Verschmutzungskonzentration) liegen in der Regel nur für den Kläranlagenzu-  
lauf vor. Die Ermittlung der Abflussqualität von Teilsystemen ist möglich, jedoch mit Kosten verbunden. Größere Indirekteinleiter im Entwässerungsnetz können allerdings ortsspezifische Untersuchungen der Verschmutzungskonzentrationen des Trockenwetterabflusses erforderlich machen. Periodische Schwankungen sind durch das Verhalten der Emittenten bedingt und sollten berücksichtigt werden.

### 4.1 Schmutzwasser

KOSIM ermöglicht es

- ◆ tagesperiodische Schwankungen in einer Diskretisierung von Stunden (für alle Wochentage gleich oder verschieden)
- ◆ jahresperiodische Schwankungen in einer Diskretisierung von Tagen

getrennt für den Abfluss und die Fracht zu verarbeiten. Hierzu können Perioden definiert werden bzw. sind bereits vorgelegt. Alle Ganglinien sind Relativganglinien, die Schwankungen um einen Mittelwert beschreiben. Die Summe der Ganglinienordinaten muss also der Anzahl der Ordinaten entsprechen, für eine Tagesganglinie z. B. 24. Damit schwanken die Ordinaten um Eins.

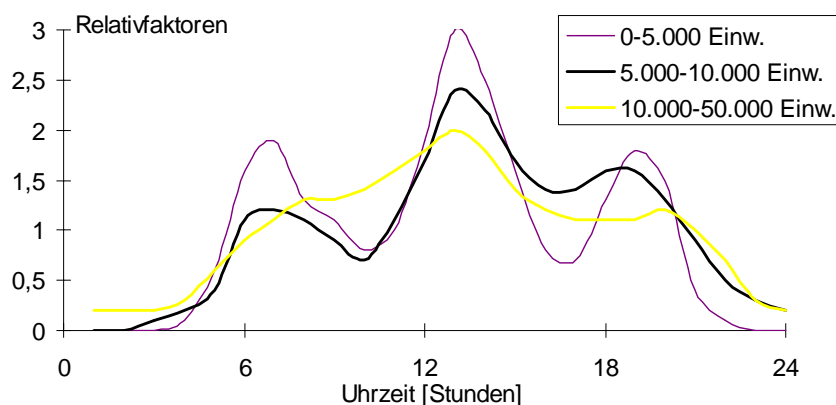
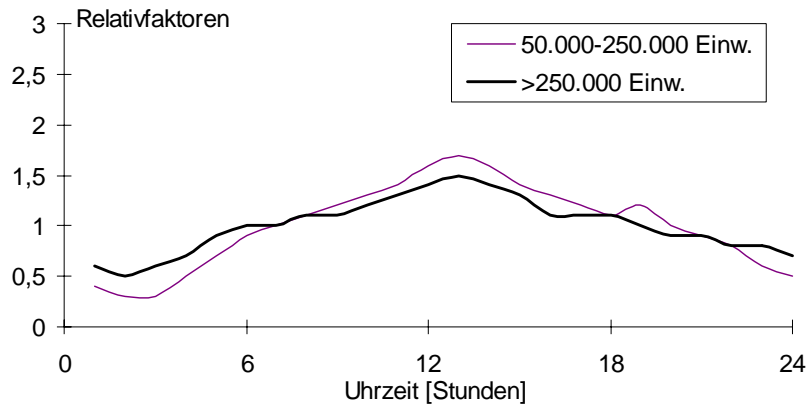


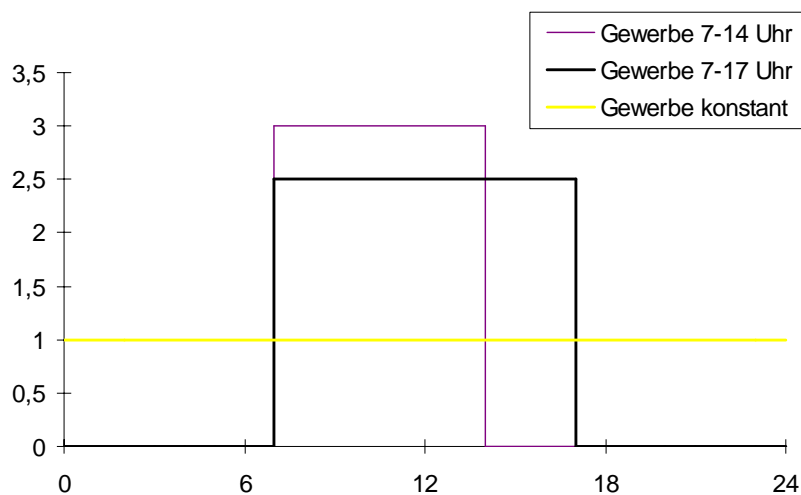
Abb. 4-1 Schmutzwassertagesganglinie nach der ATV, Teil 1



**Abb. 4-2** Schmutzwassertagesganglinie nach der ATV, Teil 2

Bei der Definition von Perioden können für jeden Wochentag verschiedene Tagesganglinien angegeben werden.

Das Produkt aus den aktuellen Ganglinienordinaten und dem jahresbezogenen Mittelwert ergibt den aktuellen Durchfluss bzw. die Frachtwerte.



**Abb. 4-3** Schmutzwassertagesganglinie für Gewerbebetrieb

Die Berechnung erfolgt für den Durchfluss und die Stoffgröße unabhängig, d.h. für die Stoffgrößen können unterschiedliche Ganglinien angegeben werden.

## **4.2 Fremdwasser**

Der Fremdwassereintrag hängt vom Sanierungszustand des Kanalnetzes ab. An brüchigen Stellen und Verbindungsmuffen der Rohre sickert Grundwasser oder versickertes Niederschlagswasser zu.

In KOSIM kann Fremdwasser als konstanter Zuschlag zum mittleren Schmutzwasserabfluss eingegeben werden. Das Fremdwasser ist in diesem Fall konstant und unterliegt keinen periodischen Schwankungen.

Fremdwasser wird in der Regel als unverschmutzt angenommen. Beim Einsatz von KOSIM ist zu beachten, dass die eingegebenen Verschmutzungsgrößen für den Trockenwetterabfluss, also Schmutzwasser und Fremdwasser, gelten. Für die Eingabe in [kg/Ed] oder [kg/d] hat das keine Bedeutung. Für eine Eingabe in [mg/l] bedeutet dies jedoch, dass der gesamte Trockenwetterabfluss mit dieser Verschmutzungskonzentration beaufschlagt wird, der Wert also einem Messwert der Trockenwetterkonzentration entspricht.

Messungen in Kanalnetzen haben jedoch gezeigt, dass Fremdwasser periodischen Schwankungen unterliegen kann. Ursache hierfür ist der Wasserverbrauch von Pflanzen im Sommer. Der Fremdwasseranfall ist im Sommer gering und im Winter hoch. In KOSIM kann dieser Effekt durch das Zuweisen einer eigenen Periode berücksichtigt werden.

### 4.3 Berechnung des Trockenwetterabflusses

Die Berechnung der aktuellen Ordinate erfolgt mit Hilfe des Mittelwerts und den Relativfaktoren für die periodischen Schwankungen

$$q_{TW,t} = \overline{q_{TW}} \cdot C_{R,t} \quad \text{Gleichung 4-1}$$

mit  $\overline{q_{TW}}$  : mittlerer Trockenwetterabfluss

$q_{R,t}$ : aktueller Relativfaktor der Periode P mit Berücksichtigung der periodischen Komponenten für Tage (in Stunden), Wochen (für jeden Tag einzeln), sowie Jahren (in Tagen)

## 5 Abflussbildung

Bei der Langzeitsimulation ist der Abflussbildungsansatz eines Modells von besonderem Gewicht. Für die Berechnung des Abflusskontinuums ist die Ermittlung der abflusswirksamen Anteile von kleinen sowie großen Niederschlagsereignissen gleichermaßen von Bedeutung, da nicht nur die Abflusssummen einzelner Ereignisse, sondern auch die Anfangsbedingungen für nachfolgende Niederschlag-Abflussereignisse ermittelt werden müssen.

Grundsätzlich sind unterschiedliche Ansätze der Abflussbildung für

- ◆ (teil-)befestigte Flächen,
- ◆ unbefestigte Flächen und
- ◆ natürliche (land- und forstwirtschaftlich genutzte) Flächen

sinnvoll und üblich.

### 5.1 Niederschlagsbelastung

Der Niederschlag ist die Belastungsgröße eines urbanen Entwässerungssystems. Seiner genauen Erfassung hinsichtlich

- ◆ zeitlicher und
- ◆ räumlicher

Veränderlichkeit kommt erhebliche Bedeutung zu.

#### 5.1.1 Diskretisierung der Niederschlagszeitreihen

Niederschlag hat die Eigenschaft, innerhalb eines Ereignisses starken zeitlichen Veränderungen zu unterliegen. Diese Veränderungen wirken sich auch auf die folgenden Teilprozesse des Entwässerungsvorgangs aus und müssen daher bei der hydrologischen Berechnung berücksichtigt werden. Hierzu ist das Zeitintervall der Niederschlagsdaten hinreichend klein zu wählen. In KOSIM werden standardmäßig Niederschlagsdaten verwendet, die in 5-Minuten-Intervallen diskretisiert sind.

### 5.1.2 Länge der Niederschlagszeitreihen

Die starke Veränderlichkeit von Niederschlags- und Trockenphasen macht eine Kontinuumsimulation erforderlich.

Für die Kontinuumsimulation ist die Vorgabe eines entsprechenden Niederschlagskontinuums erforderlich. Dabei wird eine grundsätzliche Annahme getroffen: Wird ein ausreichend langer Zeitraum betrachtet, so wird das statistische Niederschlagsverhalten in der Zukunft genauso sein, wie es in der Vergangenheit war. Mit dieser Annahme ist es möglich, auf ein historisches Niederschlagsereignis zurückzugreifen (siehe Kapitel 2.4.2 "Belastungsdaten").

### 5.1.3 Ungleichmäßige Überregnung

Die gebräuchlichste Methode der Messung von Niederschlägen ist die Punktmessung. Aus den gemessenen Punktniederschlägen wird mit einem geeigneten Verfahren der Gebietsniederschlag berechnet. Das am häufigsten verwendete Verfahren ist die Annahme der flächenhaften, gleichmäßigen Verteilung des Punktniederschlags. Diese Annahme wird auch in KOSIM verwendet.

Das wesentliche Problem bei der Berechnung von Gebietsniederschlägen ist die starke räumliche und zeitliche Variabilität des Niederschlags. Die zeitliche Variabilität kann durch hinreichend kurze Aufzeichnungsintervalle berücksichtigt werden. Für urbane Gebiete bedeutet dies  $\Delta t \leq 5$  Minuten. Die räumliche Variabilität kann nur über flächendeckende Niederschlagsaufzeichnungen erfasst werden. Bleibt die räumliche Variabilität unberücksichtigt, kann dies den größten Unsicherheitsanteil bei der Niederschlag-Abfluss-Simulation darstellen.

In KOSIM kann die räumliche Variabilität dadurch berücksichtigt werden, dass je Gebiet ein Regenschreiber zugeordnet werden kann. Dabei wird von gebietsweise konstanter Überregnung ausgegangen. Einzelflächen, die keinem Gebiet zugeordnet sind, kann ebenfalls ein eigener Regenschreiber zugeordnet werden.

Lediglich in kleinräumigen Projektgebieten (z. B. kleiner als 10 ha) kann auf die Berücksichtigung der ungleichmäßigen Überregnung verzichtet werden. Für größere Projektgebiete wird empfohlen, ungleichmäßige Überregnung nach Möglichkeit zu berücksichtigen. In Gebieten mit einem räumlich sehr variablen Niederschlagsgeschehen (z. B. Steigungsregen) können sich u. U. erhebliche Einsparpotenziale ergeben, so dass neben erhöhter Planungssicherheit auch monetäre Aspekte für die ungleichmäßige Überregnung sprechen. Vor der Simulation sollte jedoch die Synchronität der Niederschlagszeitreihen geprüft werden.

#### 5.1.4 Räumliche Übertragbarkeit von Niederschlagszeitreihen

Immer wieder stellt sich die Frage, inwieweit für eine bestimmte Station vorhandene Niederschlagsdaten auf andere Örtlichkeiten übertragen und dort angewendet werden dürfen. Zwar kann sich die Niederschlagsdynamik, die nicht zuletzt wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis hat, auch bei Stationen mit gleicher mittlerer Jahresniederschlagssumme deutlich unterscheiden (Einfluss von unterschiedlichen klimatologischen und topographischen Verhältnissen), dennoch ist es i.d.R. zulässig, auf eine Station mit einer ähnlichen statistischen Kenngröße (z. B. mittlere Jahresniederschlagssumme und Regenspende) zurückzugreifen, wenn örtliche Niederschlagsreihen nicht verfügbar sind.

### 5.2 Befestigte Flächen

Die kontinuierliche Simulation der Abflussbildungsprozesse erfordert die Unterscheidung von

- ◆ Regenphase und
- ◆ Trockenphase.

#### 5.2.1 Regenphase

KOSIM enthält einen Abflussbildungsansatz nach der Grenzwertmethode. In der speziellen Art wurde dieser von PAULSEN [1987] entwickelt und von VERWORN/KENTER [1993] verbessert. PAULSEN leitet die Grenzwertmethode aus der Abflussprozentmethode ab.

Bei einsetzendem Niederschlag erfolgt zunächst die Benetzung der Oberfläche. Modelltechnisch wird diese Phase mit den Benetzungsverlusten beschrieben. In dieser Phase kommt es nicht zum Abfluss.

Nach dem Aufbrauchen der Benetzungsverluste erfolgt die Berechnung der abflusswirksamen Niederschläge durch die Multiplikation des Niederschlages eines Zeitintervalls mit einem konstanten Faktor, dem Abflussbeiwert.

$$A_i = \psi_e \cdot N_i$$

Gleichung 5-1

Mit der Erweiterung zur Grenzwertmethode verringern sich die abflusswirksamen Niederschläge um einen Anteil, der die Mulden füllt, die Muldenverluste.

$$A_i = \Psi_e \cdot (N_i - V_{m,i})$$

Gleichung 5-2

Während bei der Abflussprozentmethode zu jedem Zeitpunkt ein konstanter Abflussbeiwert wirksam ist, ist der Abflussbeiwert bei der Grenzwertmethode abhängig vom Niederschlagsgeschehen. Mit zunehmender Niederschlagssumme nimmt der aktuelle Abflussbeiwert e-funktional zu. Es werden folgende Parameter berücksichtigt:

- ◆ **V<sub>ben</sub>**  
Benetzungsverluste ( $V_{ben}$  in mm) werden als Schwellwert behandelt und am Anfang eines Regens vorweg von den Niederschlagsdaten abgezogen. Je nach Intensität des Regens kann sich dieser Abzug nur auf ein Berechnungsintervall beziehen oder sich über mehrere Intervalle erstrecken.
- ◆ **V<sub>muld</sub>**  
Nach Abdeckung der Benetzungsverluste wird bei anhaltendem Regen ein Muldenspeicher gefüllt. Maximal kann eine Regenhöhe von  $V_{muld}$  in mm gespeichert werden.
- ◆  **$\Psi_0$**   
Die Grenzwertmethode geht von der Modellvorstellung aus, dass zu Beginn der Muldenauffüllphase schon ein bestimmter Flächenanteil abflusswirksam ist. Dieser Flächenanteil wird mit  $\Psi_0$  (Anfangsabflussbeiwert) bezeichnet.
- ◆  **$\Psi_e$**   
Während der Muldenauffüllphase nimmt der abflusswirksame Flächenanteil beginnend mit  $\Psi_0$  zu, bis nach Abdeckung aller Muldenverluste ( $V_{muld}$ ) der Endabflussbeiwert  $\Psi_e$  erreicht wird. Insbesondere stellt der Endabflussbeiwert das Verhältnis von abflusswirksamer Fläche zu befestigter Fläche dar. Die Differenz  $1 - \Psi_e$  stellt Dauerverluste dar.

Bei der Bilanzierung des Benetzungsspeichers wird der Benetzungsspeicher in der Niederschlagsphase bis zu einem Maximalwert  $V_{ben}$  gefüllt:

$$VB_i = VB_{i-1} + \Delta N_i \quad \text{mit } VB_i \leq V_{ben} \quad \text{Gleichung 5-3}$$

$$\Delta N_i = \Delta N_i - (VB_i - VB_{i-1})$$

Der verbleibende Niederschlagsanteil  $\Delta N_i$  geht in die weitere Berechnung des Effektivniederschlags unter Berücksichtigung der Muldenverluste sowie der Anfangs- und Endabflussbeiwerte ein.

Für die weitere Herleitung kann die Benetzung außer Betracht bleiben. Unter der Annahme, dass die betrachtete Einzugsgebietsfläche vollständig zum Abfluss beiträgt, errechnet sich ein abflusswirksamer Niederschlagsanteil zum Zeitpunkt  $i$  eines Ereignisses als:

$$A_i = \psi_e \cdot N_i \quad \text{Gleichung 5-4}$$

Die Niederschlagshöhe wird lediglich um einen Anteil  $V_m$  (Verluste durch Muldenrückhalt) verringert. Hierfür wird ein e-funktionaler Ansatz gewählt:

$$V_{m,i} = V_{muld} \cdot (1 - e^{-c \cdot N_i}) \quad \text{Gleichung 5-5}$$

mit  $V_{m,i}$ : Muldenfüllung zum Zeitpunkt  $i$  ( $V_{m,i} \leq V_{Muld}$ )  
 $N_i$ : kumulative Niederschlagshöhe zum Zeitpunkt  $i$

$$A_i = N_i - V_{m,i} \quad \text{Gleichung 5-6}$$

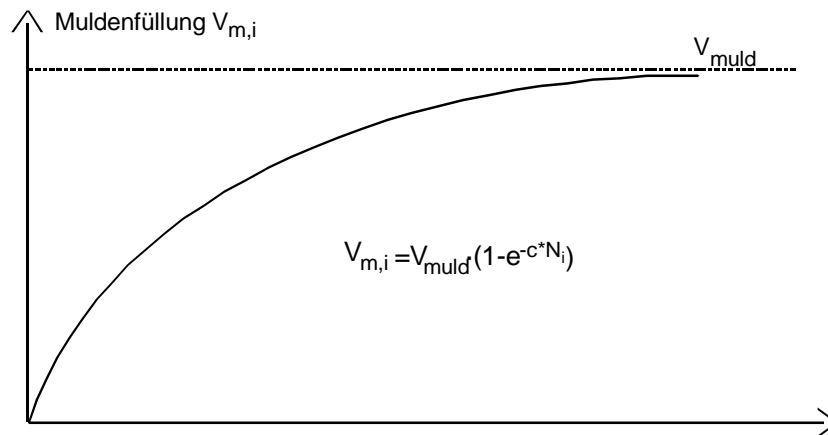


Abb. 5-1 Ansatz zur Muldenfüllung in Abhängigkeit der Niederschlagshöhe

Wird Gleichung 5-6 in Gleichung 5-5 eingesetzt, erhält man:

$$A_i = N_i - V_{muld} \cdot (1 - e^{-c \cdot N_i}) \quad \text{Gleichung 5-7}$$

Der Koeffizient  $c$  ist ein Maß für die Ausprägung des Muldenverlustverlaufes.

Das Wesen der Grenzwertmethode ist es, dass der Abflussbeiwert  $\Psi$  sich intervallweise ändert und durch den Differentialquotienten von Abfluss und Niederschlag beschrieben werden kann.

$$\Psi = \frac{d A}{d N} \quad \text{Gleichung 5-8}$$

Die Ableitung der Gleichung 5-7 nach  $N$  liefert:

$$\Psi = 1 - V_{muld} \cdot c \cdot e^{-c N_i} \quad \text{Gleichung 5-9}$$

Nunmehr lässt sich  $c$  bestimmen, wenn angenommen wird, dass bei Beginn der Muldenauffüllphase ein Anfangsabflussbeiwert  $\Psi_0$  wirksam ist; d.h.:

$$\Psi = \Psi_0 \quad \text{für } N = 0 \text{ liefert :} \quad \text{Gleichung 5-10}$$

$$\Psi_0 = 1 - V_{\text{muld}} \cdot c$$

Daraus folgt:

$$c = \frac{1 - \Psi_0}{V_{\text{muld}}} \quad \text{Gleichung 5-11}$$

Durch Einsetzen in Gleichung 5-9 und Umformung erhält man eine Funktion für den Abflussbeiwert:

$$\Psi = 1 - (1 - \Psi_0) e^{-c N_i} \quad \text{Gleichung 5-12}$$

Vorstehende Gleichungen gelten jeweils unter Verwendung der Niederschlagshöhe  $N_i$  seit Beginn des Ereignisses. Für eine kontinuierliche Simulation ist jedoch eine zeitschrittweise, rekursive Berechnung wünschenswert.

Hierfür wird der Muldenauffüllgrad  $e$  eingeführt. Nach Gleichung 5-5 gilt:

$$e_{m,i} = \frac{V_{m,i}}{V_{\text{muld}}} = 1 - e^{-c \cdot N_i} \quad \text{Gleichung 5-13}$$

Der Muldenauffüllgrad kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Er verändert sich entsprechend der Veränderung der Niederschlagshöhe von einem Intervall zum nächsten. Nach den Regeln der Exponentialrechnung gilt:

$$e^{-c \cdot (N_i + \Delta N)} = e^{-c \cdot N_i} \cdot e^{-c \cdot \Delta N_i} \quad \text{Gleichung 5-14}$$

Damit lässt sich der jetzt zum Zeitpunkt  $i + 1$  vorhandene Muldenauffüllgrad auch bestimmen zu:

$$\varepsilon_{m,i+1} = 1 - \left( e^{-c \cdot N_i} \cdot e^{-c \cdot \Delta N_i} \right) \quad \text{Gleichung 5-15}$$

Aus Gleichung 5-15 erhält man

$$e^{-c \cdot N_i} = 1 - \varepsilon_{m,i} \quad \text{Gleichung 5-16}$$

und kann Gleichung 5-15 damit so schreiben, dass der Muldenauffüllgrad sich rekursiv aus dem Niederschlag  $\Delta N$  berechnen lässt:

$$\varepsilon_{m,i+1} = 1 - (1 - \varepsilon_{m,i}) \cdot e^{-c \cdot \Delta N_i} \quad \text{Gleichung 5-17}$$

Es ist wünschenswert, die Arbeitsgleichung für den abflusswirksamen Niederschlag gemäß Gleichung 5-15 ebenfalls zeitschrittweise anzuwenden, wobei die Größe des Zeitschrittes beliebig sein sollte.

Dies lässt sich erreichen, indem man die Abflussbeiwertfunktion (Gleichung 5-8) über den Niederschlag des Zeitschrittes integriert:

$$\Delta A_i = \int_{N=N_{i-1}}^{N=N_i} \psi(N) dN \quad \text{Gleichung 5-18}$$

Setzt man für  $\Psi(N)$  die Gleichung 5-12 ein, so ergibt sich die integrale Form des Abflussbildungsansatzes:

$$\Delta A_i = \Delta N_i - V_{\text{muld}} \cdot \left( e^{-c N_{i-1}} - e^{-c N_i} \right) \quad \text{Gleichung 5-19}$$

Der Klammerausdruck kann durch die entsprechenden Muldenauffüllgrade ersetzt werden und man erhält eine rekursive Arbeitsgleichung.

$$\Delta A_i = \Delta N_i - V_{\text{muld}} \cdot (\varepsilon_{m,i} - \varepsilon_{m,i-1}) \quad \text{Gleichung 5-20}$$

Für die Herleitung von Gleichung 5-20 ist angenommen worden, dass für die Abflussfläche nur Benetzungsverluste (Vorwegabzug) und Muldenverluste auftreten. Insbesondere werden keine Dauerverluste berücksichtigt. Dauerverluste werden sinnvoll durch einen Endabflussbeiwert  $\Psi_e$  beschrieben, der wiederum als Anteil der abflusswirksamen Fläche  $A_{u\text{-eff}}$  an der Gesamtfläche  $A_u$  interpretiert werden kann.

Es gilt somit:

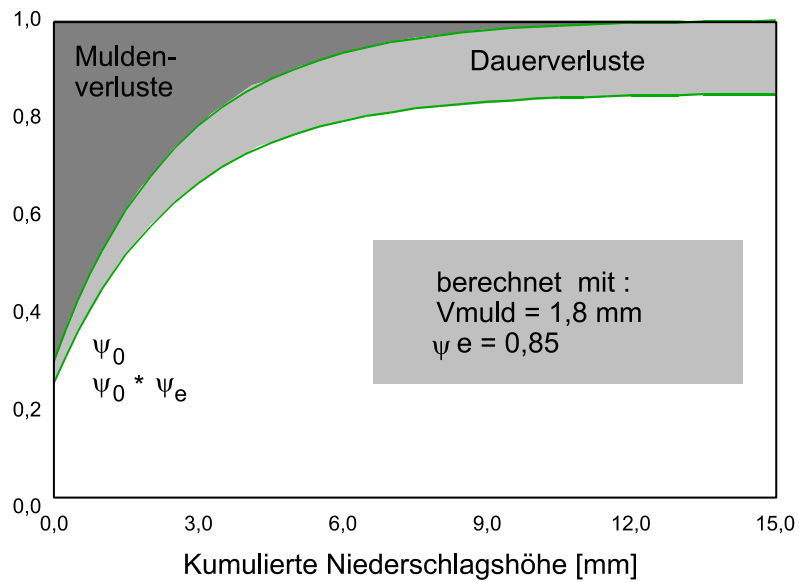
$$Q = A_u \cdot \Psi_e = A_{u\text{-eff}} \cdot 1 \quad \text{oder} \quad \Psi_e = A_{u\text{-eff}} / A_u \quad \text{Gleichung 5-21}$$

Zur Berücksichtigung von Dauerverlusten muss Gleichung 5-20 wie folgt lauten:

$$\Delta A_i = \Psi_e [\Delta N_i - V_{\text{muld}} (\varepsilon_{m,i} - \varepsilon_{m,i-1})] \quad \text{Gleichung 5-22}$$

Der aktuelle Muldenauffüllgrad wird nach Gleichung 5-17 berechnet.

Abflussbeiwert  $\psi$



**Abb. 5-2** Verlauf des Abflussbeiwertes  $\psi$  mit und ohne Dauerverluste bei konstantem Niederschlagsverlauf (VERWORN/KENTER [1993])

### 5.2.2 Trockenphase

Der Rückgang der Flächenbefeuchtung sowie die Muldenentleerung wird als Speicherproblem behandelt. In der Niederschlagsphase werden die Speicher durch Benetzung und Muldenauffüllung gefüllt, durch Verdunstung erfolgt ihre Entleerung.

Die potentielle (energetisch mögliche) Verdunstung  $\Delta h_v$  ist zeitlich und örtlich sehr unterschiedlich und einer genauen Berechnung nur schwer zugänglich. Vereinfachend wird ein mittlerer Jahresgang der täglichen Verdunstungsrate zugrunde gelegt:

$$\Delta h_{v,i} = \left[ \frac{7}{9} \cdot \sin \left( 2\pi / 365 \cdot \{i - 91\} \right) + 1 \right] \cdot \frac{\bar{h}_v}{365} \quad [\text{mm} / \text{d}]$$

Gleichung 5-23

mit  $i$ : laufender Tag des Abflussjahres (1. Januar:  $i = 1$ )  
 $\bar{h}_v$ : mittlere jährliche potentielle Verdunstungshöhe [mm/a]  
 $\Delta h_{v,i}$ : aktuelle Verdunstungshöhe in mm

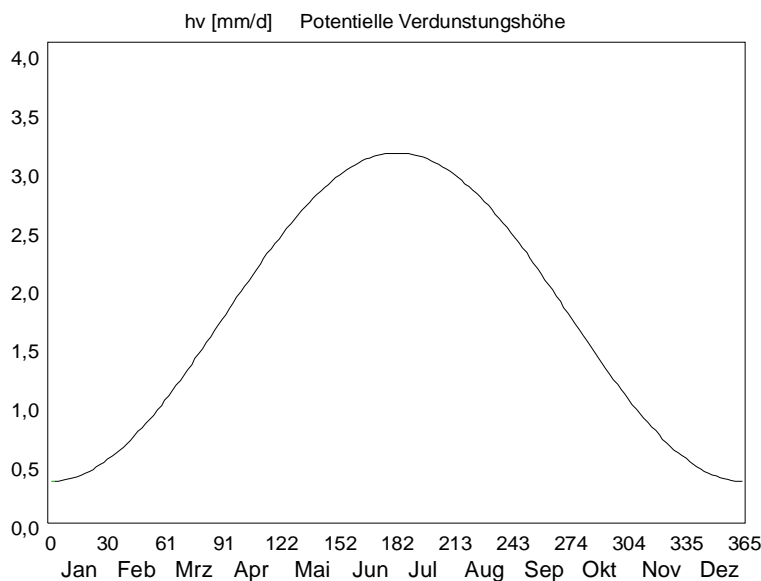
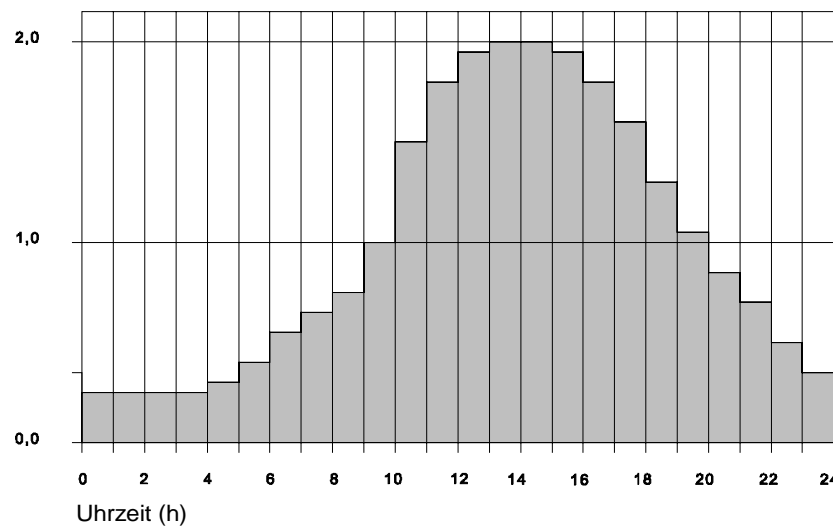


Abb. 5-3 Jahresgang der potentiellen Verdunstung

In Abb. 5-3 ist dieser Jahresgang graphisch dargestellt. Die mittlere jährliche potentielle Gesamtverdunstungshöhe beträgt in Deutschland ca. 657 mm, kann jedoch vom Anwender verändert werden. Der Berechnung der Verdunstung für jedes Zeitintervall liegt zusätzlich ein mittlerer Tagesgang zugrunde. Die implementierten Standardwerte für diesen Tagesgang wurden durch das Institut für Wasserbau der TH Darmstadt, Fachgebiet Ingenieurhydrologie und Hydraulik (EULER [1989]) für den Einsatz im Modell SMUSI entwickelt und sind in Abb. 5-4 dargestellt. Jahres- und Tagesgang können vom Anwender nicht verändert werden.

Stundenfaktoren für  $h_v$  (-)



**Abb. 5-4** Tagesgang der Verdunstung, Relativteilung des jeweiligen Tagesmittelwertes

Die Vorgänge der Gebietsabtrocknung sind außerordentlich komplex. Unter Berücksichtigung des Rückgangs der verdunstungswirksamen Muldenfläche und der Spritzwasserverluste ist von PAULSEN [1987] ein Modellansatz entwickelt worden. Er gibt an, dass die korrekte Handhabung seiner Algorithmen innerhalb eines Modells allerdings erheblichen Aufwand erfordert. Immer dann, wenn zu teilgefüllten Mulden Niederschläge kommen, die diese nicht zum Überlaufen bringen, sind Mittelungen und Korrekturen erforderlich, deren Aufwand in keinem Verhältnis zu der erzielten Genauigkeit steht.

Dieser Rückgang des Muldenauffüllgrades durch Verdunstung erfolgt nur in den Trockenphasen, wenn der Benetzungsspeicher geleert ist.

$$\varepsilon_{m,i} = \varepsilon_{m,i-1} \cdot e^{-c \cdot \Delta h_{v,i}} \quad \text{Gleichung 5-24}$$

mit  $\Delta h_{v,i}$ : aktuelle Verdunstungshöhe in mm

Auch die Reduzierung des Benetzungsspeichers erfolgt durch Verdunstung.

$$VB_i = VB_{i-1} - \Delta h_{v,i} \quad \text{Gleichung 5-25}$$

mit  $VB_i$ : aktuelle Füllung des Benetzungsspeichers  $\geq 0$

Die Reduzierung des Benetzungsspeichers erfolgt nur in den Trockenzeiten.

### 5.2.3 Zusammenstellung der Arbeitsgleichungen

Für die praktische Simulation der Abflussbildung auf befestigten Flächen sind folgende Arbeitsgleichungen erforderlich:

**Muldenauffüllung während der Niederschlagsphase:**

$$\varepsilon_{m,i+1} = 1 - (1 - \varepsilon_{m,i}) \cdot e^{-c \cdot \Delta N_i} \quad \text{Gleichung 5-26}$$

**Muldenentleerung während der Trockenphase bei geleertem Benetzungsspeicher \*:**

$$\varepsilon_{m,i} = \varepsilon_{m,i-1} \cdot e^{-c \cdot \Delta h_{v,i}} \quad \text{Gleichung 5-27}$$

\* Im Vergleich zur Version KOSIM 6.3 erfolgt jetzt die Muldenentleerung nur bei geleertem Benetzungsspeicher.

### Berechnung der abflusswirksamen Niederschläge:

$$\Delta A_i = \psi_e \bullet [\Delta N_i - V_{\text{muld}} \bullet (\varepsilon_{m,i} - \varepsilon_{m,i-1})] \quad \text{Gleichung 5-28}$$

Vor Anwendung der Algorithmen werden die Benetzungsverluste  $V_{\text{ben}}$  in Ansatz gebracht. Die **Hilfsgröße c** ergibt sich zu:

$$c = \frac{1 - \psi_0}{V_{\text{muld}}} \quad \text{Gleichung 5-29}$$

#### 5.2.4 Hinweise zur Wahl der Ansätze und Parameterwerte

Generelle Empfehlungen für die Wahl bestimmter Ansätze oder Parameterwerte können nicht gegeben werden, da Art und Umfang der Modellierung sowohl von der jeweiligen Fragestellung als auch von den zur Verfügung stehenden Informationen über die Oberfläche abhängen. Bei detaillierten Berechnungen mit hoher örtlicher Auflösung, wie sie z. B. bei Kanalnetzberechnungen vorgenommen werden, sollten Ansätze gewählt werden, die eine entsprechend detaillierte Berechnung ermöglichen.

Die Angabe von Standardparametern beinhaltet immer die Problematik, dass diese Werte auch für Fälle angesetzt werden, bei denen sie nicht zutreffen oder unsinnig sind. Andererseits ist durch die Verwendung von Standardparametern die Möglichkeit gegeben, vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Nachfolgend werden deshalb Parameterwerte angegeben, mit denen in der Mehrzahl der Fälle richtige Ergebnisse erzielt werden. Es ist aber in jedem Anwendungsfall sorgfältig zu prüfen, ob diese oder andere als Standardparameter definierte Werte sinnvoll sind. Folgende Werte sind für gemischte Flächen zu empfehlen:

Tab. 5-1 Standardparameter für gemischte Flächen

Parameter	Wert
Benetzungsverlust	$V_{\text{ben}} = 0.5 \text{ mm}$
Muldenverlust	$V_{\text{muld}} = 1.8 \text{ mm}$
Anfangsabflussbeiwert	$\Psi_0 = 0.3$
Endabflussbeiwert	$\Psi_e = 0.85$

Der Endabflussbeiwert kann nur als Richtwert dienen. Er richtet sich danach, wie die befestigten Flächen definiert sind und ermittelt wurden.  $\Psi_e$  ist so zu wählen, dass mit  $A_{\text{bef}} \cdot \Psi_e$  die Summe aller Flächenanteile definiert ist, die nach Abdeckung der Benetzungs- und Muldenverluste vollständig abflusswirksam werden.

### 5.3 Unbefestigte Flächen

Die wirklichkeitsnahe Berücksichtigung der Abflüsse von unbefestigten Flächen innerhalb von bebauten Gebieten gestaltet sich wesentlich komplizierter als bei den befestigten Flächen. Zum einen ist hier zusätzlich die Versickerung zu berücksichtigen, die wesentlich von der Durchlässigkeit und vom aktuellen Wassergehalt des Bodens abhängt. Zum anderen sind die unbefestigten Flächen bei weitem nicht als so homogen bezüglich ihrer Abflussbildung anzusehen wie die befestigten Flächen. Bodenart, Bewuchs und Nutzung sind vielfältig und örtlich sehr unterschiedlich. Hinzu kommt, dass meist nicht eindeutig festgestellt werden kann, ob eventuell auftretender Abfluss von den unbefestigten Flächen auch tatsächlich in das Kanalnetz gelangt, oder ob er ganz oder teilweise auf anderen Wegen abfließt. Die Angabe der unbefestigten Fläche bzw. ihres Endabflussbeiwertes hat damit besondere Bedeutung.

Die Berücksichtigung der unbefestigten Flächen bei der Niederschlag-Abfluss-Modellierung ist in jedem Fall erforderlich, da bei größeren Niederschlags-Ereignissen diese Flächen einen nicht zu vernachlässigenden Teil des Gesamtabflusses liefern können.

Für die Modellierung gelten die schon bei den befestigten Flächen dargestellten Grundüberlegungen bezüglich der Verdunstung für Regen- und Trockenzeiten. Ebenso können auch die Ansätze der Abflussbildung übernommen werden, müssen aber um die Komponente "Versickerung" erweitert werden.

Anders als bei den befestigten Flächen, wo ausgehend von der Einzelereignissimulation die Berücksichtigung der Trockenzeiten erst später behandelt wurde, werden im Folgenden nach der eingehenden Betrachtung der Ansätze zur Versickerung die vollständigen Abflussbildungsansätze dargestellt, also einschließlich der Verdunstung in regenfreien Zeiten.

Die Berechnung der Abflussbildung für unbefestigte Flächen besteht aus drei Komponenten und wird in der folgenden Reihenfolge durchgeführt:

- ◆ Benetzungs- und Interzeptionsverluste
- ◆ Infiltration
- ◆ Muldenverluste und Änderung des abflusswirksamen Anteils der Flächen

### 5.3.1 Benetzungs- und Interzeptionsverluste

Auch bei den unbefestigten Flächen treten Anfangsverluste in Form von Benetzungsverlusten auf, die als Schwellwert berücksichtigt werden können. Anders als bei den befestigten Flächen muss hier die Definition aber erweitert werden. Die Oberfläche von unbefestigten Flächen ist normalerweise von Vegetation bedeckt, die einen Teil des Regens durch ihre Oberfläche zurückhält. Diese als Interzeption bezeichneten Verluste führen dazu, dass ein Teil des Regens gar nicht den Boden erreicht und damit auch für den Abfluss nicht zur Verfügung steht.

Die Größe der Interzeption ist stark abhängig von der Art der Vegetation, Bäume verursachen z. B. wesentlich größere Interzeptionsverluste als Rasen. Außerdem hängt der aktuelle Interzeptionsverlust von der Vegetationsperiode und damit von dem Zeitpunkt des Auftretens eines Ereignisses innerhalb des Jahres ab.

Die Berücksichtigung einer jahreszeitlichen Veränderung der Benetzungs- und Interzeptionsverluste ist daher sinnvoll. Sie kann vereinfacht in der Form von monatlichen Reduktionsfaktoren für die sommerlichen Verluste angesetzt werden oder über die potentielle Verdunstung erfolgen, für die ja ein funktionaler Jahresgang vorhanden ist.

Tab. 5-2 Reduktionsfaktoren für sommerliche Benetzungs- und Interzeptionsverluste

Monat	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Faktor	0.1	0.1	0.3	0.7	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.7	0.3	0.1

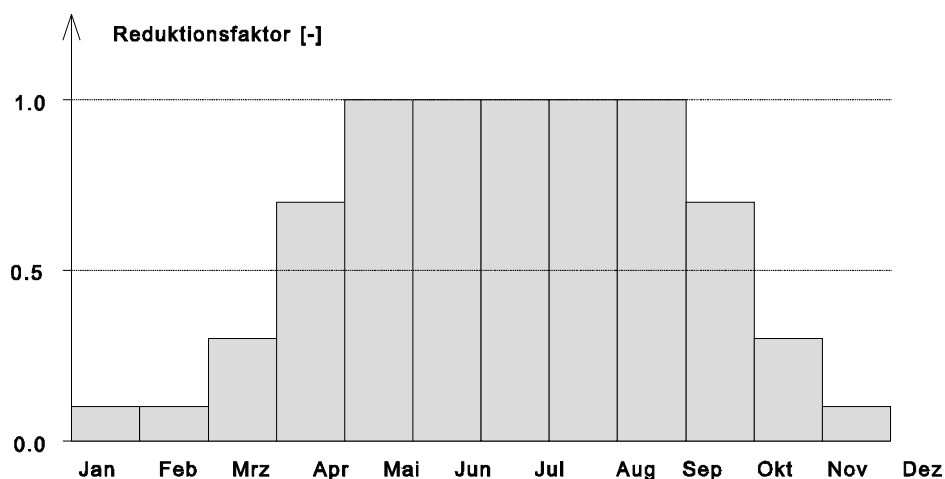


Abb. 5-5 Reduktion der Benetzungs- und Interzeptionsverluste aufgrund der Vegetation in Abhängigkeit von der Jahreszeit

Der Ansatz von Reduktionsfaktoren erscheint sinnvoller, da im Wesentlichen unterschieden werden muss zwischen den Zuständen mit und ohne Vegetation. Wird als Benetzungs- und Interzeptionsverlust der Wert für den Sommer angegeben, so werden die in Tab. 5-2 angegebenen und in Abb. 5-5 dargestellten Reduktionsfaktoren vorgeschlagen.

Die Regeneration der Benetzungs- und Interzeptionsverluste in Trockenzeiten erfolgt wie bei den befestigten Flächen in Abhängigkeit von der potentiellen Verdunstung.

### 5.3.2 Infiltration

Die Infiltrationskapazität des Bodens hängt zum einen von der Durchlässigkeit des Bodens ab, zum anderen vom aktuellen Wassergehalt, der sich während eines Regenereignisses, aber auch in Trockenzeiten, ändert. Der Ansatz von HORTON beschreibt die sich ändernde Infiltrationskapazität, ausgehend von einer Anfangs-Infiltrationsrate bis zum Erreichen der Endinfiltration allein als Funktion der Zeit. Hierbei wird vorausgesetzt, dass während dieser Zeit die Regenintensität stets gleich oder größer ist als die aktuelle Infiltrationskapazität. Dieses ist während eines beliebigen Regenereignisses jedoch nicht notwendigerweise der Fall.

Außerdem ist für eine zeitschrittweise Simulation auch die in regenfreien oder regenarmen Abschnitten auftretende umgekehrte Änderung, nämlich zurück zur Anfangs-Infiltrationsrate, zu berücksichtigen.

PAULSEN [1986] entwickelt den Horton-Ansatz weiter, indem er nicht nur den Rückgang der Infiltrationskapazität funktional beschreibt, sondern auch deren Regeneration.

Es wird bewusst darauf verzichtet, die Infiltrationsraten explizit anzugeben. Da die Bodenverhältnisse innerhalb eines Einzugsgebietes sehr unterschiedlich sein können, wird deshalb mit Bodenklassen gearbeitet, die die im Mittel vorhandenen Bodenverhältnisse wiedergeben sollen. Für eine modelltechnische Realisierung sollte aber die Möglichkeit gegeben sein, die einzelnen Parameter explizit setzen zu können, um auch Vorgaben berücksichtigen zu können, die mit den Parametersätzen der Bodenklassen nicht übereinstimmen.

Die Horton-Gleichung beschreibt den zeitlichen Verlauf der Infiltrationskapazität bei Regen.

$$f(t) = f_e + (f_0 - f_e) \cdot e^{-k \cdot t} \quad \text{Gleichung 5-30}$$

mit  $f(t)$ : Infiltrationsrate zur Zeit  $t$  (mm/min)  
 $f_0$ : Anfangsinfiltrationsrate zur Zeit  $t = 0$   
 $f_e$ : Endinfiltrationsrate zur Zeit  $t = \infty$   
 $k$ : Rückgangskonstante (1/min)

Ausgehend von einem maximalen Wert bei Ereignisanfang wird die Infiltrationskapazität im Verlauf des Ereignisses auf einen minimalen Wert reduziert. Voraussetzung ist, dass die Regenbelastung mindestens so groß ist wie die Infiltrationskapazität.

Für die rekursive Berechnung ist es erforderlich, dass die Infiltrationskapazität  $f_i$  am Ende des  $i$ -ten Intervalls sich aus der vorangegangenen  $f_{i-1}$  berechnen lässt:

$$f_i = f_e + (f_{i-1} - f_e) \cdot e^{-k \cdot \Delta t} \quad \text{Gleichung 5-31}$$

mit  $f_i$ : Infiltrationsrate des  $i$ -ten Zeitintervalls  
 $f_{i-1}$ : Infiltrationsrate des vorangegangenen Zeitintervalls  
 $f_e$ : Endinfiltrationsrate bei  $t = \infty$   
 $k$ : Rückgangskonstante für die Regenphase

Bei der Einzelereignissimulation wäre ein Anfangswert  $f_{i-1}$  (z. B.  $f_0$ ) festzulegen.

Für die Regenerierung der Infiltrationskapazität in Zeiten ohne Regen wird die Umkehrung der obigen Gleichung verwendet:

$$f_i = f_0 - (f_0 - f_{i-1}) \cdot e^{-k_D \cdot c_{hv} \cdot \Delta t} \quad \text{Gleichung 5-32}$$

mit  $f_0$ : Infiltrationsrate bei  $t = 0$   
 $k_D$ : Regenerationskonstante für die Trockenphase  
 $c_{hv}$ : Quotient aktueller / mittlerer Verdunstungshöhe

Nach Ende einer Regenperiode regeneriert sich die Infiltrationskapazität, bis wieder ihr maximaler Wert  $f_0$  erreicht ist. Die Regeneration der Infiltrationskapazität wird sehr viel langsamer verlaufen als die Erschöpfung in der Regenphase. Der Wert  $k_D$  muss also wesentlich kleiner sein als  $k$ .

Die beiden Modellgleichungen unterscheiden nur die Fälle

- ◆ Ausschöpfung der Infiltrationskapazität durch mindestens ebenso große Niederschlagsintensitäten in der Regenphase
- ◆ Regeneration der Infiltrationskapazität ohne Versickerung in der Trockenphase

Eine Zwischenstufe besteht darin, dass Regen fällt, der eine geringere Intensität aufweist als die aktuelle Infiltrationskapazität, so dass zwar Versickerung stattfindet, Gleichung 5-31 aber nicht angewandt werden kann. PAULSEN teilt derartige Regenintervalle in zwei Zeitabschnitte auf:

Im ersten Abschnitt werden die Niederschläge des Gesamtintervalls zusammengezogen, so dass in diesem Abschnitt gerade die Infiltrationskapazität ausgeschöpft ist. Dies geschieht, indem die Niederschlagshöhe  $\Delta N_i$  der kumulativen Infiltration  $\Delta F_i$  gleichgesetzt wird, um die für die Versickerung erforderliche Zeit zu ermitteln. Die kumulative Infiltration  $\Delta F_i$  ist

$$\Delta F = f_e \cdot \Delta t + \frac{(f_{i-1} - f_e)}{k} \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t}) \quad \text{Gleichung 5-33}$$

Dabei wird zwischen  $f_i$  und  $f_{i-1}$  ein linearer Verlauf angenommen und die erforderliche theoretische Infiltration abgeschätzt. Der verbleibende Zeitabschnitt wird für die Regeneration der Infiltrationskapazität benutzt.

Der so modifizierte Horton-Ansatz ist damit für die kontinuierliche Simulation geeignet. Da die Regeneration im Wesentlichen von der Verdunstung und vom Wasserverbrauch der Pflanzen abhängt, ist ein Ansatz sinnvoll, der die potentielle Verdunstungshöhe berücksichtigt. Geht man davon aus, dass die Regenerationskonstante  $k_D$  für mittlere Verhältnisse gelten soll, so kann die mittlere tägliche Verdunstungshöhe der Gleichung 5-23 (Standardwert 657 mm/d) als Bezugsgröße verwendet werden. Die stärkere Verdunstung im Sommer und die geringere im

Winter lassen sich durch den Jahresgang, die täglichen Schwankungen durch die relativen Stundenfaktoren berücksichtigen.

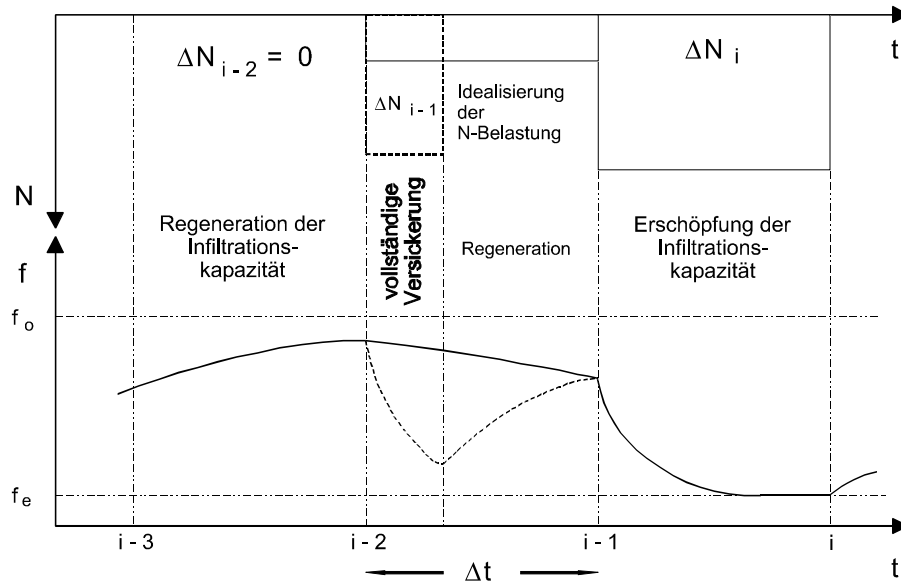


Abb. 5-6 Regenerationsgeschwindigkeiten für  $k_D$ -Werte

In die Berechnungsgleichung für die Regeneration geht dann der Faktor

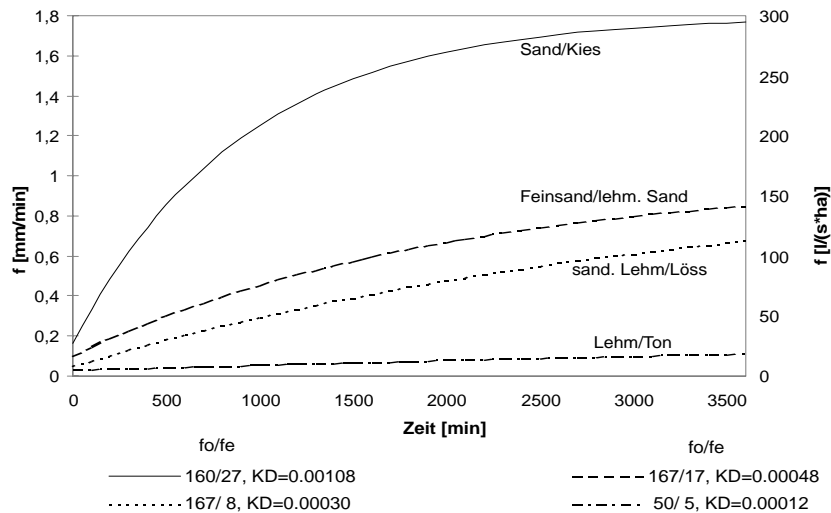
$$c_{hv} = \frac{h_{v,i}}{h_v} \quad \text{bzw.} \quad c_{hv} = \frac{h_{v,i} \cdot c_h}{h_v} \quad \text{Gleichung 5-34}$$

mit  $h_{v,i}$ : aktuelle tägliche Verdunstungshöhe nach Gleichung 5-23  
 $h_v$ : mittlere tägliche Verdunstungshöhe  
 $c_h$ : relativer Stundenfaktor zur Berücksichtigung des Tagesganges der Verdunstung

ein, so dass sich die Regenerationsgleichung ergibt zu

$$f_i = f_0 - (f_0 - f_{i-1}) \cdot e^{-k_D \cdot c_{hv} \cdot \Delta t} \quad \text{Gleichung 5-35}$$

Wird nur der Jahresgang der potentiellen Verdunstung berücksichtigt, so liegen die Faktoren  $c_{hv}$  zwischen 0.22 und 1.78, mit Berücksichtigung des Tagesganges zwischen 0.055 und 3.56. Diese Faktoren gelten jedoch immer nur stundenweise, so dass sich bei Zeiträumen von mehreren Tagen eine kleinere Variation ergibt.



**Abb. 5-7** Regeneration der Infiltrationsrate mit und ohne Berücksichtigung der potentiellen Verdunstung für Feinsand/lehmigen Sand.

Die Auswirkungen der Berücksichtigung der Verdunstung bei der Regeneration sind in Abb. 5-7 am Beispiel der Bodenart "Feinsand/lehmiger Sand" dargestellt.

Ausgehend von der Endinfiltrationsrate  $f_0$  ist im Vergleich zur Regeneration ohne Berücksichtigung der Verdunstung ( $c_{hv} = 1$ ) die Regeneration im Sommer und im Winter dargestellt ( $c_{hv} = f(h_{v,i})$ ). Für das Sommerdatum wurde um 12 Uhr mit hoher Verdunstung und für das Winterdatum um 0 Uhr mit geringer Verdunstung begonnen. Dadurch können die dargestellten Kurven als die Grenzen des möglichen Variationsbereichs interpretiert werden.

Grundsätzlich können die 4 Parameter des Horton-Ansatzes ( $f_0$ ,  $f_e$ ,  $k$ ,  $k_D$ ) frei gewählt werden. Für die praktische Handhabung und für vergleichbare Ergebnisse ist es jedoch sinnvoll, wie bei Neumann einige Bodenklassen zu definieren,

für die dann stets dieselben, festgelegten Parameter gelten. Entsprechende Werte sind in Tab. 5-3 zusammengestellt.

**Tab. 5-3 Parameter für unbefestigte Flächen**

Parameter	Dimension	Bodenarten			
		Kies	Feinsand	Löss	Lehm/ Ton
Anfangsinfiltration	$f_o [l/(s \cdot ha)]$	300	167	167	50
	$f_o [mm/min]$	1.8	1.0	1.0	0.3
Endinfiltration	$f_e l/(s \cdot ha)]$	27	17	8	5
	$f_e [mm/min]$	0.162	0.102	0.048	0.030
Rückgangskonstante	$k [1/d]$	129.6	86.4	72	43,2
Regenerations- konstante	$k_D [1/d]$	1.584	0.72	0.432	0.144

### 5.3.3 Muldenverluste und Änderung des abflusswirksamen Anteils der Flächen

Nachdem die Benetzungs- und Interzeptionsverluste aufgebraucht sind und ein Teil des Niederschlags versickert ist, werden die Mulden gefüllt. Aufgrund der Unterschiedlichkeit der einzelnen unbefestigten Flächen innerhalb eines (Teil-) Einzugsgebietes sind auch die anzusetzenden Muldenverluste sehr unterschiedlich. Folglich liefert ein Teil der Flächen eher Abfluss als ein anderer Teil, so dass eine Zunahme des abflusswirksamen Anteils der unbefestigten Flächen eintritt.

Dieses Verhalten entspricht dem der befestigten Flächen und kann in geeigneter Weise mit der Grenzwertmethode beschrieben werden. Allerdings sind die Parameter natürlich anders zu wählen und z. T. auch anders zu interpretieren. Die Muldenverluste beschreiben hier zusätzlich die unterschiedlichen Verluste auf den unbefestigten Flächen.

Prinzipiell gelten also auch die Gleichungen der Grenzwertmethode wie bei den befestigten Flächen. In die Gleichungen geht der Anteil der Niederschläge  $\Delta N_i$  ein, der nach der Berücksichtigung der Benetzungs- und Interzeptionsverluste und der Infiltration verbleibt.

Die aktuelle Muldenauffüllung ergibt sich zu

$$\varepsilon_{m,i+1} = 1 - (1 - \varepsilon_{m,i}) \cdot e^{-c \cdot \Delta N_i} \quad \text{Gleichung 5-36}$$

$$\text{mit } c = \frac{1 - \psi_0}{V_{\text{muld}}}$$

Der abflusswirksame Niederschlag im Zeitintervall  $i$  ist:

$$\Delta A_i = \psi_e \cdot (\Delta N_i - V_{\text{muld}} \cdot (\varepsilon_{m,i} - \varepsilon_{m,i-1})) \quad \text{Gleichung 5-37}$$

Der Parameter  $\psi_e$  gibt als Endabflussbeiwert den Anteil der unbefestigten Flächen an, der maximal, also nach Abdeckung aller Muldenverluste, abflusswirksam bezüglich des Entwässerungssystems ist. Der Wert für  $\psi_0$  wird i.a. niedriger liegen als bei befestigten Flächen, da der Muldenverlust am Anfang eines Ereignisses wegen der ungleichmäßigen Oberfläche stärker berücksichtigt werden muss.

Die Regeneration der Muldenverluste in Trockenzeiten, also die Abtrocknung der Mulden, erfolgt wie bei den befestigten Flächen in Abhängigkeit von der potentiellen Verdunstung. Da aber gleichzeitig auch eine Entleerung der Mulden durch Versickerung stattfinden kann, dürfen diese beiden Regenerationsarten nicht unabhängig voneinander betrachtet werden. Da bei den Berechnungen das Zeitintervall beliebig ist (Trockenzeiten müssen nicht zeitschrittweise gerechnet werden), würde bei längeren Trockenzeiten - je nach Reihenfolge der Berücksichtigung - entweder der gesamte Muldeninhalt nur versickern oder nur verdunsten.

Geht man davon aus, dass auch die Versickerung aus den Mulden nach den gleichen Überlegungen abläuft wie die Verdunstung, so kann in die Gleichung zur Ermittlung des neuen Muldenauffüllgrades statt der Verdunstungshöhe die Summe aus maximaler kumulativer Versickerungshöhe und Verdunstungshöhe eingesetzt werden.

$$\varepsilon_{m,i} = \varepsilon_{m,i-1} \cdot e^{-c \cdot (\Delta h_{v,i} + \Delta f_i)} \quad \text{Gleichung 5-38}$$

$$\text{mit } \Delta f_i = f_e \cdot \Delta t + (f_i - f_e) \cdot \frac{1 - e^{-k \cdot \Delta t}}{k}$$

Zur Berechnung der neuen Infiltrationsrate am Ende des Intervalls  $\Delta t$  ist es erforderlich, die Menge

$$\Delta V_m = V_{\text{muld}} \cdot (\varepsilon_{i-1} - \varepsilon_i) \quad \text{Gleichung 5-39}$$

um die die Muldenfüllung vermindert wurde, aufzuteilen in die Anteile, die auf die Versickerung und die Verdunstung entfallen. Diese Aufteilung erfolgt im Verhältnis der beiden Muldenentleerungs-Verursacher. Für die infiltrierte Menge ergibt sich dann

$$\Delta V_{f_{m,i}} = \Delta V_{m,i} \cdot \frac{\Delta f_i}{\Delta h_{v,i} + \Delta f_i} \quad \text{Gleichung 5-40}$$

Falls diese Menge kleiner ist als die maximale kumulative Infiltrationskapazität für das betrachtete Zeitintervall, wird die benötigte Infiltrationszeit berechnet, um für den Rest des Zeitintervalls die Regeneration der Infiltrationskapazität berücksichtigen zu können (siehe Kapitel 5.3.2 "Infiltration").

#### 5.3.4 Hinweise zur Parameterwahl

Die Wahl des Ansatzes zur Berechnung der Abflussbildung von unbefestigten Flächen hängt wesentlich davon ab, mit welchem Zeitschritt und ob kontinuierlich oder nur für Einzelereignisse gerechnet werden soll.

Während es für größere, natürliche Einzugsgebiete durchaus ausreichend sein kann, den Gesamtabflussbeiwert für ein Ereignis in Abhängigkeit der Vorschichte und der Gebietscharakteristiken zu bestimmen (z. B. durch koaxiale grafische Darstellung), so muss bei detaillierter Berücksichtigung der Abflussvorgänge in hoher zeitlicher und örtlicher Auflösung der Prozess der Abflussbildung differenzierter nachgebildet werden, um besonders den zeitlichen Verlauf der Abflüsse zu erfassen. Damit ist allerdings noch nicht gewährleistet, dass die Ergebnisse absolut besser sind als bei globalen Ansätzen. Die Bodenbeschaffenheit, die Vegetation und die Abflusswege sind besonders innerhalb eines städtischen Einzugsgebietes so heterogen, dass eine zuverlässige Nachbildung einen nicht zu vertretbaren Aufwand bei der Datenbeschaffung für die richtige Parameterwahl erfordern würde.

Es bleibt daher nur der Weg, mittlere Verhältnisse zu erfassen und anzugeben, wobei besonders darauf zu achten ist, dass Abweichungen davon nicht zu unsinnigen Ergebnissen führen. Für die Berücksichtigung der Infiltration ist deshalb die Wahl von Parametersätzen, die bestimmten Bodenarten zugeordnet sind, sinnvoll.

Neben der Infiltration sind die Ansätze für die Benetzungs- und Interzeptionsverluste sowie für die Muldenverluste von besonderer Bedeutung. Wegen der Inhomogenität der unbefestigten Flächen sollte die Zunahme der abflusswirksamen Flächenanteile über die Grenzwertmethode berechnet werden, um ein schlagartiges Einsetzen des Abflusses mit dem Endabflussbeiwert zu vermeiden.

Für mittlere Verhältnisse können folgende Parameter vorgeschlagen werden:

- ◆  **$V_{ben} = 2 \dots 8 \text{ mm}$**   
berücksichtigt vor allem die Interzeption und stellt den Sommerwert dar, der entscheidend von der Vegetation (Rasen bis Laubwald) abhängt.  
Für Ereignisse in der vegetationsarmen Jahreszeit sollte dieser Wert vermindert werden.
- ◆  **$V_{muld} = 3 \dots 5 \text{ mm}$**   
gibt den Gebietsrückhalt nach Überschreitung der Infiltrationskapazität an.
- ◆  **$\Psi_0 = 0.0$**   
sollte gewählt werden, da nach Überschreiten der Infiltrationskapazität der Abfluss wegen der rauhen Oberfläche nur verzögert einsetzt. Damit wird andererseits ein großer Teil der Muldenverluste schnell abgedeckt, so dass bei anhaltendem starken Regen der Abflussbeiwert schnell zunimmt.
- ◆  **$\Psi_e$**   
gibt an, welcher Teil der unbefestigten Flächen bei Überschreiten der Infiltrationskapazität und nach Abdeckung aller Verluste vollständig abflusswirksam wird.  
Der Wert ist abhängig davon, wie die unbefestigten Flächen ermittelt und definiert sind (z. B. Differenz zwischen  $A_{ges}$  und  $A_{bef}$  oder angeschlossene unbefestigte Flächen). Wird  $A_{unbef} = A_{ges} - A_{bef}$  gesetzt, so sind Werte zwischen 0.3 und 0.5 im Mittel sinnvoll.
- ◆ **Bodenart =**  
zur Festlegung der Parameter des Infiltrationsansatzes für mittlere Verhältnisse kann "Löss" verwendet werden; ebenso beschreibt die Bodenart "Feinsand" etwa mittlere Verhältnisse. Im Einzelfall ist zu prüfen, ob eine andere Bodenart die Verhältnisse besser beschreibt, oder ob die Parameter für die Infiltration explizit gesetzt werden müssen.

## 5.4 Natürliche Flächen

Neben den befestigten und unbefestigten Flächen können in KOSIM auch natürliche Flächen berücksichtigt werden. Natürliche Flächen sind Flächen außerhalb urbaner Räumen, die i.d.R. landwirtschaftlich oder forstwirtschaftlich genutzt werden.

Die Abflussbildung dieser Flächen ist geprägt durch vergleichsweise hohe Verlustraten bei häufigen Niederschlägen. Erst bei seltenen Niederschlägen hoher Dauer treten erhebliche Abflüsse auf, die wegen der Größe der natürlichen Flächen zu maßgeblichen Abflüssen führen können.

In KOSIM wird das Abflussverhalten natürlicher Flächen näherungsweise mit der Grenzwertmethode gemäß Kapitel 5.2 "Befestigte Flächen" beschrieben. Für die Berechnung wird ein Parametersatz vorgeschlagen. Im Einzelfall sind die Werte jedoch anhand von Messdaten zu kalibrieren und in einem benutzerdefinierten Parametersatz zu definieren.

## 6 Abflusskonzentration

Unter Abflusskonzentration versteht man die Berechnung von Abflussganglinien in Bezug auf bestimmte Einzugsgebietsflächen (Konzentrationsgebiete) unter Vorgabe von örtlich gleichmäßig verteilt angenommenen, abflusswirksamen Niederschlägen.

Es wird auf eine mathematische Beschreibung der physikalischen Vorgänge des Abflusses verzichtet und statt dessen vom Prinzip der Einheitsganglinie ausgegangen. Man versteht darunter eine für das jeweils betrachtete Einzugsgebiet charakteristische Abflussganglinie, die sich immer wieder in unveränderter Form einstellt, wenn von dem als unverändert bleibend vorausgesetztem Einzugsgebiet ein bestimmter abflusswirksamer Einheitsniederschlag (Dimension mm pro Zeiteinheit, z. B. 1mm/5min) zum Abfluss kommt.

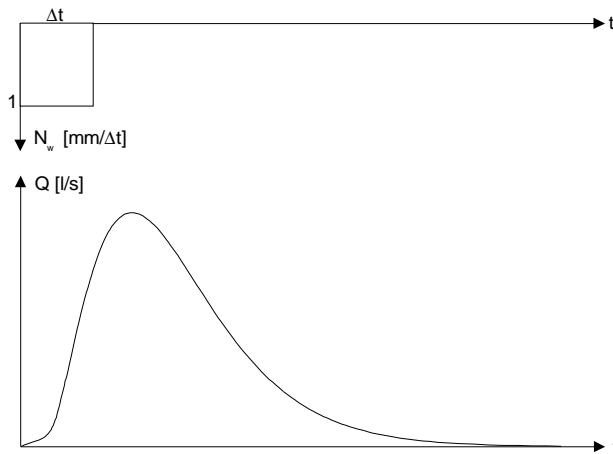
Der abflusswirksame Einheitsniederschlag wird als örtlich gleichmäßig verteilt angenommen. Daraus ergibt sich, dass das Volumen der Einheitsganglinie gleich dem Produkt aus abflusswirksamer Niederschlagshöhe und Einzugsgebiet ist:

$$V_{\text{EGL}} = N_{\text{EGL}} \cdot A_{\text{E}} \cdot c$$

Gleichung 6-1

- mit
- $V_{\text{EGL}}$ : Volumen der Einheitsganglinie in  $\text{m}^3$
  - $N_{\text{EGL}}$ : Einheitsniederschlagssumme in mm
  - $A_{\text{E}}$ : Einzugsgebietsfläche in ha oder  $\text{km}^2$
  - $c$ : Dimensionsfaktor
    - = 10, wenn  $A_{\text{E}}$  in ha
    - = 1000, wenn  $A_{\text{E}}$  in  $\text{km}^2$

Die übliche Darstellung einer Einheitganglinie und ihres zugehörigen Einheitsniederschlages zeigt Abb. 6-1.



**Abb. 6-1**      Übliche Darstellung einer Einheitganglinie und ihres zugehörigen Einheitsniederschlages

Mit Hilfe der Einheitganglinie lassen sich nach dem Superpositionsprinzip die Abflussganglinien beliebiger Niederschlagsereignisse errechnen.

Der hydrologische Ansatz wird häufig für Kanalnetz- und Fließgewässermodelle verwendet. Dabei werden Gerinnestrecken ganz oder teilweise in die Konzentrationsberechnung einbezogen. Im Extremfall besteht ein Niederschlag-Abfluss-Modell dann nur noch aus den Bausteinen Abflussbildung und Abflusskonzentration, das heißt Konzentrationsgebiete der Einheitganglinie umfassen dann die gesamte Oberfläche und sämtliche Gerinnestrecken bis zu dem Punkt des Gerinnesystems, für den der Abfluss berechnet werden soll.

## 6.1 Das Superpositionsprinzip der Einheitsganglinie

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass eine Einheitsganglinie entsprechend Abb. 6-1 existiert. Um nun mit Hilfe dieser Einheitsganglinie aus beliebigen Niederschlägen die jeweils zugehörigen Abflussganglinien berechnen zu können, unterstellt man der Einheitsganglinie die Eigenschaft der linearen Superponierbarkeit und meint damit anschaulich die Zulässigkeit folgender Rechenoperationen mit Bezug auf Linearität und Zeitinvarianz.

### Linearität

Wenn man den Einheitsniederschlag " $N_W$ " unter Beibehaltung des Zeitintervalls " $\Delta t$ " mit einem Faktor " $n$ " multipliziert, dann ergibt sich die zugehörige Abflussganglinie, indem man alle Ordinaten der Einheitsganglinie ebenfalls mit dem Faktor " $n$ " multipliziert. In Abb. 6-2 ist diese Operation für den Faktor  $n=2$  durchgeführt.

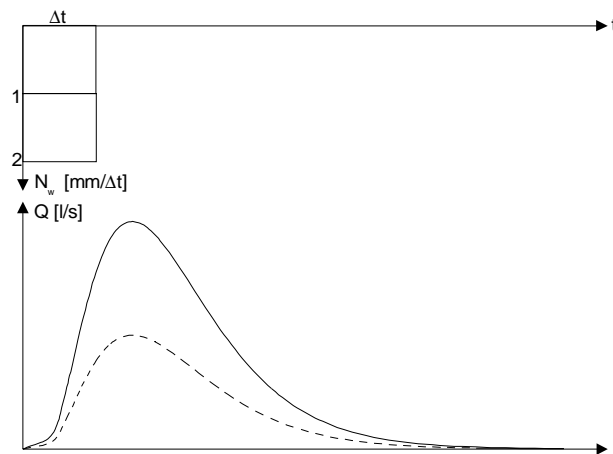
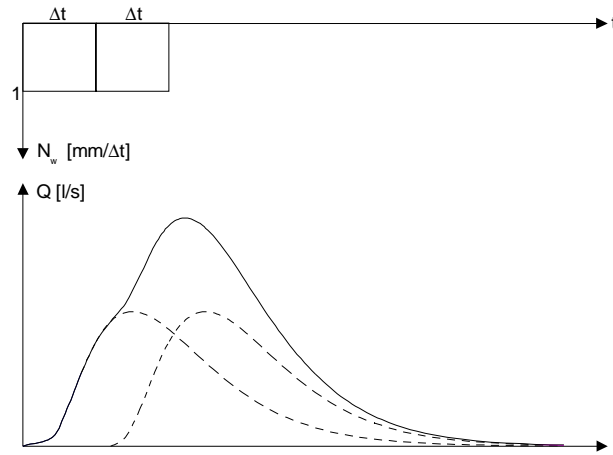


Abb. 6-2 Superposition der Einheitsganglinie infolge betragslicher Vervielfachung des Einheitsniederschlags

### Zeitinvarianz

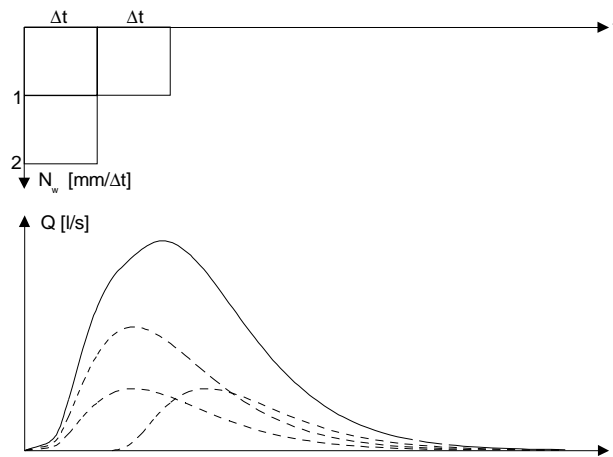
Wenn man dem Einheitsniederschlag " $N_W$ "  $m$  weitere Einheitsniederschläge zeitlich folgen lässt, so ergibt sich die zugehörige Abflussganglinie, indem man " $m$ " Einheitsganglinien jeweils um  $\Delta t$  gegeneinander versetzt und die jeweils "übereinander" liegenden Ordinaten aufaddiert.

In Abb. 6-3 ist die Operation für  $m=2$  durchgeführt.



**Abb. 6-3** Superposition der Einheitsganglinie infolge zeitlicher Aueinanderfolge mehrerer Einheitsniederschläge

Zulässig ist damit auch die gemeinsame Anwendung beider Rechenoperationen, wie aus Abb. 6-4 zu ersehen ist.



**Abb. 6-4** Superposition der Einheitsganglinie infolge betragslicher und zeitlicher Vervielfachung der Einheitsniederschläge

Das Niederschlagsereignis besteht hier aus zwei Einheitsniederschlägen im ersten und einem Einheitsniederschlag im zweiten Intervall. Die zugehörige Abflussganglinie ergibt sich durch Superposition der drei dargestellten Einheitsganglinien.

Die betragliche Vervielfachung des Einheitsniederschlages je Zeitintervall ist nicht auf ganze Zahlen beschränkt, sondern kann beliebige Werte, auch Werte  $< 1$ , annehmen. So kann zum Beispiel ein Niederschlagsereignis aus zwei Intervallen mit  $N_{w,1}=1.7 \text{ mm}/\Delta t$  bzw.  $N_{w,2}=0.4 \text{ mm}/\Delta t$  bestehen (Abb. 6-5).

Durch Multiplikation der Ordinaten der Einheitsganglinie mit  $n_1=1.7$  bzw.  $n_2=0.4$  ergeben sich zwei um  $\Delta t$  gegeneinander versetzte Teilwellen, deren Ordinatenaddition die Abflussganglinie des Niederschlagsereignisses ergibt.

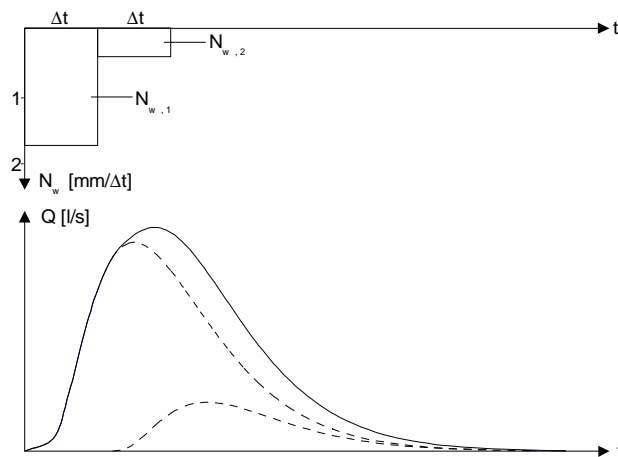


Abb. 6-5 Superposition bei nicht ganzzahligen Niederschlägen je Zeitintervall

## 6.2 Lineare Abflusskonzentrationsberechnung

In der Literatur sind zahlreiche Verfahren zur Abflusskonzentrationsberechnung beschrieben. Neben reinen Regressionsmodellen bilden Modelle, die das Verfahren der linearen Speichermodelle benutzen, die wichtigste Gruppe.

### 6.2.1 Linearer Einzelspeicher

Die Modellvorstellung beim linearen Einzelspeicher besteht darin, sich ein Einzugsgebiet als linearen Speicher vorzustellen, der die Eigenschaft besitzt, den Zufluss  $I_t$  zu speichern und als gedrosselten Abfluss wieder abzugeben. Der Abfluss  $q_t$  ist proportional zu der aktuell im Speicher vorhandenen Wassermenge  $S_t$ .

Mit der Drosselvorschrift

$$q_t = \frac{1}{K} \cdot S_t \quad \text{Gleichung 6-2}$$

wird das Abflussverhalten als Funktion des Speicherinhaltes beschrieben. Das Einsetzen der Drosselvorschrift in die Kontinuitätsgleichung

$$\frac{dS_t}{dt} = I_t - q_t \quad \text{Gleichung 6-3}$$

führt auf eine inhomogene Differentialgleichung mit konstanten Koeffizienten

$$q_t + K \cdot \frac{dq}{dt} = I_t \quad \text{Gleichung 6-4}$$

mit der Lösung für den absteigenden Ast:

$$q_t = I_t \cdot \left( e^{\frac{1-\Delta t}{K}} - e^{-\frac{t}{K}} \right)$$

Gleichung 6-5

mit  $q_t$ : Abfluss  
 $I_t$ : Zufluss, mit  $I_t = Nw_t * A_E$   
 $Nw_t$ : Abflusswirksame Niederschlagsintensität  
 $A_E$ : Einzugsgebietsfläche  
 $K$ : Speicherkonstante  
 $\Delta t$ : Zeitschritt

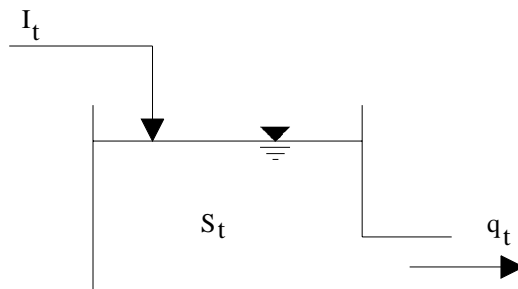


Abb. 6-6 Linearer Einzelspeicher

Die Linearität und Invarianz des Einheitganglinienverfahrens legt nahe, vor der Simulation die Ordinaten der Einheitganglinie zu berechnen. Bei der Simulation werden die Ordinaten mit den abflusswirksamen Niederschlägen multipliziert und zeitgerecht überlagert (siehe Kapitel 6.1).

$$q_t = \sum_{i=1}^L Nw_{t-i+1} \cdot A_E \cdot E_i$$

Gleichung 6-6

mit  $q_t$ : Oberflächenabfluss  
 $Nw_t$ : abflusswirksamer Niederschlag  
 $E_i$ : Ordinaten der Einheitganglinie  
 $A_E$ : Einzugsgebietsfläche  
 $L$ : Anzahl der Ordinaten der Einheitganglinie

Zur Berechnung der Abflussganglinie sind für jeden Zeitschritt so viele Operationen erforderlich, wie die Einheitsganglinie Ordinaten besitzt. Jede Operation besteht dabei aus der Multiplikation des abflusswirksamen Niederschlages mit der Ordinate der Einheitsganglinie und der anschließenden Addition der einzelnen Teilkomponenten.

Besonders für Einheitsganglinien, die aus vielen Zeitschritten bestehen, d.h. im Verhältnis zum Zeitschritt lang sind, fallen bei einer Langzeitsimulation eine erhebliche Anzahl an Rechenoperationen an. Zieht man zusätzlich in Betracht, dass für jede Teilfläche eine Einheitsganglinie erforderlich ist, wird die Bedeutung der Abflusskonzentrationsberechnung hinsichtlich der Rechenzeit deutlich.

Alternativ kann eine gleichwertige Lösung der Gleichung 6-4 (SCHOLZ [1987, c]) verwendet werden, die im Gegensatz zu Gleichung 6-5 das Abflussverhalten eines Einzelspeichers rekursiv und somit mit wesentlich verringertem Rechenaufwand beschreiben kann. In Abhängigkeit vom Verhältnis zwischen  $\Delta t$  und  $K$  verringert sich die Rechenzeit bei Verwendung der Gleichung 6-7 gegenüber der Gleichung 6-6 um den Faktor 2 bis 20 (vgl. SCHOLZ [1987, c]).

$$q_t = \alpha \cdot q_{t-1} + (1 - \alpha) \cdot N_{w,t} \cdot A_E \quad \text{mit } \alpha = e^{-\frac{\Delta t}{K}} \text{ und } t > 0 \quad \text{Gleichung 6-7}$$

### 6.2.1.1 Volumentreue

Die Abflusskonzentration ist volumentreu. Definitionsgemäß muss sich auch für die rekursive Form für einen Einheitsimpuls "1" eine Einheitsimpulsantwort von "1" einstellen. Die Summe aller Ordinaten muss dem Einheitsimpuls, also "1" entsprechen

$$\sum_{t=0}^{\infty} q_t \stackrel{!}{=} 1 \quad \text{Gleichung 6-8}$$

Wegen der Gleichung 6-7 gilt für  $N_{W,t} = 0$ , dass die Quotienten aufeinander folgender Werte konstant sind.

$$\frac{q_t}{q_{t-1}} = \alpha = \text{const.}$$

Gleichung 6-9

Eine derartige Zeitreihe wird auch geometrische Folge genannt. Zur Berechnung des Integrals wird die Ordinate der Einheitsganglinie aufsummiert. Für die Summe einer geometrischen Folge gilt:

$$\sum_{t=1}^n q_t = q_1 \cdot \sum_{t=1}^n \alpha^{(t-1)} = q_1 \cdot \frac{\alpha^n - 1}{\alpha - 1}$$

Gleichung 6-10

Für  $q_1$  kann der Einheitsimpuls "1" eingesetzt werden, so dass man letztlich

$$\sum_{t=1}^n q_t = 1 \cdot (1 - \alpha) \cdot \frac{\alpha^n - 1}{\alpha - 1} = 1 \cdot (1 - \alpha^n)$$

Gleichung 6-11

erhält. Für eine Grenzbetrachtung geht  $n \rightarrow \infty$ .

$$\sum_{t=1}^{\infty} q_t = 1 \cdot (1 - \alpha^{\infty}) \quad \text{mit } \alpha = e^{-\frac{\Delta t}{K}}$$

Gleichung 6-12

Für nichtnegative Zeitschritte und positive Speicherkonstanten gilt immer  $\alpha < 0$ , so dass

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha^n = 0 \quad \text{Gleichung 6-13}$$

Damit kann gezeigt werden, dass

$$\sum_{t=1}^{\infty} q_t = 1 \cdot (1 - \alpha^\infty) \rightarrow 1 \quad \text{Gleichung 6-14}$$

strebt.

#### 6.2.1.2 Einschränkungen

PAULSEN [1987] gibt für die Anwendung der Gleichung 6-5 die Bedingung  $K < \Delta t$  an.

Für den Fall  $K < \Delta t$  treten Volumenfehler auf, die z. B. für  $K \leq 0.2 \cdot \Delta t$ , was z. B. bei einem Zeitschritt von 5 Minuten einer Speicherkonstanten von 1 Minute entspricht, größer als 50 % sind. In praktischen Berechnungen werden daher häufig Korrekturterme eingeführt.

Dieser Volumenfehler kann in der rekursiven Form nach Gleichung 6-7 nicht auftreten. Für den Fall des linearen Einzelspeichers

Gleichung 6-15

$$q_t = \alpha \cdot q_{t-1} + (1 - \alpha) \cdot N_{Wt} \cdot A_E \quad \text{mit } \alpha = e^{-\frac{\Delta t}{K}} \text{ und } \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \alpha = 1$$

ergibt sich für den Fall  $K \ll 0.2 \cdot \Delta t$  z. B. für  $K \rightarrow 0$  Folgendes:



$$\lim \alpha = \lim e^{-\frac{\Delta t}{K}}. \text{ Für } K \rightarrow 0 \text{ folgt } \alpha \rightarrow 0.$$

Gleichung 6-16

$$q_t = N_{Wt} \cdot A_E \quad \text{für } N_{Wt} > 0 \text{ und}$$

$$q_t = 0 \quad \text{für } N_{Wt} = 0$$

Das System besitzt keine Retentionswirkung. Der Einheitsimpuls wird noch im gleichen Zeitschritt vollständig weitergegeben. Das Ergebnis ist somit plausibel. Beachtenswert ist, dass keine Anwendungsgrenze für die rekursive Berechnung erforderlich ist.

### 6.2.2 Lineare Speicherkaskade

Die logische Weiterentwicklung des linearen Einzelspeichers ist die Speicherkaskade. Die lineare Speicherkaskade setzt sich aus mehreren Einzelspeichern zusammen, die zu einer Kaskade in Reihe geschaltet sind.

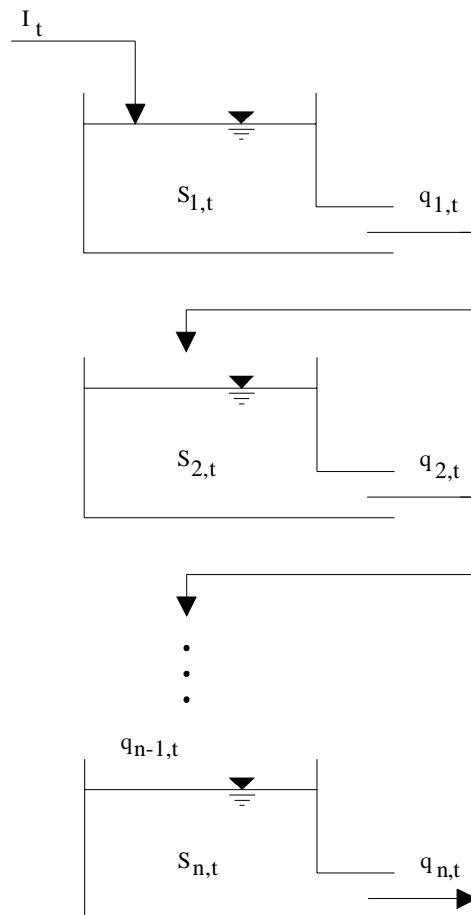


Abb. 6-7 Lineare Speicherkaskade

Der Abfluss des oberen Speichers ist der Zufluss des nächsten unteren Speichers. Prinzipiell sind unterschiedliche Eigenschaften der Speicher denkbar, in der Regel wird jedoch die gleiche Speicherkonstante für alle Speicher verwendet. Als Lösung des Differentialgleichungssystems gibt PAULSEN [1987] für  $\Delta t \leq K$  an

$$q_t = \frac{I_t}{K \cdot (n-1)!} \cdot \left(\frac{t}{K}\right)^{(n-1)} \cdot e^{-\left(\frac{t}{K}\right)} \quad \text{Gleichung 6-17}$$

In rekursiver Form kann der Abfluss  $q$  zu einem Zeitpunkt aus einem Speicher  $j$  als eine Funktion vorhergehender Abflüsse und dem Zufluss angeschrieben werden.

$$q_{t,j} = \alpha \cdot q_{t-1,j} + (1 - \alpha) \cdot q_{t,j-1} \quad \text{Gleichung 6-18}$$

mit

$$\alpha = e^{-\frac{\Delta t}{K}}$$

Für den ersten Speicher gilt:

$$q_{t,1} = \alpha \cdot q_{t-1,1} + (1 - \alpha) \cdot N_{Wt} \cdot A_E \quad \text{Gleichung 6-19}$$

Der Abfluss  $q_{t,n}$  (mit  $n$  = Anzahl der Speicher) entspricht dem Abfluss aus der Speicherkaskade.

Da der lineare Einzelspeicher volumentreu ist, muss die lineare Speicherkaskade ebenfalls volumentreu sein.

Einschränkungen zum Berechnungszeitschritt bestehen - wie beim linearen Einzelspeicher - nicht.

Der Einfluss der Modellparameter  $n$  und  $K$  ist ähnlich. Ein großer Wert für die Speicherkonstante  $K$  vergrößert die Retentionszeit und dämpft die Abflussganglinie. Eine große Anzahl  $n$  der Speicher wirkt sich ebenfalls dämpfend aus.

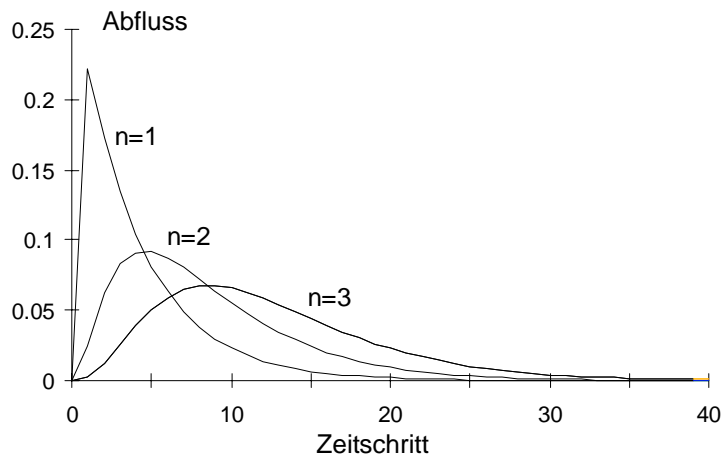


Abb. 6-8 Variation der Anzahl der Speicher

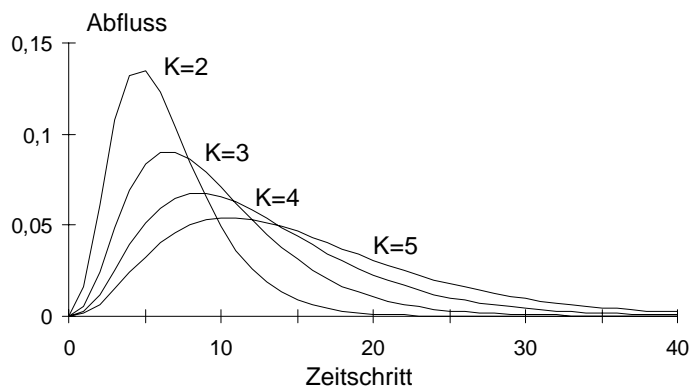


Abb. 6-9 Variation der Speicherkonstanten mit  $n=3$

### 6.3 Nichtlineare Abflusskonzentrationsberechnung

Bei einer Berechnung mit einem linearen Einzelspeicher wird zugrunde gelegt, dass der Abfluss linear vom Niederschlag abhängig ist. Tatsächlich wird sich jedoch der Abfluss mit größer werdendem Niederschlag deutlich mehr vergrößern als der Niederschlag selbst. Ursache sind Reibungseffekte, die mit zunehmender Fließtiefe stark abnehmen. Diese Einflüsse werden mit einer linearen Speicherkaskade vernachlässigt. Der Abfluss ist unabhängig vom aktuellen Abflussgeschehen und somit unabhängig von der Reibung auf der Oberfläche. Die Linearität kann jedoch mit einer variablen Speicherkonstante aufgehoben werden.

#### 6.3.1 Nichtlinearer Einzelspeicher

Zur Aufhebung dieser Linearität ist eine variable Speicherkonstante einzuführen. Mit einer Änderung der Speicherkonstante ginge jedoch beim Ansatz eines linearen Einzelspeichers eine Veränderung des Abflussvolumens einher. Für den Ablauf einer Welle mit einem linearen Einzelspeicher mit  $q_{zu, t} = 0$  und  $q_{t-1} > 0$  gilt:

$$q_t = \alpha \cdot q_{t-1} \quad \text{Gleichung 6-20}$$

Für die Abflusssumme  $\sum q_t$  liegt eine geometrische Folge vor

$$\sum q_t = q_{t-1} \cdot \frac{\alpha^n - 1}{\alpha - 1} \quad \text{Gleichung 6-21}$$

für

$$n \rightarrow \infty$$

gilt:

$$\sum q_t = q_{t-1} \cdot \frac{-1}{\alpha - 1} \quad \text{Gleichung 6-22}$$

Bei der Änderung des Werts der Speicherkonstante von  $K_1$  nach  $K_2$  ergeben sich bei gleichem Startwert  $q_{t-1}$  unterschiedliche Abflusssummen.

mit

$$\alpha_{K1} = e^{-\frac{\Delta t}{K_1}}$$

Gleichung 6-23

bzw.

$$\alpha_{K2} = e^{-\frac{\Delta t}{K_2}}$$

ergibt sich

$$\sum q_{t, K1} = q_{t-1} \cdot \frac{-1}{\alpha_{K1} - 1}$$

bzw.

$$\sum q_{t, K2} = q_{t-1} \cdot \frac{-1}{\alpha_{K2} - 1}$$

Bei Änderung der Speicherkonstanten von  $K_1$  auf  $K_2$  ergibt sich somit ein Volumenfehler VOL:

$$Vol = q_{t-1} \cdot \left( \frac{1}{\alpha_{K1} - 1} - \frac{1}{1 - \alpha_{K2}} \right)$$

Gleichung 6-24

Mit der zeitabhängigen Einführung einer variablen Speicherkonstante  $K_t$  bzw.

$$\alpha_t = e^{-\frac{\Delta t}{K_t}}$$

ergibt sich bei der Änderung der Speicherkonstanten  $K_t \leftrightarrow K_{t-1}$  ein Volumenfehler, der durch einen Korrekturterm ausgeglichen werden kann. Der Korrekturterm geht als Zufluss ein und gleicht in jedem Zeitschritt den Volumenfehler aus.

$$q_t = q_{t-1} \cdot \alpha_t + (1 - \alpha_t) \cdot q_{zu} + (1 - \alpha_t) \cdot Vol$$

Gleichung 6-25

$$q_t = q_{t-1} \cdot \frac{\alpha_{t-1} \cdot (1 - \alpha_t)}{(1 - \alpha_{t-1})} + (1 - \alpha_t) \cdot q_{zu, t}$$

Die Gleichung kann vereinfacht werden zur Arbeitsgleichung:

$$q_t = f_{2,t} \cdot (f_{1,t} \cdot q_{t-1} + q_{zu,t})$$

Gleichung 6-26

mit

$$f_{2,t} = 1 - \alpha_t$$

$$f_{1,t} = \frac{\alpha_{t-1}}{1 - \alpha_{t-1}}$$

Der Übergang zur Berechnung von Abflussganglinien, die sich aus mehreren Teilwellen zusammensetzen, kann für den nichtlinearen Einzelspeicher nachvollzogen werden. In der allgemeinen Form kann der Niederschlag das System nicht nur zum Zeitpunkt  $t=1$ , sondern zu beliebigen Zeitpunkten beeinflussen. Zugleich können statt des Einheitsimpulses der abflusswirksame Niederschlag und die Einzugsgebietsfläche eingesetzt werden.

$$q_t = f_{2,t} \cdot (f_{1,t} \cdot q_{t-1} + A_E N w_t)$$

Gleichung 6-27

mit

$$f_{2,t} = 1 - \alpha_t$$

$$f_{1,t} = \frac{\alpha_{t-1}}{1 - \alpha_{t-1}}$$

Hiermit kann eine Gleichung zur Verfügung gestellt werden, die für eine veränderliche Speicherkonstante eine rekursive Berechnung des Abflussgeschehens ermöglicht.

Die Volumentreue der nichtlinearen Einzelspeicher ist durch den Korrekturterm schon vom Grundsatz her erfüllt.

Zur Festlegung der Speicherkonstanten ist eine Zustandsfunktion für die Speicherkonstante einzuführen, die die Abhängigkeit vom aktuellen hydrologischen Prozess beschreibt. Von Bedeutung ist dabei, dass die Speicherkonstante die mittlere Aufenthaltszeit im Speicher repräsentiert. Bei großen Abflüssen ist die mittlere

Aufenthaltszeit gering und somit die Speicherkonstante klein. Bei geringen Abflüssen ist die mittlere Aufenthaltszeit groß und somit die Speicherkonstante groß. Hierfür kann generell die Speicherkonstante  $K_t$  als Funktion der aktuellen Regenabflussspende  $q_{r,t}$  beschrieben werden.

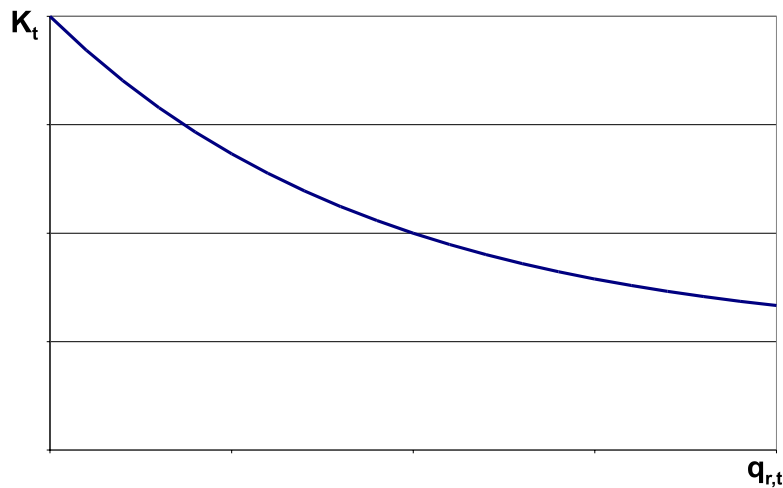


Abb. 6-10 Speicherkonstante als Funktion der aktuellen Regenabflussspende

### 6.3.2 Nichtlineare Speicherkaskade

Mit der Vorgabe, dass eine Speicherkaskade aus  $n$  nichtlinearen Einzelspeichern besteht, kann der Abfluss aus einem Speicher  $j$  der Speicherkaskade mit

$$q_{t,j} = f_{2,t} \cdot (f_{1,t} \cdot q_{t-1} + q_{t,j-1}) \quad \text{Gleichung 6-28}$$

mit

$$f_{2,t} = 1 - \alpha_t$$

$$f_{1,t} = \frac{\alpha_{t-1}}{1 - \alpha_{t-1}}$$

beschrieben werden.

Für den ersten Speicher gilt:

$$q_{t,j} = f_{2,t} \cdot (f_{1,t} \cdot q_{t-1} + A_E N w_t)$$

Gleichung 6-29

Der Abfluss des letzten Speichers entspricht dem Abfluss aus der gesamten Kaskade. Die programminterne Berechnung erfolgt durch eine rekursive Abarbeitung sowohl über die Zeitachse als auch über die Anzahl der Speicher.

Da der nichtlineare Einzelspeicher volumentreu ist, muss auch die nichtlineare Speicherkaskade, die sich aus n nichtlinearen Einzelspeichern zusammensetzt, volumentreu sein.

## 6.4 Berechnung von Abflusskonzentrationsparametern

### 6.4.1 Mittlere Speicherkonstanten für befestigte und unbefestigte Flächen

Durch vielfache Anwendung der Speicherkaskade in der Stadthydrologie hat sich herausgestellt, dass eine Speicheranzahl von  $n=3$  eine sinnvolle Festlegung sein kann. Mit der Beziehung  $t_L = n \cdot K$  kann die Bestimmung der Speicherkonstanten  $K$  auf die Abschätzung von  $t_L$  reduziert werden. Hierfür sind in der Literatur zahlreiche Hinweise zu finden (z. B. HARMS/VERWORN [1984], WACKERMANN [1981]).

Für Einzugsgebiete von Nebensammlern, bei denen in der Abflusskonzentration auch das Abflussverhalten der Rohre enthalten ist, kann nach EULER [1987] ebenfalls  $n=3$  gewählt werden, während  $K$  aus der empirischen Beziehung

$$K = 0,25 \cdot t_c \quad \text{Gleichung 6-30}$$

folgt.

Dabei ist  $t_c$  die längste Fließzeit im Einzugsgebiet unter Einschluss der Oberflächenfließzeit, also

$$t_c = t_f + t_a \quad \text{Gleichung 6-31}$$

mit  $t_f$ : längste Fließzeit im Kanal bei Vollfüllung (folgt aus hydraulischer Berechnung)

$t_a$ : Oberflächenfließzeit mit folgenden Richtwerten:

Tab. 6-1 Richtwerte für Fließzeiten bei befestigten und unbefestigten Flächen

	befestigte Flächen	unbefestigte Flächen
flaches Gefälle	3-5 min	6-10 min
mittleres Gefälle	2-3 min	4-6 min
steiles Gefälle	1 min	2-4 min

#### 6.4.2 Mittlere Speicherkonstanten für natürliche Flächen

Natürliche Flächen werden mit einer Parallelspeicherkaskade gerechnet. Mit einer Kaskade wird der Direktabfluss und mit der anderen Kaskade wird der gegenüber dem Direktabfluss verzögerte Abfluss in ungesättigten Bodenzonen (Interflow) beschrieben.

Die Speicherkonstanten  $K_1$  für den Direktabfluss und  $K_2$  für den Interflow werden nach WACKERMANN in: DVWK [1984] für  $n = 2$  wie folgt angegeben:

$$K_1 = 0,731 \cdot \left( \frac{L}{\sqrt{I}} \right)^{0,281}$$

Gleichung 6-32

$$K_2 = 3,04 \cdot K_1^{1,29}$$

- mit L: Länge des Fließgewässers in km  
 I: Gefälle über L  
 $K_1$ : Speicherkonstante Direktabfluss in Stunden [h]  
 $K_2$ : Speicherkonstante Interflow in Stunden [h]

Das Gefälle wird dabei aufgrund der Neigungsklasse geschätzt:

- ◆ Neigungsklasse 1: 1,0 %
- ◆ Neigungsklasse 2: 2,5 %
- ◆ Neigungsklasse 3: 7,0 %
- ◆ Neigungsklasse 4: 10,0 %

Der Anteil  $\alpha$  des Direktabflusses ergibt sich nach [WACKERMANN] zu

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

Gleichung 6-33

Für den Anteil des Interflows ist  $(1 - \alpha)$  anzusetzen.

### 6.4.3 Parameter der nichtlinearen Speicherkaskade

Mit der nichtlinearen Speicherkaskade soll auf der Grundlage einer mittleren Speicherkonstanten der Effekt berücksichtigt werden, dass mit zunehmendem Abfluss mit einer Verringerung der Aufenthaltszeit und somit mit einer kleineren Speicherkonstanten zu rechnen ist. Umgekehrt ist für geringe Abflüsse mit einer größeren Aufenthaltszeit und somit einer größeren Speicherkonstanten zu rechnen. Für mittlere Verhältnisse hingegen wird sich die mittlere Speicherkonstante einstellen. Zur Modellierung kann somit der folgende Ansatz gewählt werden:

Bei einer charakteristischen Regenspende (z. B.  $q_{r,ch} = 100 \text{ l/(s ha)}$ ) stellt sich die mittlere Speicherkonstante  $K$  ein.

Bei einer Regenspende von  $q_r = 0 \text{ l/(s ha)}$  stellt sich die maximale Speicherkonstante  $K_{max}$  ein.

Bei einer unendlich großen Regenspende stellt sich die minimale Speicherkonstante  $K_{min}$  ein.

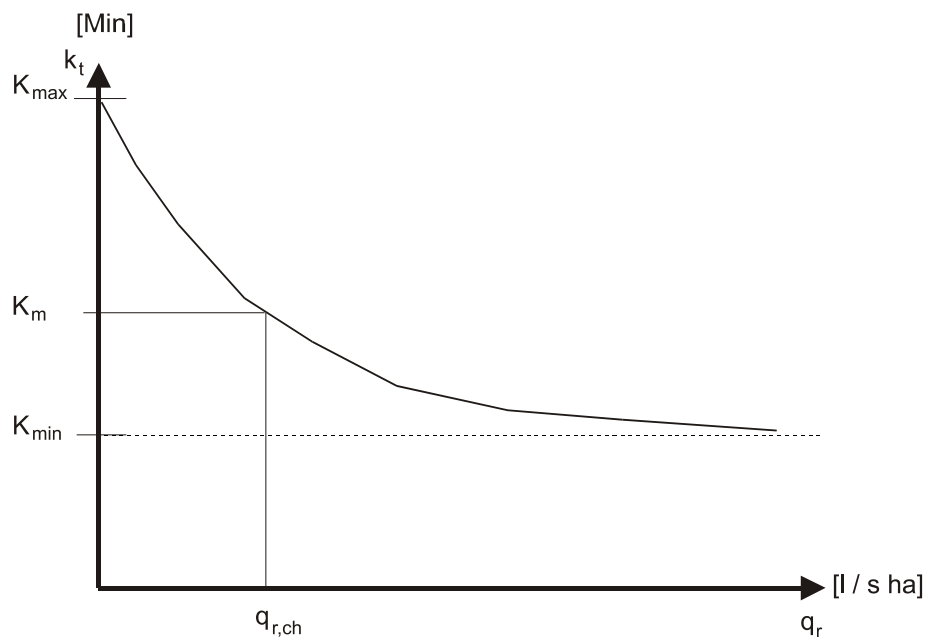


Abb. 6-11 Parameter der nichtlinearen Speicherkaskade

Zur Beschreibung kann der Ansatz

$$K_{q_r} = K_{\text{Min}} + (K_{\text{Max}} - K_{\text{Min}}) \cdot e^{-c \cdot q_r}$$

Gleichung 6-34

gewählt werden. Es gilt:

$K_{\text{Max}}$ : Maximale Speicherkonstante [Min]

$K_{\text{Min}}$ : Minimale Speicherkonstante [Min]

$K_m$ : Mittlere Speicherkonstante bei der charakteristischen Abflussspende  $q_{r, \text{ch}}$  [Min]

$q_r$ : Abflussspende bezogen auf die Gebietsfläche

Für  $K_{\text{Max}} > K_m > K_{\text{Min}}$  und  $K_{\text{Max}}, K_{\text{Min}}, K_m > 0$  gilt

$$c = \frac{\text{Ln} \left[ \frac{K_{\text{Max}} - K_{\text{Min}}}{K_m - K_{\text{Min}}} \right]}{q_{r, \text{ch}}}$$

Gleichung 6-35

Für  $K_{\text{Max}} = K_m = K_{\text{Min}}$  und  $K_{\text{Max}}, K_{\text{Min}}, K_m > 0$  gilt  $c = 0$

KOSIM erwartet statt  $K_{\text{min}}$  und  $K_{\text{max}}$  jeweils das Verhältnis zwischen der maximalen bzw. minimalen Speicherkonstante zur mittleren Speicherkonstante  $K$ .

$fK_{\text{Min}} = K_{\text{Min}}/K$  bzw.  $fK_{\text{Max}} = K_{\text{Max}}/K$

Für eine charakteristische Regenabflussspende von  $100 \text{ l / (s ha)}$  und  $fK_{\text{Min}} = 0,5$  und  $fK_{\text{Max}} = 2,0$  und  $K = 10 \text{ Min}$  ( $K_{\text{Min}} = 5 \text{ Min}$ ,  $K_{\text{Max}} = 20 \text{ Min}$ ) ergibt sich für ein beispielhaftes Ereignis der folgende Verlauf.

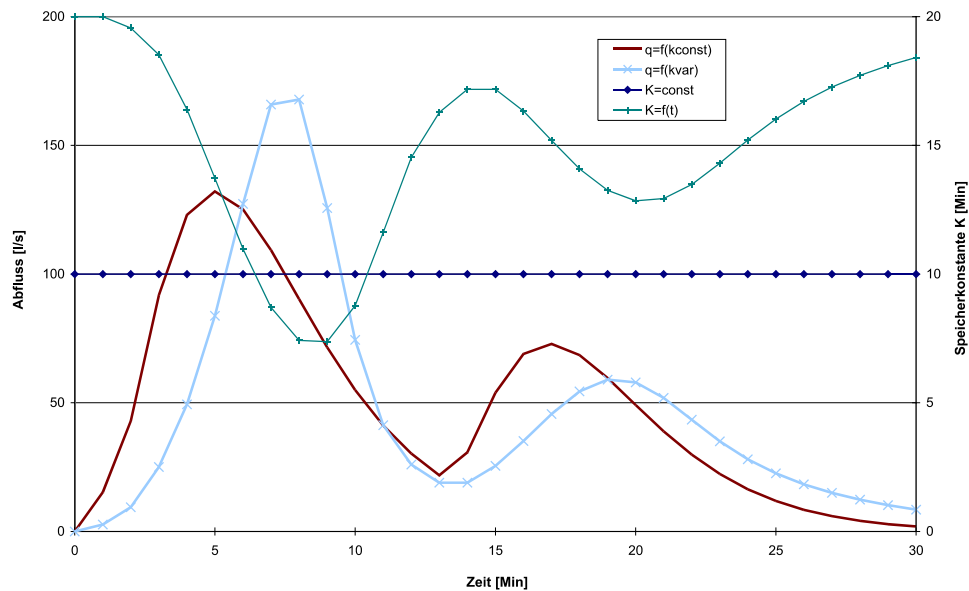


Abb. 6-12 Vergleich lineare und nichtlineare Speicherkaskade

## 7 Abflusstransport

Die in den Teileinzugsgebieten anfallenden Wassermengen des Schmutz- und Regenwasserabflusses werden in den Abflustransportelementen gesammelt und transportiert. Dabei bedeutet gesammelt, dass die einzelnen Abflusskomponenten zeitgerecht überlagert werden. Der Abflusstransport führt zu einem zeitlichen Versatz (Translation) und zu einer Dämpfung der Abflusswelle. Der Abflusstransport ist in jedem Fall volumentreu. Die Summe von Zu- und Abfluss ist immer gleich.

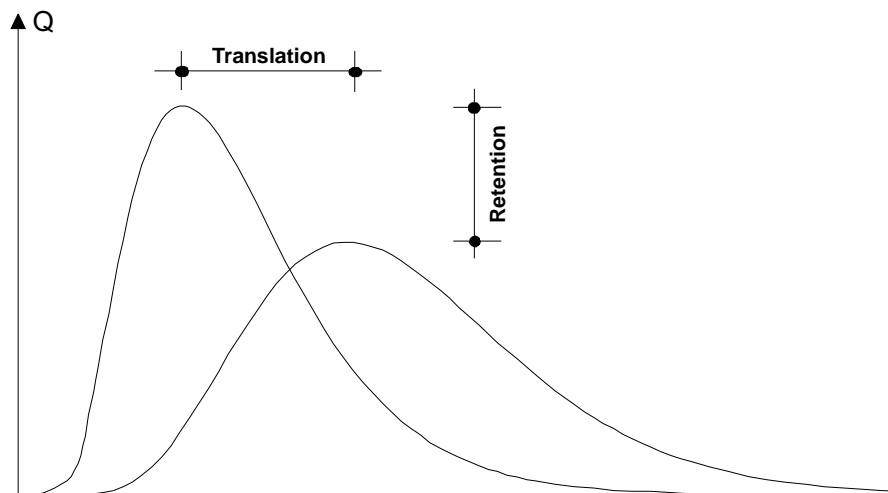


Abb. 7-1 Translation und Retention in einer Abflustransportstrecke

In KOSIM kann der Abflusstransport entweder als reine Translation oder als Translation mit Berücksichtigung der Retention berechnet werden.

## 7.1 Berechnung mit Translation

Es wird der Zeitversatz (konstante Fließzeit) zwischen Zu- und Abfluss betrachtet.

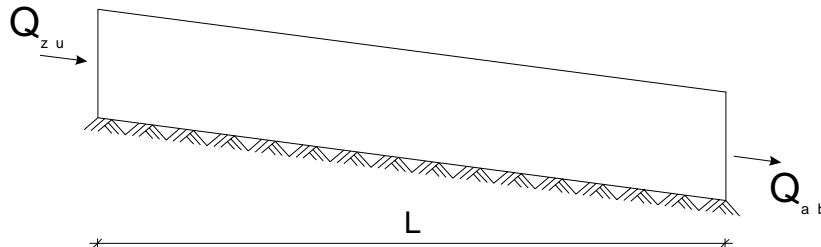


Abb. 7-2 Gerinneabschnitt

Der Zeitversatz entspricht der Fließzeit zwischen Anfangs- und Endpunkt. Dabei wird i.d.R. die Fließzeit bei Vollfüllung verwendet. Die Berechnung erfolgt über die Fließgeschwindigkeit bei Vollfüllung

$$t_{t,voll} = \frac{L}{V_{voll}}$$

Gleichung 7-1

In KOSIM kann die Fließzeit bei Vollfüllung aus den Sammlerdaten bestimmt werden. Aus technischen Gründen muss die Fließzeit ein ganzzahliges Vielfaches des Zeitschrittes sein. Die Berechnung erfolgt in der Form, dass in einem Feld Abflüsse solange vorgehalten werden bis die Fließzeit erreicht ist.

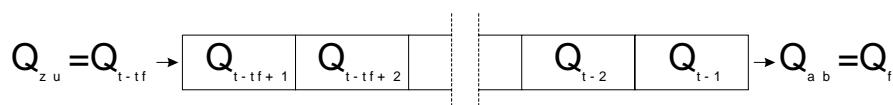


Abb. 7-3 Berechnung der Translation in KOSIM

## 7.2 Berechnung mit Retention

Die Berechnung erfolgt nach dem Kalinin-Miljukov-Verfahren. Wenn man eine bestimmte Gerinnestrecke betrachtet, kann für den stationären Abfluss die Gerinnestrecke als ein Speicher aufgefasst werden.

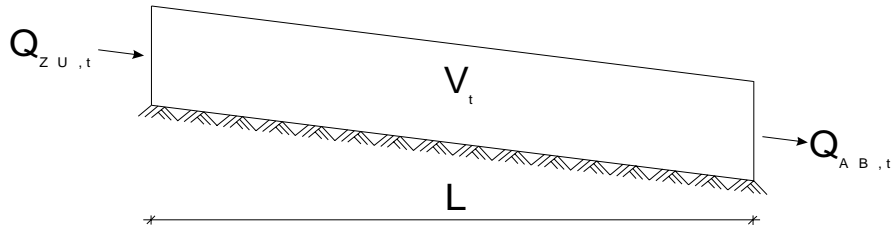


Abb. 7-4 Gerinneabschnitt als Speicher

Analog zur Vorgehensweise bei der Abflusskonzentration kann auch hier eine Vorschrift für das Abflussverhalten

$$q_{ab,t} = \frac{1}{K} \cdot V_t$$

Gleichung 7-2

formuliert werden.

Die Retentionskonstante K beschreibt das mittlere Abflussverhalten der Gerinnestrecke. Die Kontinuitätsgleichung lautet hier als Differentialgleichung

$$\frac{dV}{dt} = Q_{zu,t} - Q_{ab,t}$$

Gleichung 7-3

Das Einsetzen der Drosselvorschrift führt auf eine inhomogene Differentialgleichung mit konstanten Koeffizienten.

$$q_{ab,t} + K \cdot \frac{dq}{dt} = q_{zu,t}$$

Gleichung 7-4

Die Lösung in rekursiver Form nach Euler (EULER [1983]) lautet

$$q_t = q_{t-1} \cdot \alpha + qz u_t \cdot \beta + qz u_{t-1} \cdot \gamma$$

Gleichung 7-5

Die Lösung ist identisch mit der Lösung für die Abflusskonzentration und gilt für einen Gerinneabschnitt der Lösung L. Nach dem Kalinin-Miljukov-Verfahren wird diese Länge als charakteristische Länge bezeichnet.

Für die Parameter gilt:

$$\text{charakteristische Länge (m): } L = 0,4 \cdot \frac{D}{I_s}$$

Gleichung 7-6

$$\text{Retentionskonstante (sec): } K = 0,64 \cdot L \cdot \frac{D^2}{Q_v}$$

- mit D: Kreisrohrdurchmesser bzw. hydraulischer Durchmesser in m  
 $I_s$ : Sohlgefälle des Rohres  
 $Q_v$ : scheinvolle Abflussleistung des Rohres in  $\text{m}^3 / \text{s}$

Die scheinvolle Abflussleistung des Rohres wird nach dem Fließgesetz von Prandtl-Colebrook berechnet mit

$$Q_v = A_v \left[ -2 \cdot \lg \left[ \frac{2,51 \cdot v}{D \sqrt{2g D I_s}} + \frac{k_b}{3,71 D} \right] \cdot \sqrt{2g D I_s} \right]$$

Gleichung 7-7

- mit  $A_v$ : Querschnittsfläche des Profils in  $\text{m}^2$   
 $v$ : kinematische Viskosität in  $\text{m}^2 / \text{s}$   
 $k_b$ : Betriebsrauheit in m  
 $g$ : Erdbeschleunigung in  $\text{m} / \text{s}^2$

Ein Berechnungsabschnitt kann aus mehreren charakteristischen Abschnitten bestehen. Entsprechend der charakteristischen Länge  $L$  wird die Transportstrecke des Sammlers  $L_g$  in  $n$  gleichlange Berechnungsabschnitte

mit

$$n = \text{int}\left(\frac{L_g}{L} + 1\right)$$

unterteilt. Für die einzelnen Berechnungsabschnitte gelten die angepassten Parameter

$$L^* = L_g / n$$

Gleichung 7-8

$$K^* = K \cdot \frac{L^*}{L}$$

Die einzelnen Berechnungsabschnitte können nacheinander bearbeitet werden. Wie bei der Abflusskonzentration besteht jedoch die Möglichkeit, mehrere Berechnungsabschnitte in einem Schritt zu berechnen. Hierzu können die Abschnitte als eine Folge von Einzelspeichern betrachtet werden, die zu einer linearen Speicherkaskade zusammengefasst werden. Die Arbeitsgleichungen für die Speicherkaskade (siehe Kap. 6.2.2) können unmittelbar auf das hier vorliegende Problem übertragen werden:

$$q_{t,j} = q_{t-1,j} \cdot \alpha + q_{zu,t,j-1} \cdot \beta + q_{zu,t-1,j-1} \cdot \gamma$$

Gleichung 7-9

mit

$j = 1, \dots, n$       Zahl der Berechnungsabschnitte (Speicher)

$$\alpha = e^{\frac{-\Delta t}{abv \cdot K}}$$

$$\beta = 1 - \left( \frac{abv \cdot K^*}{\Delta t} \cdot (1 - \alpha) \right)$$

$$\gamma = \frac{abv \cdot K^*}{\Delta t} \cdot (1 - \alpha) - \alpha$$

$q_{zu,t,0}$  Zufluss zum Transportelement

$q_{t,n}$  Abfluss des Transportelementes

Der Berechnungszeitschritt  $\Delta t$  sollte möglichst kleiner als  $K^*$  gewählt werden:

$$\Delta t < K^*$$

Hierfür wird jeder Transportabschnitt mit einem eigenen Zeitschritt  $\Delta t$  gerechnet. Der Zeitschritt  $\Delta T$  der KOSIM Prozesssimulation ist ein ganzzahliges Vielfaches  $abv$  des Transportzeitschrittes  $\Delta t$ :

$$\Delta t = \frac{\Delta T}{abv}$$

Die Prozesssimulation von KOSIM erfolgt über den Zeitschritt  $\Delta T$ . Für jeden Zeitschritt  $\Delta T$  wird die Abflusssimulation  $abv$ -mal durchlaufen, so dass der Zeitschritt  $\Delta T$  realisiert wird.

### Bedeutung der Retention für die Dimensionierung von Speicherbauwerken

Ein Retentionseffekt ist grundsätzlich immer vorhanden. Der Einfluss der Retention nimmt ab mit

- ◆ zunehmender Steilheit
- ◆ abnehmender Rauheit
- ◆ abnehmender Länge.

Zusätzlich ist das nachfolgende Entlastungsbauwerk von Bedeutung. Für entlastungsspezifische Zielgrößen wie z. B.

- ◆ Entlastungsfracht
- ◆ Entlastungsmenge
- ◆ Entlastungsdauer

ist die Retention nur dann von entscheidender Bedeutung, wenn das spezifische Beckenvolumen sehr klein oder, wie z. B. bei einem Regenüberlauf, Null ist.

Die Ursache ist darin zu sehen, dass durch die Speicherkapazität der Becken Abflussspitzen gepuffert werden können, denn der Abflusstransport ist volumentreu. Unabhängig vom Berechnungsverfahren werden dieselben Abflussmengen transportiert. Nur die zeitliche Verteilung kann unterschiedlich sein. Trifft ein Abflussereignis auf ein leeres Becken, hat der Abflusstransport häufig keine Bedeutung, da alle Wassermengen gespeichert werden können und ein Überlaufen vermieden werden kann. Bei einem Regenüberlauf hingegen hat der Abflusstransport eine wesentlich größere Bedeutung, da kein Speichervermögen vorhanden und der Überlauf von den aktuellen Abflussordinaten abhängig ist.

Es wird empfohlen, Abflusstransportelemente mit nachfolgendem Regenüberlauf unter Berücksichtigung der Retention zu berechnen. In anderen Fällen kann häufig darauf verzichtet werden.

### 7.3 Berechnung mit Retention und Rückstau

Mit diesem modifizierten Kalinin-Miljukov-Verfahren kann der Einfluss des hydrostatischen Rückstaus eines voll- oder teilgefüllten Speicherbauwerks und somit einer voll- oder teilgefüllten Transportstrecke/Haltung berücksichtigt werden.

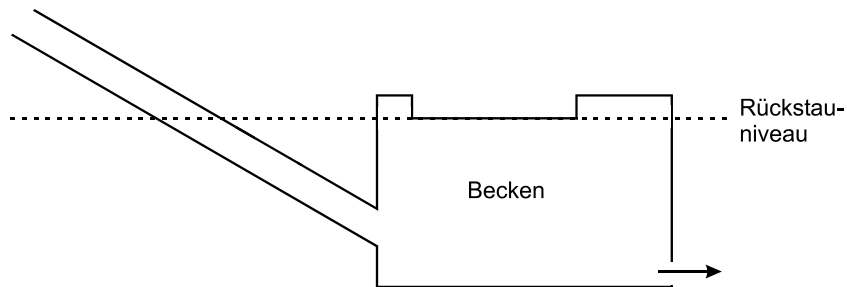


Abb. 7-5 Hydrostatischer Rückstau in KOSIM

Es ist dabei unerheblich, ob eine Transportstrecke/Haltung direkt an ein Speicherbauwerk anschließt. Wesentlich ist das Einstauniveau des Beckens. Wenn in KOSIM die Schalter

- Hydrostatischer Einstau im Eigenschaftsfenster [Simulationsgrunddaten]
- Rückstau im Eigenschaftsfenster des unterhalb liegenden Beckens sowie
- Rückstau in den Eigenschaftsfenstern aller Transportelemente bis zum Becken

gewählt sind, wird bei der Simulation des Speicherbauwerks in Abhängigkeit der geodätischen Höhen das einstaubare Volumen in Transportelementen oberhalb des Beckens mit berücksichtigt bis das Rückstauniveau erreicht ist. Somit kann ggf. das gesamte Transportelement hydrostatisch eingestaut werden. In diesem Fall wird sich jedoch das Transportverhalten verändern. Bei einem vollständigen Einstau der Transportstrecke herrscht Druckabfluss. Jeder Zufluss wird über eine Druckerhöhung unmittelbar weitergegeben. Die Fließzeit bzw. die Speicherkonstante ist Null. Bei einem geringen Einstau wird hingegen das Abflussverhalten dem nicht eingestauten Zustand entsprechen.

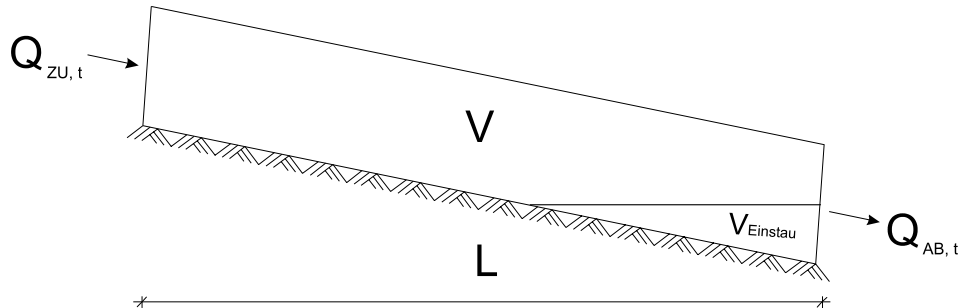


Abb. 7-6 Gerinneabschnitt als Speicher mit hydrostatischem Einstau

Zur modelltechnischen Beschreibung dieser Prozesse wird das Kalinin-Miljukov-Verfahren modifiziert. Im nicht eingestauten Zustand kann das Kalinin-Miljukov-Verfahren verwendet werden. Die Parameter entsprechen in vollem Umfang denen des Kap 7.2.

Für den eingestauten Zustand hingegen wird sich die mittlere Aufenthaltszeit und somit die Speicherkonstante proportional zum Anteil des eingestauten Volumens am gesamten Volumen der Transportstrecken verringern.

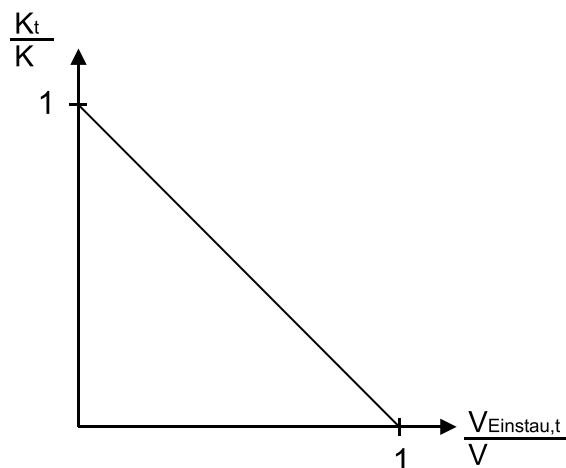


Abb. 7-7 Zusammenhang zwischen dem Verhältnis des aktuellen Einstauvolumens zum maximalen Einstauvolumen und der aktuellen Speicherkonstante zur maximalen Speicherkonstante

In Abhängigkeit des Füllstandes wird somit mit einer variablen Speicherkonstanten gerechnet. Es werden die Ansätze der nichtlinearen Speicherkaskade verwendet:

$$q_{t,j} = q_{t-1,j} \cdot \alpha_t + q_{zu,t,j-1} \cdot \beta_t + q_{zu,t-1,j-1} \cdot \gamma_t \quad \text{Gleichung 7-10}$$

mit

$j = 1, \dots, n$       Berechnungsabschnitt  
 $q_{zu,t,0}$             Zufluss zum Transportelement  
 $q_{t,n}$                 Abfluss des Transportelementes

$$\alpha_t = e^{\frac{-\Delta t}{abv \cdot K_t}}$$

$$\beta_t = 1 - \left( \frac{abv \cdot K_t}{\Delta t} \cdot (1 - \alpha_t) \right)$$

$$\gamma_t = \frac{abv \cdot K_t}{\Delta t} \cdot (1 - \alpha_t) - \alpha_t$$

$$K_t = \frac{V_{\text{Einstau},t}}{V}$$

mit

$V_{\text{Einstau},t}$       eingestautes Volumen des Abflusstransportelementes  
 $V$                     Gesamtvolumen des Abflusstransportelementes

Mit diesem Vorgehen ist es möglich, das Abflusstransportgeschehen in Abhängigkeit des Einstaus im Transportelement zu beschreiben.

## 7.4 Abflussbeschränkung

Unabhängig vom Berechnungsmodus kann mit Abflussbeschränkung der maximale Abfluss des Transportelements festgelegt werden. Abflüsse, die oberhalb des Wertes liegen, werden solange zurückgehalten bis ausreichend Abflusskapazität vorhanden ist.

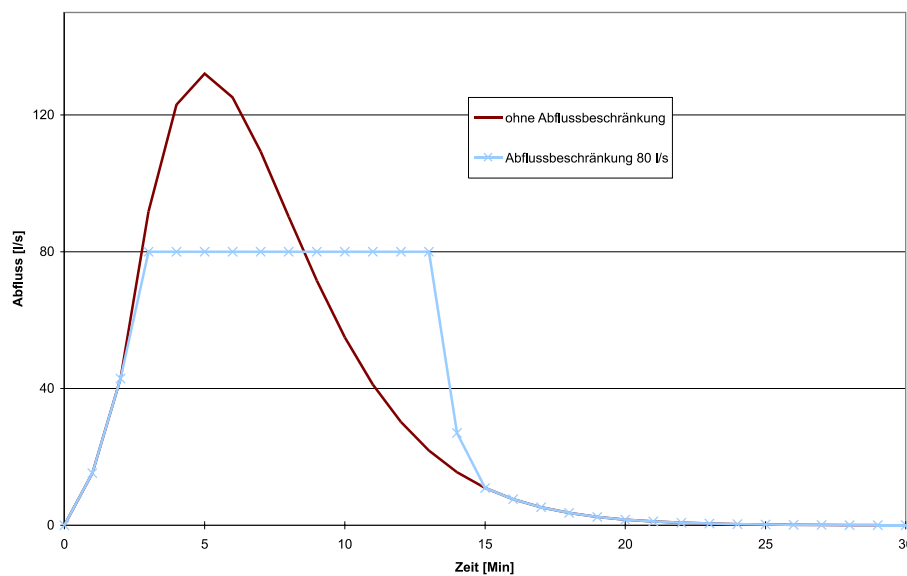


Abb. 7-8 Auswirkungen einer Abflussbeschränkung

## 8 Sonderbauwerke

Es wird unterschieden zwischen

- ◆ Verzweigungen und Regenüberlaufbauwerken, bei denen der Durchfluss entsprechend der hydraulischen Leistungsfähigkeit aufgeteilt wird. Die Berechnung erfolgt durchflussabhängig.
- ◆ Speicherbauwerken, bei denen ein Teil des Zuflusses gespeichert werden kann. Bei Erschöpfung der Speicherkapazität findet eine Entlastung statt. Die Berechnung erfolgt wasserstandsabhängig.

### 8.1 Regenüberläufe und Verzweigungen

Der Unterschied zwischen Regenüberläufen und Verzweigungen besteht darin, dass bei Verzweigungen alle Ströme im System verbleiben, während bei Regenüberläufen i.d.R. eine Entlastung in das Fließwasser stattfindet.

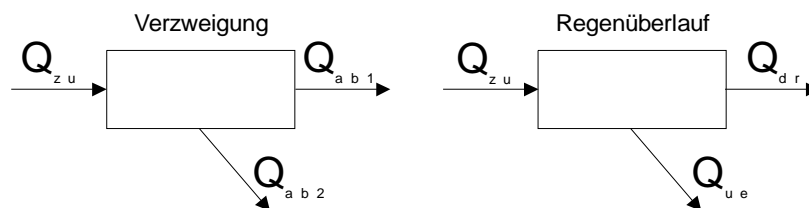


Abb. 8-1 Fließschema Verzweigung bzw. Regenüberlauf

#### 8.1.1 Zuflussabhängige Abflussberechnung

Die Berechnung ist in beiden Fällen gleich. Durch die Eingabe eines funktionalen Zusammenhangs zwischen Zufluss und einer Abflussgröße

$$Q_{ab,1} = f(Q_{zu})$$

Gleichung 8-1

$$Q_{ab,2} = Q_{zu} - Q_{ab,1}$$

kann zunächst eine Abflussgröße bestimmt werden. Der zweite Abfluss ergibt sich aus der Differenz zwischen Zufluss und berechneter Abflussgröße.

Der funktionale Zusammenhang wird Kennlinie genannt.

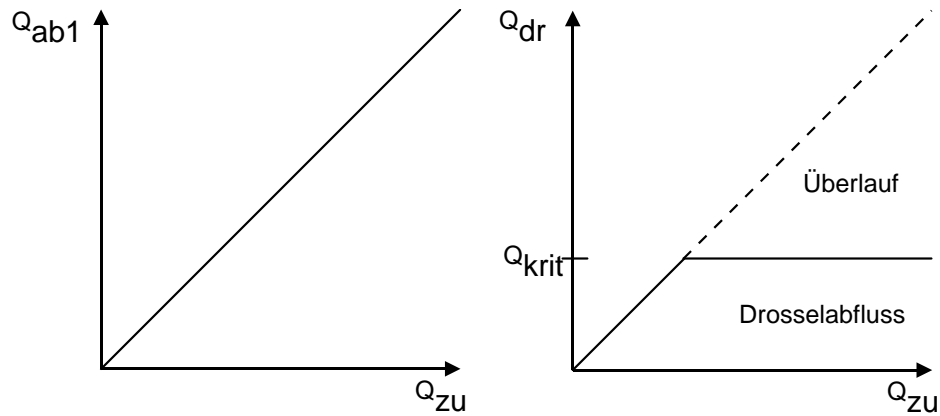


Abb. 8-2 Geometrische Kennlinie

In KOSIM können die Kennlinien direkt eingegeben werden. Es besteht aber auch die Möglichkeit, Kennlinien mit Hilfe von Parametern automatisch zu generieren.

### 8.1.2 Verzweigung

Die Abflussaufteilung in Verzweigungsbauwerken erfolgt häufig über die hydraulische Leistungsfähigkeit der weiterführenden Sammler. Die Aufteilung kann über eine prozentuale Angabe erfolgen, insbesondere dann, wenn die beiden Ablaufkanäle sohlgleich sind.

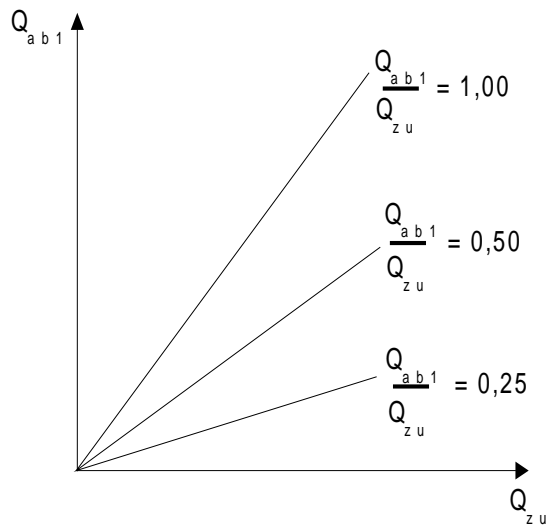


Abb. 8-3 Geometrische Kennlinien für Verzweigungsbauwerk

Die Aufteilung erfolgt dann unabhängig vom aktuellen Zufluss immer zu gleichen Teilen. Die Verzweigungskennlinie kann benutzerdefiniert verändert werden. Damit sind beliebige Konstellationen, z. B. auch Schwellen innerhalb des Systems, realisierbar.

### 8.1.3 Regenüberlauf

Die Funktion eines Regenüberlaufs kann mit einem Schwellwertmodell beschrieben werden. Bis zum Erreichen eines Schwellwertes  $Q_{krit}$  entspricht der Drosselabfluss dem Zulauf. Erst beim Überschreiten des kritischen Zulaufs tritt der Überlauf in Aktion. In grober Näherung wird davon ausgegangen, dass sich der Drosselabfluss nicht weiter als  $Q_{krit}$  erhöht.

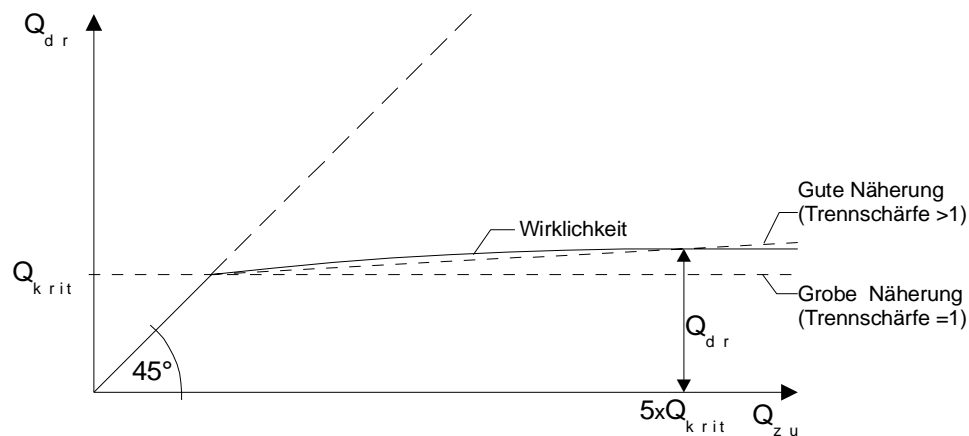


Abb. 8-4 Aufteilungscharakteristik bei Regenüberläufen

In Realität wird sich jedoch eine gewisse Erhöhung der Drosselabflüsse einstellen. Zur Berücksichtigung dieses Effekts wird die Trennschärfe eingeführt.

$$\text{Trennschärfe} = \frac{Q_{ab}(Q_{zu} = 5 \cdot Q_{krit})}{Q_{krit}} \quad \text{Gleichung 8-2}$$

Die Trennschärfe gibt die Erhöhung des Drosselabflusses bei Zufluss von  $5 \cdot Q_{krit}$  an. Eine Trennschärfe von 1 bedeutet, dass keine Erhöhung berücksichtigt wird. Eine Trennschärfe von 1,1 entspricht einer 10 %igen Erhöhung.

## 8.2 Speicherbauwerke

Speicherbauwerke sind Bauwerke, die temporär Wasser speichern und es später gedrosselt weiterleiten. Bei Erschöpfung der Speicherfähigkeit springen ein oder mehrere Überläufe an.

### 8.2.1 Hydraulische Grundlagen zur Abflussberechnung aus Speicherbauwerken

#### Drosselabflüsse

In KOSIM wird zwischen 3 Arten zur Berechnung von Drosselabflüssen unterschieden:

- ◆ Konstante Drosselleistung
- ◆ Druckabhängige Drossel
- ◆ Gesteuerte Drossel

Bei konstanter Drosselleistung wird, unabhängig vom Beckenwasserstand, eine gleichbleibende Drosselleistung angenommen. Baulich wird diese in den Bauwerken durch selbstregulierende Drosseleinrichtungen, wie z. B. Schlauchdrossel, Hydroslide, Wirbeldrossel o.Ä. realisiert.

Die Berechnung druckabhängiger Drosselleistungen erfolgt in KOSIM nach TORRICELLI:

$$Q = \mu \cdot A \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

Gleichung 8-3

- mit
- Q = Drosselleistung [m<sup>3</sup>/s]
  - μ = Drosselbeiwert (i. d. R. zwischen 0,5 und 0,7) [-]
  - A = Drosselquerschnitt [m<sup>2</sup>]
  - g = Erdbeschleunigung (9,81 m/s<sup>2</sup>)
  - h = Wasserstand im Speicherbauwerk [m]

Bei der Wahl einer gesteuerten Drossel wird der Drosselabfluss eines Speicherbauwerks durch den Wasserstand eines anderen Bauwerks definiert. Damit kann die Steuerung eines Beckens durch einen Wasserstand eines beliebigen Speicherbauwerks umgesetzt werden.

## Überläufe

Der Überlauf eines Speicherbauwerkes wird nach der Gleichung von POLENI für den vollkommenen Überfall unter Vernachlässigung der Anströmgeschwindigkeit ermittelt:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot b \cdot h_{ue}^{\frac{3}{2}}$$

Gleichung 8-4

- mit  $Q$  = Überlauf [ $m^3/s$ ]  
 $\mu$  = Überfallbeiwert (i.d.R. zwischen 0,5 und 0,8) [-]  
 $g$  = Erdbeschleunigung ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )  
 $b$  = Schwellenlänge [ $m$ ]  
 $h_{ue}$  = Überfallhöhe [ $m$ ]

Die Wehrformel wird nicht angewendet, wenn für den Klärüberlauf die Direkteingabe (unter [Typ max. KÜ]) gewählt wird. Der maximale Klärüberlauf wird auf den Eingabewert begrenzt. Erst bei Überschreitung dieses Wertes erfolgt die Beckenüberlaufberechnung (nach POLENI).

### 8.2.2 Wasserstandsabhängige Abflussberechnung

Für die Simulation der Füll- und Entlastungsvorgänge wird vorausgesetzt, dass

- ◆ die Zuflussganglinie zum jeweiligen Speicherelement nicht von den Wasserstandsverhältnissen im Speicher beeinflusst wird
- ◆ die Wasserspiegellagen im Speicher stets horizontal sind und damit keine Fließvorgänge im Speicher zu berücksichtigen sind.

Die Füll- und Entleerungsvorgänge eines Speicherbauwerks sind von dessen geometrischen Gegebenheiten abhängig, die nicht zu sehr idealisiert werden dürfen. Während die Vernachlässigung der Fließvorgänge im Becken und die damit verbundene Annahme eines stets horizontalen Wasserspiegels meist akzeptiert werden kann, ist die Berücksichtigung der funktionalen Abhängigkeit von Speichervolumen, Abfluss und Klär- und Beckenüberlauf oder auch Mulden- oder Rigolenüberlauf vom Wasserstand im Speicherbauwerk unbedingt erforderlich.

Diese Stützstellen werden Kennlinien genannt. Kennlinien sind monoton steigend und werden durch Stützstellen definiert. Zwischen den Stützstellen wird geradlinig interpoliert.

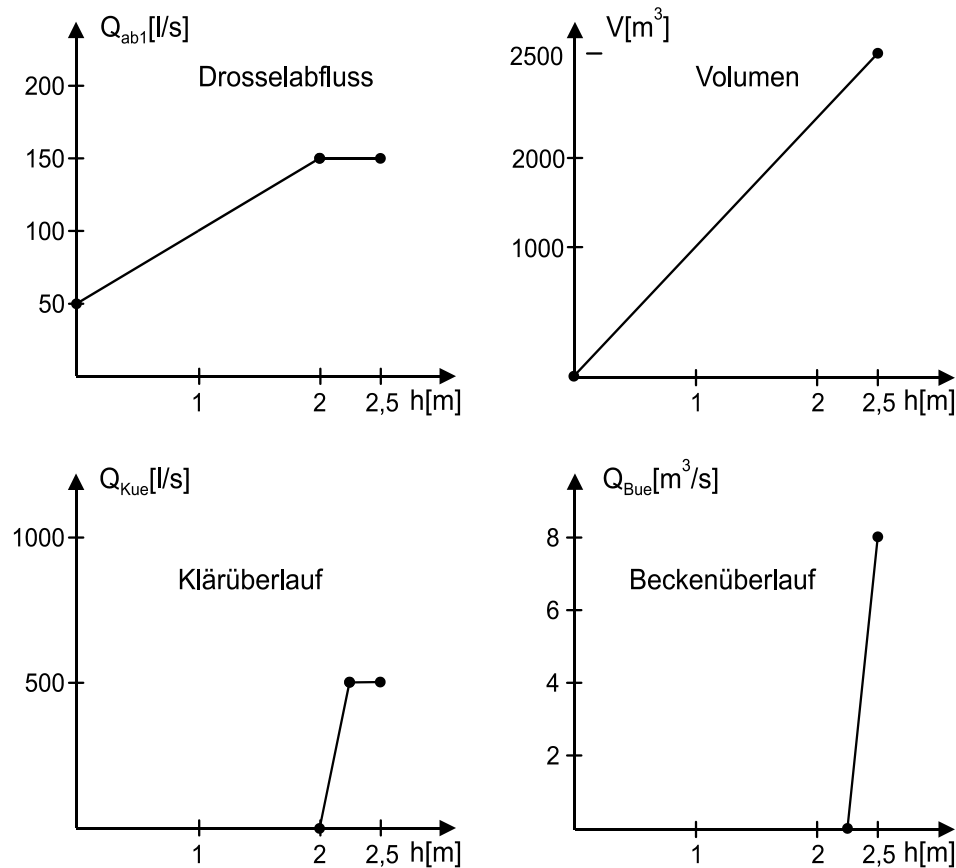


Abb. 8-5 Kennlinien eines Durchlaufbeckens

Die Grundlage für die Berechnung bildet die Gleichung

$$\text{Speicheränderung} = \text{Zufluss} - \text{Abfluss}$$

Gleichung 8-5

$$\text{bzw. } V_t - V_{t-1} = (Q_{zu,t} - Q_{ab,t}) \cdot \Delta t$$

- mit  $V_t$ : Gespeichertes Volumen zum Zeitpunkt  $t$   
 $Q_{zu}$ : Speicherzufluss zum Zeitpunkt  $t$   
 $Q_{ab}$ : Speicherabfluss zum Zeitpunkt  $t$   
 $\Delta t$ : Rechenzeitschritt

Der Abfluss kann sich aus mehreren Komponenten zusammensetzen, wie z. B.

- ◆ Drosselabfluss
- ◆ Klärüberlauf (z. B. Durchlaufbecken)
- ◆ Beckenüberlauf (z. B. Fang- oder Durchlaufbecken)
- ◆ Versickerung (z. B. Mulden oder Rigolen)

Für ein Fangbecken gilt z. B.

$$Q_{ab,t} = Q_{dr,t} + Q_{Bue,t} \quad \text{Gleichung 8-6}$$

Stellt man Gleichung 8-5 so um, dass die bekannten Werte zum Zeitschritt t auf der rechten und nur die unbekannten auf der linken Seite stehen, so erhält man:

$$V_t + Q_{ab,t} \cdot \Delta t = V_{t-1} + Q_{zu,t} \cdot \Delta t = f(h) \quad \text{Gleichung 8-7}$$

Da sowohl das gespeicherte Volumen als auch der Abfluss aus dem Becken eine Funktion des Beckenwasserstands darstellen und auch als solche eingegeben werden, kann die linke Seite der Gleichung als eine Funktion des Wasserstands aufgefasst werden:

$$Z = f(h) = V_t + Q_{ab,t} \cdot \Delta t \quad \text{Gleichung 8-8}$$

Sie kann aus den einzelnen eingegebenen Funktionen

$$\begin{aligned} V &= f(h) \\ Q_{Drossel} &= f(h) \\ Q_{Überlauf} &= f(h) \end{aligned} \quad \text{Gleichung 8-9}$$

vorab ermittelt werden.

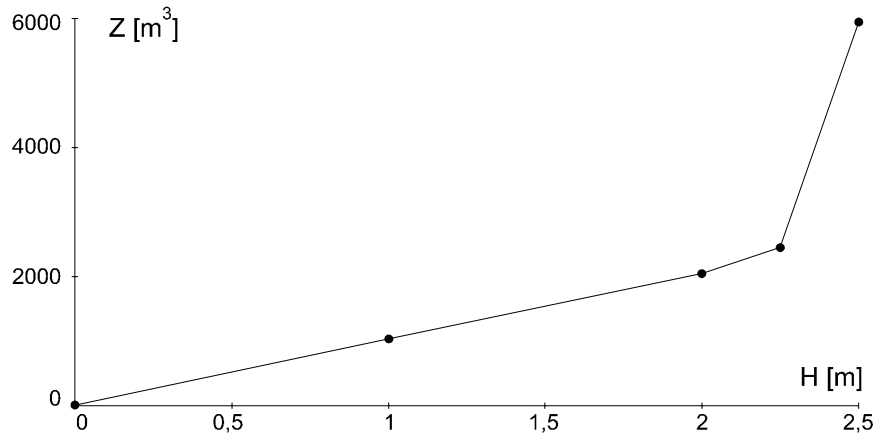


Abb. 8-6 Funktion eines Durchlaufbeckens

Damit kann jedem Wasserstand genau ein Wert der Z-Funktion zugeordnet werden. Bei der Simulation braucht man für jedes Zeitintervall nur noch die rechte Seite der Gleichung zu berechnen

$$Z_t = V_{t-1} + Q_{zu,t} \cdot \Delta t$$

Gleichung 8-10

und diesen Wert  $Z_t$  "rückwärts" in die Z-Funktion einzusetzen.

Danach können für den Wasserstand die einzelnen Werte

$$V_t = f(h_t)$$

$$Q_{dr,t} = f(h_t)$$

$$Q_{Bue,t} = f(h_t)$$

$$Q_{Kue,t} = f(h_t)$$

Gleichung 8-11

berechnet werden.

### 8.2.3 Mischwasserbauwerke (KOSIM-MW + XL)

Mischwasserbauwerke dienen der temporären Speicherung von Mischwasser, das nach Niederschlagsereignissen der Kläranlage zugeführt wird. Ein Teil der anfallenden Wassermengen kann nicht gespeichert werden und entlastet in das Fließgewässer. Alle Mischwasserbauwerke haben simulationstechnisch sehr ähnliche Eigenschaften:

1. Sie weisen ein Speichervolumen auf
2. Sie haben einen Drosselabfluss zur Kläranlage
3. Sie haben einen oder zwei Überläufe (Becken- und ggf. Klärüberlauf)

Der Drosselabfluss kann in KOSIM konstant (z. B. realisiert mit einem Regelorgan) oder variabel über die hydrostatische Druckhöhe nach Toricelli eingegeben werden. Die Überläufe können nach Poleni berechnet werden. Bei den Klärüberläufen kann alternativ eine maximale Leistungsfähigkeit eingegeben werden. Alle Kenngrößen können auch direkt über sogenannte Kennlinien eingegeben werden.

Für Regenrückhaltebecken und Mischwasserbauwerke kann der hydrostatische Rückstau in oberhalb liegende Transportelemente berücksichtigt werden. In diesem Fall wird mit einer Volumenkenlinie gerechnet, die sich aus der Beckenkenlinie und der Summe der durch Rückstau in die Transportelemente aktivierbaren Volumina ergibt.

Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über die Bauwerkstypen, die in KOSIM vorgesehen sind.

#### 8.2.3.1 Fangbecken - Geometrie und Abfluss

Ein Fangbecken hat einen Drosselabfluss und einen Beckenüberlauf. Der Beckenüberlauf ist vor dem Becken angeordnet.

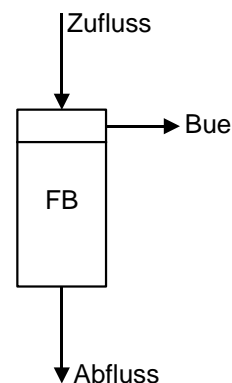


Abb. 8-7 Fangbecken

### 8.2.3.2 Durchlaufbecken - Geometrie und Abfluss

Ein Durchlaufbecken hat zusätzlich einen Klärüberlauf.

Der Klärüberlauf ist im Beckenbereich angeordnet und entlastet teilgereinigtes Abwasser. Die Leistungsfähigkeit des Klärüberlaufs ist i.d.R. begrenzt.

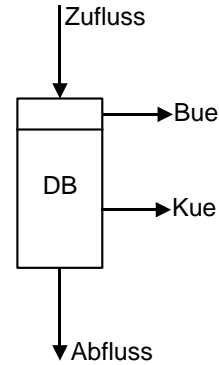


Abb. 8-8 Durchlaufbecken

Fangbecken und Durchlaufbecken können in

- ◆ Haupt- und
- ◆ Nebenschluss

angeordnet werden, was jedoch nur für die Schmutzfrachtberechnung von Bedeutung ist. Im Arbeitsblatt A 128 werden Hinweise zur Gestaltung und Anordnung der Becken gegeben. Die Kennlinien werden in KOSIM für Rechteckbecken generiert.

### 8.2.3.3 Stauraumkanal - Geometrie und Abfluss

Stauraumkanäle sind Sonderformen.

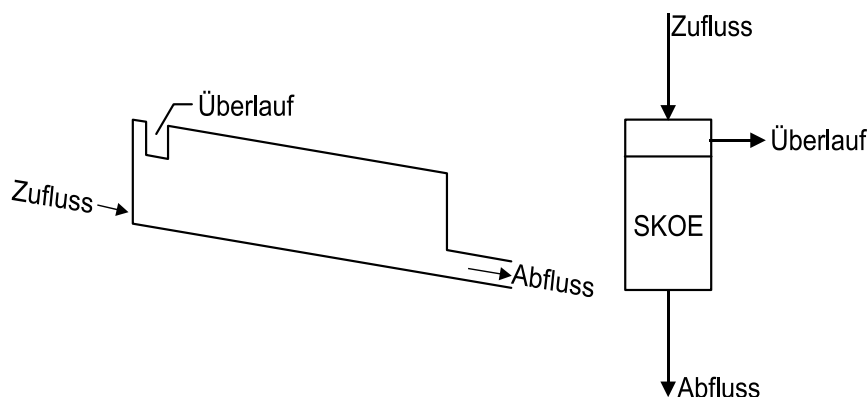


Abb. 8-9 Stauraumkanal mit obenliegender Entlastung

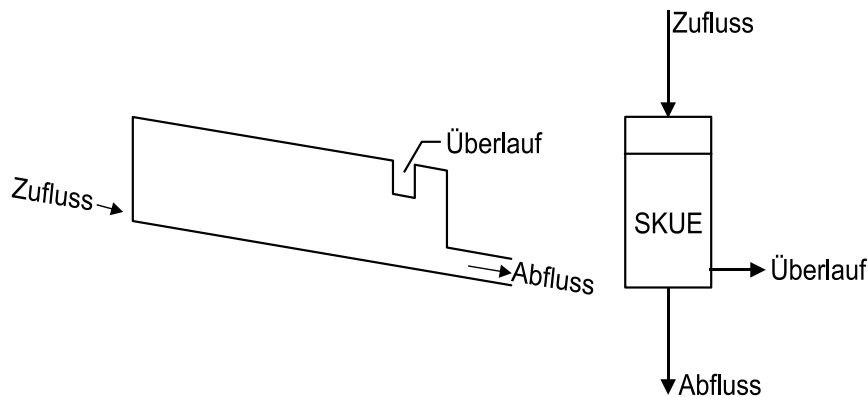


Abb. 8-10 Stauraumkanal mit untenliegender Entlastung

Modelltechnisch wird ein Stauraumkanal mit obenliegender Entlastung als ein Fangbecken im Hauptschluss und ein Stauraumkanal mit untenliegender Entlastung als ein Durchlaufbecken im Hauptschluss beschrieben.

In KOSIM können Stauraumkanäle explizit berücksichtigt werden. Die Kennlinien können automatisch für

- ◆ Ei-
- ◆ Kreis-
- ◆ Maul-

querschnitte generiert werden.

Die Bauwerke sind in Kapitel 9.6 hinsichtlich ihrer Funktionsweise, insbesondere für den Schmutzfrachtprozess, beschrieben.

## 8.2.4 Versickerungsanlagen (KOSIM-RW + XL)

Versickerungsanlagen verhalten sich grundsätzlich wie Bauwerke im Mischsystem. Sie unterscheiden sich jedoch hinsichtlich der Beschaffenheit der zufließenden Wassermenge und hinsichtlich des hydrologischen Verhaltens. So wird z. B. der Drosselabfluss einer Mulde nicht wie beim Mischwasserbauwerk durch ein Drosselorgan, sondern durch die hydraulische Leitfähigkeit des Muldenbettes bestimmt. Zur modelltechnischen Berücksichtigung werden Kennlinien verwendet, die im Folgenden für alle Bauwerke und alle Kenngrößen erläutert werden.

### 8.2.4.1 Mulde - Geometrie und Abfluss

#### Geometrie

Als Muldengeometrie wird in KOSIM die Form eines Obeliskens vorgegeben (siehe Abb. 8-11).

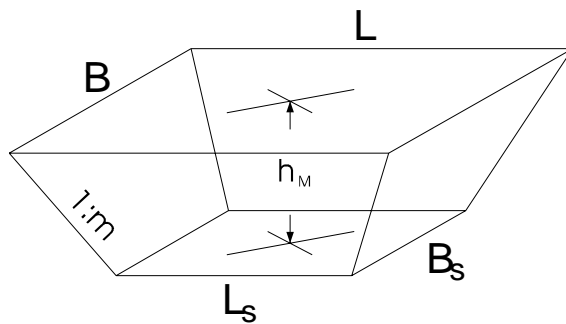


Abb. 8-11 Muldengeometrie angenähert als Obelisk

Das Volumen der Mulden ergibt sich dann zu:

$$V_{\text{Mulde}} = \frac{1}{6} h \cdot [(2 \cdot L + L_s) \cdot B + (2 \cdot L_s + L) \cdot B_s]$$

Gleichung 8-12

mit

$$B_s = B - 2 \cdot h \cdot m$$

$$L_s = L - 2 \cdot h \cdot m$$

Gleichung 8-13

mit  $V_{\text{Mulde}}$ : Speichervolumen der Mulde (m<sup>3</sup>)

h: Muldentiefe (m)

L: Muldenlänge (m)

B: Muldenbreite (m)

L<sub>s</sub>: Muldensohllänge (m)

B<sub>s</sub>: Muldensohlbreite (m)

1:m: Böschungsneigung(-)

Die Muldenlänge  $L$ , die Muldenbreite  $B$ , die Muldentiefe  $h$  und  $m$  für die Böschungsneigung sind Eingabewerte, die zur Berechnung des Muldenvolumens  $V_{\text{Mulde}}$  nach Gleichung 8-12 erforderlich sind.

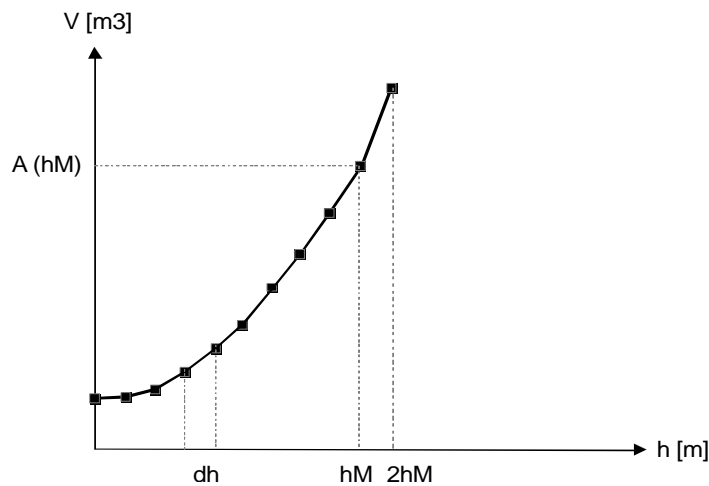


Abb. 8-12 Volumenkennlinie Mulde für die Obeliskform

Die Volumenkennlinie (siehe Abb. 8-12) wird in KOSIM automatisch mit 10 Wertepaaren erstellt. Um Überstauvolumen, die sich über das eigentliche Speichervolumen der Mulde hinaus einstellen können, zu erfassen, wird das Volumen für die doppelte Muldentiefe  $h = 2 h_M$  extrapoliert. Unter Überstauvolumen ist dabei das Wasservolumen zu verstehen, das sich innerhalb eines Zeitschrittes zusätzliches zum vorhandenen maximalen Speichervolumen der Mulde einstellt und nicht über dem Überlauf abfließt.

### Abfluss

Die Entleerung der Mulde erfolgt nach Abb. 8-13 durch drei Prozesse:

- ◆ Versickerung  $Q_{V,M}$
- ◆ Überlauf  $Q_{Ü,M}$
- ◆ Verdunstung  $Q_{E,M}$

Die Versickerung  $Q_{V,M}$  aus der Mulde, die dem Muldenbett (Bodenspeicher) zugeführt wird, berechnet sich nach Gleichung 8-14:

$$Q_{V,M} = \frac{k_{f,M}}{2} \cdot A_s(h) \cdot 1000 \quad \text{Gleichung 8-14}$$

mit  $k_{f,M}$ : Durchlässigkeitsbeiwert (hydraulische Leitfähigkeit) des Muldenbettes (m/s)

$A_s(h)$ : versickerungswirksame Muldenfläche (m<sup>2</sup>)

Die versickerungswirksame Muldenfläche, die in Abhängigkeit von der Muldengeometrie für den jeweiligen Wasserstand  $h$  in der Mulde berechnet wird, entspricht der sich einstellenden freien Wasseroberfläche in der Mulde. Beim Obelisk sind es Rechteckflächen.

Weicht der Anwender von der Vorbelegung "Obelisk" als Muldengeometrie ab, muss neben der Volumenkenlinie auch die Versickerungskennlinie neu erstellt werden. Abb. 8-14 stellt eine Versickerungskennlinie für eine obeliskenförmige Mulde dar.

Durch Multiplikation der Fläche  $A_s(h)$  mit dem Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  (hydraulische Leitfähigkeit) der gesättigten Bodenzone (Muldenbett), der vereinfachend auf die Hälfte der hydraulischen Leitfähigkeit gesetzt wird (vergl. ATV A 138), ergibt sich nach Gleichung 8-14 die Versickerungsleistung zum jeweiligen Wasserstand in der Mulde. Die Versickerungsleistung  $Q_{V,M}$  hat ihr Maximum bei vollem Einstau der Mulde ( $h=h_M$ ) und wird bei Überstau ( $h>h_M$ ) konstant auf diesem Wert gehalten. Die Sohlfläche der Mulde wird auf Dauer als versickerungswirksam betrachtet.

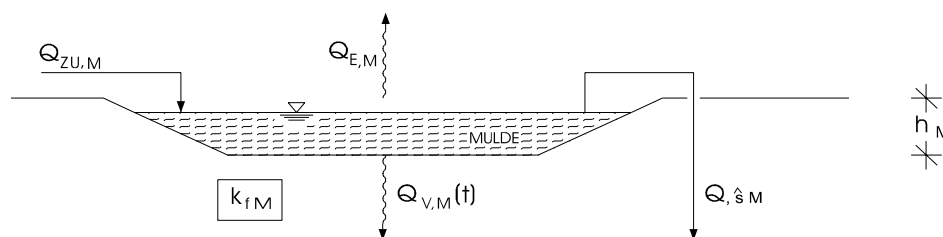


Abb. 8-13 Fließschema Mulde

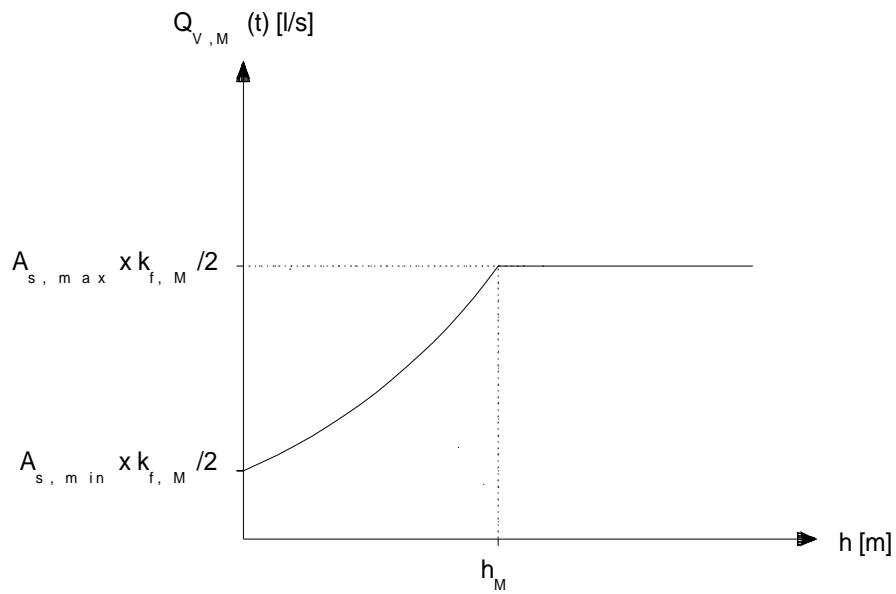


Abb. 8-14 Versickerungskennlinie Mulde

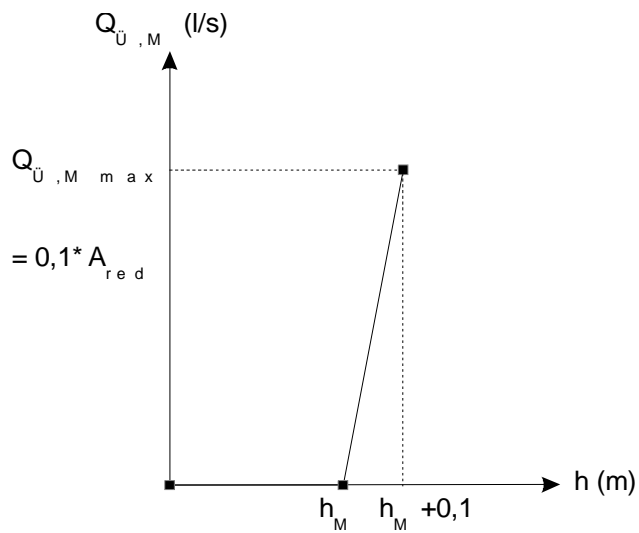


Abb. 8-15 Überlaufkennlinie Mulde

Der Überlauf  $Q_{\text{Ü,M}}$  der Mulde wird durch eine Kennlinie nach Abb. 8-15 beschrieben. Der Überlauf springt bei Überschreitung des maximalen Wasserstandes  $h_M$  der Mulde an und erreicht seine Maximum  $Q_{\text{Ü,M,max}}$  bei  $h_M + 0,1$ .

Der Maximalwert der Überlaufkennlinie kann als Produkt einer Abflussspende von  $0,1 \text{ l/(s} \cdot \text{m}^2)$  mit der angeschlossenen Fläche  $A_{\text{red}}$  angenommen werden.

Zur automatischen Berechnung des Maximalwertes der Überlaufkennlinie wird ein spezifisches Speichervolumen von  $200 \text{ m}^3/\text{ha}$  bzw.  $20 \text{ l/m}^2$  angenommen. Zusammen mit der Abflussspende von  $0,1 \text{ l/(s} \cdot \text{m}^2)$  kann dann die maximale Überlaufleistung berechnet werden.

Die hohe Abflussspende von  $0,1 \text{ l/(s} \cdot \text{m}^2)$  gewährleistet dabei, dass die Überlaufleistung in jedem Fall größer als der zu erwartende Zufluss bei Einstau der Mulde ist. Damit ist das Überlaufvolumen in Verbindung mit der Überlaufhäufigkeit das Bemessungskriterium einer Mulde. Es können sich keine großen Wassermengen über das vorgegebene Muldenvolumen hinaus einstauen.

Die Verdunstung  $Q_{\text{E,M}}$  aus der Mulde wird als negativer Zufluss angesehen. Berücksichtigt wird der Jahresgang der Evapotranspiration. Es gilt:

$$h = 0 : Q_{\text{E,M}} = 0$$

Gleichung 8-15

$$h > 0 : Q_{\text{E,M}} = A_s(h) \cdot E_{\text{pot}} \frac{1}{86400} \cdot F$$

mit $\frac{1}{86400}$ :	Faktor zur Berücksichtigung der Einheiten
$Q_{\text{E,M}}$ :	Verdunstung aus der Mulde (l/s)
$A_s(h)$ :	Wasserfläche einer Mulde ( $\text{m}^2$ )
$E_{\text{pot}}$ :	potentielle Evapotranspiration (mm/d)
$F$ :	Verdunstungsfaktor

Bei der Berechnung der Verdunstungsleistung  $Q_{\text{E,M}}$  wird der Wasserstand in der Mulde des vorausgegangenen Zeitschrittes zugrunde gelegt.

### 8.2.4.2 Muldenbett - Geometrie und Abfluss

#### Geometrie

Das Muldenbett (Bodenspeicher) hat die geometrische Form eines Quaders, dessen horizontale Ausdehnung der maximalen, versickerungswirksamen Fläche  $A_{s,max}$  der Mulde entspricht. Seine Stärke  $h_B$  ist mit der Stärke der Bodenschicht zwischen Mulde und Rigole identisch. Das wirksame Speichervolumen errechnet sich mittels der nutzbaren Feldkapazität (nFK) des Bodens wie folgt:

$$\begin{aligned} V_B &= A_{s,max} \cdot h'_B \\ &= A_{s,max} \cdot h_B \cdot nFK / 100 \end{aligned} \quad \text{Gleichung 8-16}$$

mit  $V_B$ : Speichervolumen des Muldenbettes ( $m^3$ )  
 $A_{s,max}$ : max. versickerungswirksame Muldenfläche ( $m^2$ )  
 $h_B$ : Stärke des Muldenbettes  
 $nFK$ : nutzbare Feldkapazität (%)

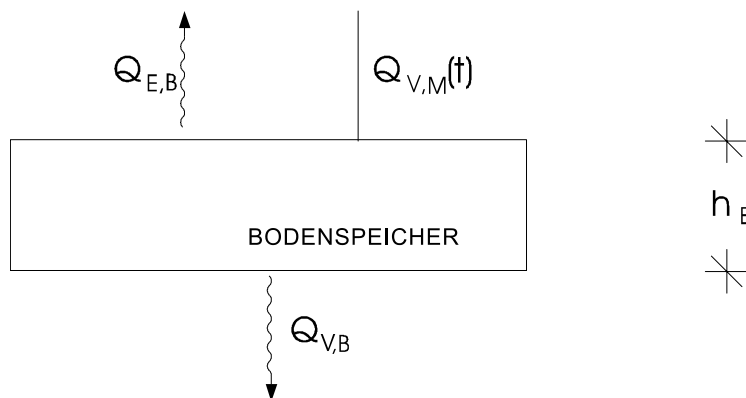


Abb. 8-16 Fließschema Muldenbett (Bodenspeicher)

Durch die Verwendung der nutzbaren Feldkapazität nFK zur Ermittlung des Speichervolumens des Muldenbettes nach Gleichung 8-16 wird dem Umstand Rechnung getragen, dass sich unterhalb des Muldenbettes ein Füllmaterial anschließt, dessen Porosität und  $k_f$ -Wert (Einheit ist m/s) wesentlich höher ist, als die des Bodenmaterials des Muldenbettes.

Das volle Porenvolumen des Muldenbettes kann nicht zur Wasserspeicherung genutzt werden, da das Strömungs- und Gravitationspotenzial in Richtung Rigo- lenkörper zu groß ist. Gemäß der Definition der nFK kann nur dieses Wasservolu- men gegen das Gravitationspotenzial zurückgehalten werden.

### Abfluss

Der Abfluss aus dem Muldenbett (Bodenspeicher) setzt sich nach Abb. 8-16 aus den Komponenten Versickerung  $Q_{V,B}$  und Verdunstung  $Q_{E,B}$  zusammen.

Die Versickerungsrate aus dem Muldenbett  $Q_{V,B}$  wird gemäß der Kennlinie (Abb. 8-17) in Abhängigkeit vom Wasserstand berechnet. Die Versickerung aus dem Muldenbett setzt sich nach Abb. 8-17 erst dann ein, wenn das Muldenbett zur Hälfte gefüllt ist. Es muss sich erst ein gewisser Wassergehalt eingestellt haben, bis es zum Abfluss aus dem Muldenbett kommt. Ist das Muldenbett ganz gefüllt, gelangt das aus der Mulde zu sickern Wasser direkt in die Rigole. Zur Begrenzung der Berechnungsdauer wird die Versickerungsganglinie bei  $h = 0,51 \cdot h_B$  abgeknickt und verläuft steil gegen Null. Auf diese Weise werden minimale Versickerungsra- ten und damit lange Rechenzeiten umgegangen. Das Muldenbett wird zu Beginn der Langzeitsimulation als zur Hälfte gefüllt angenommen.

Die maximale Versickerungsleistung aus dem Muldenbett entspricht der maxima- len Versickerungsleistung aus der Mulde.

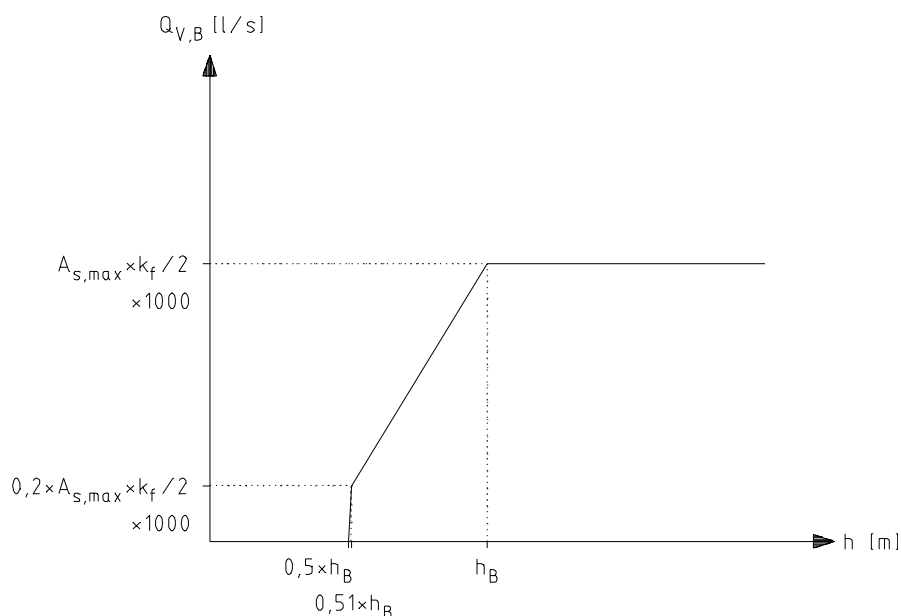


Abb. 8-17 Versickerungslinie für das Muldenbett

Die Verdunstung  $Q_{E,B}$  aus dem Muldenbett wird in 5-Minuten-Intervallen berücksichtigt. Hierfür wird analog zur Abflussbildungsberechnung die potentielle Verdunstungshöhe berechnet (siehe Kapitel 5.2.2 "Trockenphase").

### 8.2.4.3 Rigole - Geometrie und Abfluss

#### Geometrie

Als Vorbelegung hat die Rigole standardmäßig die geometrische Form eines Quaders. Daraus lässt sich das Speichervolumen der Rigole wie folgt berechnen:

$$V_R(h) = l_R \cdot b_R \cdot h \cdot \hat{s}$$

Gleichung 8-17

- mit  $V_R(h)$ : Speichervolumen der Rigole ( $m^3$ )  
 $l_R$ : Länge der Rigole (m)  
 $b_R$ : Breite der Rigole (m)  
 $h$ : Wasserstand innerhalb der Rigole (m)  
 $\hat{s}$ : Ersatzspeicherkoeffizient

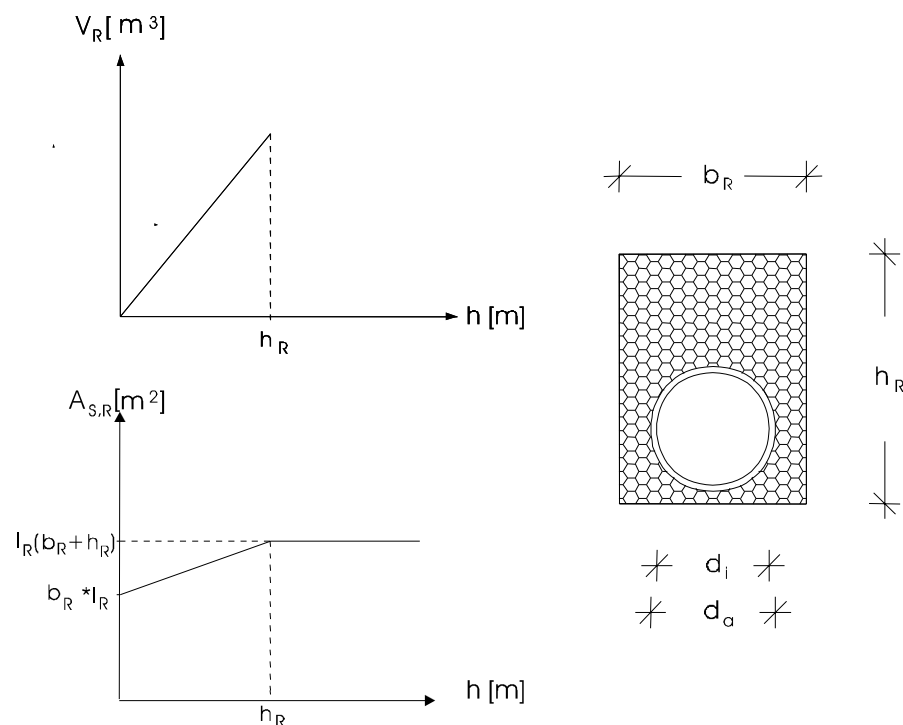


Abb. 8-18 Geometrische Kennlinien und Querschnitt einer Rigole mit Dränrohr

Der Ersatzspeicherkoeffizient  $\hat{s}$  in Gleichung 8-18 berücksichtigt die Porosität des Rigolenfüllmaterials durch den Materialparameter  $s$  (Speicherkoeffizient) und das durch ein in der Rigole liegendes Rohr zur Verfügung stehende Volumen. Das letztere gewinnt insbesondere bei Rohrrigolen mit nennenswerten Durchmessern Bedeutung. Die Geometrie (  $L_R$  ,  $b_R$  ,  $h_R$  ) der Rigole wird in KOSIM festgelegt.

Für den Ersatzspeicherkoeffizienten  $\hat{s}$  ergibt sich nach Abb. 8-18 folgende Gleichung:

$$\hat{s} = s + \frac{\pi}{4 \cdot b_R \cdot h_R} (d_i^2 - s \cdot d_a^2)$$

Gleichung 8-18

- mit  $s$ :     Speicherkoeffizient des Füllmaterials  
 $d_i$ :     Innendurchmesser des Rohres (m)  
 $d_a$ :     Außendurchmesser des Rohres (m)  
 $b_R$ :     Rigolenbreite (m)  
 $h_R$ :     Rigolenhöhe (m)

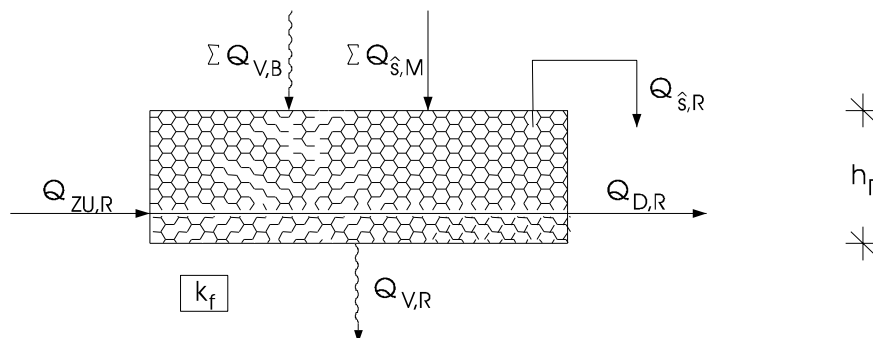


Abb. 8-19 Fließschema Rigole

Zusätzlich kann der Abstand zwischen Dränrohrsohle und Rigolensohle berücksichtigt werden. In diesem Fall wird automatisch eine Kennlinie, die aus drei Abschnitten besteht, berechnet. Der erste und der letzte Abschnitt beschreiben die Zunahme des Volumens unter- und oberhalb des Dränrohres. Der mittlere Abschnitt beschreibt die Zunahme im Bereich des Dränrohres.

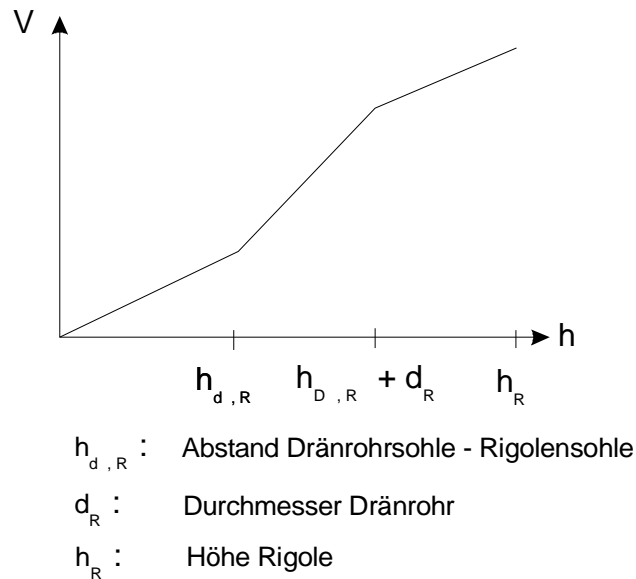


Abb. 8-20 Volumenkenlinie für Rigole mit Dränrohr

Das Höherlegen der Rigole kann besonders beim Anschluss am Mischsystem sinnvoll sein. In diesem Fall versickern kleine Ereignisse vollständig, so dass das Überlaufgeschehen in Mischwasserbauwerken deutlich beeinflusst werden kann.

## Abfluss

Der Abfluss aus dem Speicherelement Rigole ergibt sich aus den Anteilen:

- ◆ Drosselabfluss  $Q_{D,R}$ ,
- ◆ Versickerung aus der Rigole  $Q_{V,R}$  und
- ◆ Rigolenüberlauf  $Q_{Ü,R}$ .

Der maximale Drosselabfluss  $Q_{D,R}(h_R)$  der Rigole kann mit der systemübergreifenden Gebietsdrosselung  $q_D$  ( $l/(s \cdot ha)$ ) berechnet werden:

$$Q_{D,R}(h_R) = \left( \sum_i A_{red}^i \right) \cdot q_D \cdot 10^4 \quad \text{Gleichung 8-19}$$

- mit  $Q_{D,R}$ : Drosselabfluss ( $l/s$ )  
 $h_r$ : max. Wasserstand in der Rigole (m)  
 $q_D$ : Gebietsdrosselung ( $l/(s \cdot ha)$ )  
 $i$ : Index der oberhalb angeschlossenen Rigolen  
 $A_{red}$ : an Rigolen  $i$  angeschlossene, abflusswirksame Flächen ( $m^2$ )

Der Drosselabfluss nach Gleichung 8-19 berechnet sich aus dem Produkt der Summe der oberhalb und an der Rigole angeschlossenen, abflusswirksamen Flächen mit der Gebietsdrossel  $q_D$ .

Alternativ kann der Drosselabfluss jedoch auch für jede Rigole direkt eingegeben werden. Bei einer automatischen Generierung der Drosselkennlinie wird angenommen, dass der Drosselabfluss ab der Dränrohrsohle mit  $\frac{1}{4}$  der maximalen Drosselleistung beginnt und bis zur Rigolenoberkante linear auf die maximale Drosselleistung ansteigt.

Die Versickerungsleistung  $Q_{v,R}$  der Rigole ergibt sich zu

$$Q_{v,R}(h) = A_{s,R}(h) \cdot k_f / 2 \cdot 1000 \quad \text{Gleichung 8-20}$$

- mit  $Q_{v,R}(h)$ : Versickerungsleistung (l/s)  
 $A_{s,R}(h)$ : versickerungswirksame Fläche der Rigole (m<sup>2</sup>)  
 $k_f$ : Durchlässigkeitsbeiwert (hydraulische Leitfähigkeit) des anstehenden Bodens (m/s)  
 $h$ : Wasserstand in der Rigole (m)

Der  $k_f$  Wert des anstehenden Bodens wird programmintern gemäß ATV A138 mit einem Faktor 0,5 abgemindert. Als versickerungswirksam wird gemäß des Ansatzes nach ATV A138 bei vollem Einstau der Rigole nur die Hälfte der vertikalen Rigolenseiten berücksichtigt. Die Stirnseiten des Rigolenkörpers bleiben unberücksichtigt und es wird davon ausgegangen, dass die Sohle der Rigole auf Dauer versickerungswirksam bleibt. Die versickerungswirksame Fläche  $A_{s,R}(h)$  ergibt sich demnach zu:

$$A_{s,R}(h) = l_R \cdot (b_R + h) \quad \text{Gleichung 8-21}$$

- mit  $A_{s,R}$ : Versickerungswirksame Fläche der Rigole (m<sup>2</sup>)  
 $l_R$ : Rigolenlänge (m)  
 $b_R$ : Rigolenbreite (m)  
 $h$ : Wasserstand in der Rigole (m)

Die Drossel-, Überlauf-, Versickerungs- und Volumenkennlinie der Rigole können vom Anwender modifiziert werden, so dass auch hier beliebige Rigolenformen ausgebildet werden können.

Der Überlauf  $Q_{ü,M}$  der Rigole wird durch eine Kennlinie nach Abb. 8-21 beschrieben. Der Überlauf springt bei Überschreitung des maximalen Wasserstandes  $h_M$  der Rigole an und erreicht sein Maximum  $Q_{ü,M,max}$  bei  $h_M \times 0,1$ . Der Maximalwert der Überlaufkennlinie kann als Produkt einer Abflussspende von 0,1 l / (s x m<sup>2</sup>) mit der angeschlossenen Fläche  $A_{red}$  angenommen werden.

Die hohe Abflussspende von  $0,1 \text{ l/(s} \times \text{m}^2)$  gewährleistet dabei, dass die Überlaufleistung in jedem Fall größer als der zu erwartende Zufluss bei Einstau der Rigole ist.

Zur automatischen Berechnung des Maximalwertes wird ein spezifisches Speichervolumen von  $300 \text{ m}^3/\text{ha}$  bzw.  $30 \text{ l/m}^2$  angenommen. Zusammen mit der Abflussspende von  $0,1 \text{ l/(s} \times \text{m}^2)$  kann dann die maximale Überlaufleistung berechnet werden.

In Abb. 8-21 ist die Überlaufkennlinie der Rigole dargestellt. Demnach springt der Überlauf der Rigole erst beim Überschreiten der Rigolenhöhe ( $h_R$ ) an und erreicht schnell seinen Maximalwert.

Durch die Begrenzung der Überlaufleistung ( $Q_{\max}$ ) kann sich modelltechnisch ein Rigolen-Einstauvolumen, das größer als das Rigolenspeichervolumen ist, einstellen. Aus den geschilderten Ansätzen ergibt sich so bei Verwendung der "Standardkennlinien" als Bemessungskriterium für die Rigole die Summe aus Einstau- und Überlaufvolumen und die Überlaufhäufigkeit der Rigole.

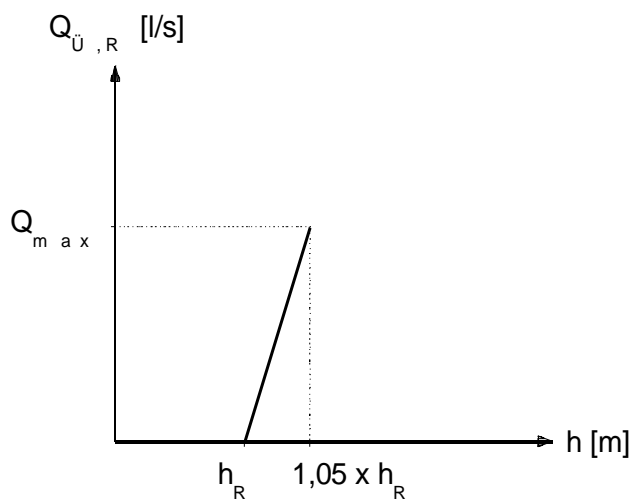


Abb. 8-21 Überlaufkennlinie Rigole

### 8.2.5 Regenwassernutzungsanlagen - Geometrie und Abfluss (KOSIM-RW + XL)

In Analogie zu den anderen KOSIM-Speicherbauwerken sind bei den Regenwassernutzungsanlagen Volumen- und Abflussinformationen zu berücksichtigen.

Das Volumen von Regenwassernutzungsanlagen unterteilt sich in

- ◆ Nutzungsvolumen und
- ◆ Retentionsvolumen.

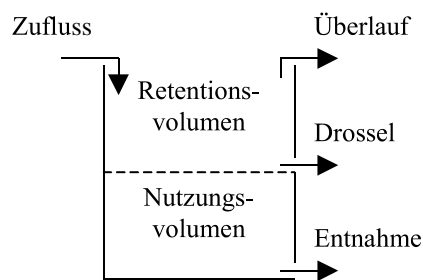


Abb. 8-22 Schema Regenwassernutzungsanlage

Das "Nutzungsvolumen" dient ausschließlich der Regenwassernutzung. Das Regenwasser kann nur über den Überlauf ungenutzt in das nachfolgende Objekt (z. B. Kanalnetz oder Versickerungsmulde) gelangen. Das Retentionsvolumen dient der Retention und der Nutzung von Regenwasser. Hier kann das Regenwasser über eine wasserstandsabhängige Drossel in das nachfolgende Objekt (z. B. Kanalnetz oder Versickerungsmulde) gelangen.

Retention und Nutzung ergänzen sich, so steht bei Teilfüllung des Nutzungsvolumen ein Teil des Nutzungsspeichers auch zur Retention zur Verfügung. Bei Entnahme aus dem Brauchwasserspeicher wird zusätzliches Retentionsvolumen geschaffen. Bei Teilfüllung des Retentionsvolumen steht mehr Wasser zur Nutzung zur Verfügung.

Die Geometrie der Regenwassernutzungsanlage wird als Standardeinstellung mit quadratischem bzw. rundem Profil mit jeweils 1 m Höhe für Nutzungsvolumen und Retentionsvolumen angenommen. Diese Volumen können direkt in den Regenwassernutzungsdialog eingegeben werden. Die Volumenkenmlinie wird automatisch (standardmäßig 1 m Höhe) berechnet. Die Volumenkenmlinie kann auch benutzerdefiniert erstellt werden.

Die Entleerung von Regenwassernutzungsanlagen erfolgt durch

- ◆ Entnahme  $Q_{\text{ent}}$  (über mittlere Entnahmerate und Ganglinien zur Berücksichtigung von z. B. Urlaubszeiten und Nutzung)
- ◆ Drosselabfluss  $Q_{\text{dr}}$  (falls Retentionsvolumen vorhanden ist)
- ◆ Überlauf  $Q_{\text{ue}}$

### 8.2.6 Regenrückhaltebecken - Geometrie und Abfluss (KOSIM-RW + XL)

Regenrückhaltebecken stellen simulationstechnisch eine Kombination von Mischwasserbauwerken und Versickerungsmulden dar. Weil sie häufig als Erdbecken ausgeführt werden, weisen sie in der Regel eine ähnliche Geometrie auf wie z. B. Versickerungsmulden.

Für Regenrückhaltebecken und Mischwasserbauwerke kann der hydrostatische Rückstau in oberhalb liegende Transportelemente berücksichtigt werden. In diesem Fall wird mit einer Volumenkenmlinie gerechnet, die sich aus der Beckenkenmlinie und der Summe der durch Rückstau in die Transportelemente aktivierbaren Volumina ergibt.

Der Abfluss aus Regenrückhaltebecken erfolgt in der Regel, wie auch bei Mischwasserbauwerken, durch ein Drosselorgan. Zusätzlich kann die Entleerung des Beckens auch durch einen durchlässigen Boden erfolgen. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, durch eine gezielte Abdichtung der Sohle einen Dauerstau im Regenrückhaltebecken zu erreichen, so dass nur ein Teil des Beckenvolumens als Retentionsraum genutzt wird und der Rest des Volumens als Teich bewirtschaftet wird.

Alle diese Komponenten können mit dem Regenrückhaltebecken in KOSIM berücksichtigt werden. Zur modelltechnischen Berücksichtigung werden Kennlinien verwendet, die im Folgenden für alle Bauwerke und Kenngrößen erläutert werden.

#### Geometrie

Als Geometrie wird in KOSIM die Form eines Obeliskens vorgegeben (siehe Abb. 8-23).

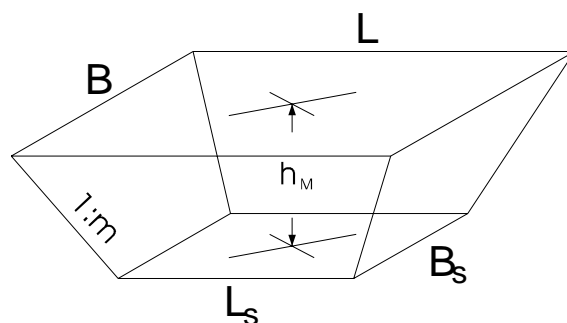


Abb. 8-23 Geometrie des Regenrückhaltebeckens als Obelisk

Das Volumen ergibt sich dann zu:

$$V_{RRB} = \frac{1}{6} h \cdot [(2 \cdot L + L_S) \cdot B + (2 \cdot L_S + L) \cdot B_S] \quad \text{Gleichung 8-22}$$

mit

$$B_S = B - 2 \cdot h \cdot m \quad \text{Gleichung 8-23}$$

$$L_S = L - 2 \cdot h \cdot m$$

mit  $V_{RRB}$ : Speichervolumen des Beckens ( $m^3$ )

$h$ : Beckentiefe (m)

$L$ : Beckenlänge (m)

$B$ : Beckenbreite (m)

$L_S$ : Beckensohllänge (m)

$B_S$ : Beckensohlbreite (m)

$1:m$ : Böschungsneigung(-)

Die Beckenlänge  $L$ , die Beckenbreite  $B$ , die Beckentiefe  $h$  und  $m$  für die Böschungsneigung sind Eingabewerte, die zur Berechnung des Beckenvolumens  $V_{RRB}$  nach Gleichung 8-22 erforderlich sind.

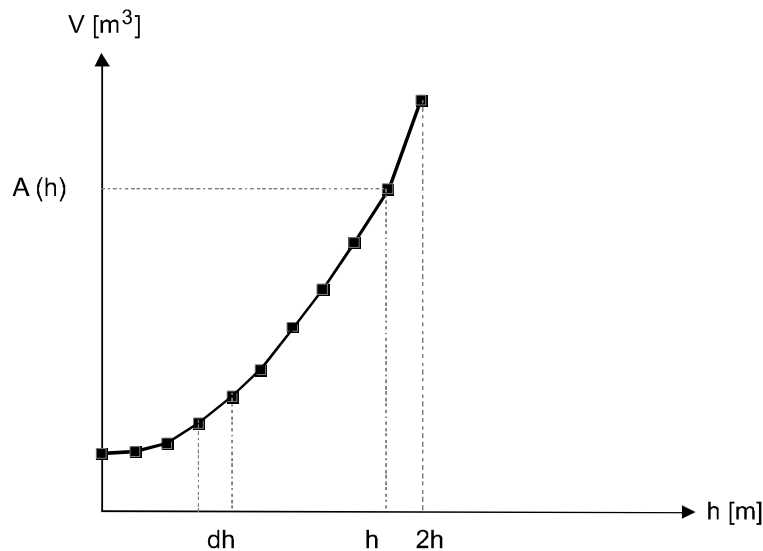


Abb. 8-24 Volumenkennlinie Regenrückhaltebecken für die Obeliskform

Die Volumenkennlinie (siehe Abb. 8-24) wird in KOSIM automatisch mit 10 Wertepaaren erstellt. Um Überstauvolumen, die sich über das eigentliche Speichervolumen des Regenrückhaltebeckens hinaus einstellen können, zu erfassen, wird das Volumen für die doppelte Beckentiefe  $h = 2 h$  extrapoliert. Unter Überstauvolumen ist dabei das Wasservolumen zu verstehen, das sich innerhalb eines Zeitschrittes zusätzlich zum vorhandenen maximalen Speichervolumen des Beckens einstellt und nicht über dem Überlauf abfließt.

### Abfluss

Die Entleerung des Regenrückhaltebeckens erfolgt nach Abb. 8-25 durch vier Prozesse:

- ◆ Drosselabfluss  $Q_{dr}$
- ◆ Versickerung  $Q_v$
- ◆ Überlauf  $Q_{Ü}$
- ◆ Verdunstung  $Q_E$

Die **Versickerung**  $Q_v$  aus dem Becken berechnet sich nach Gleichung 8-24:

$$Q_v = \frac{k_f}{2} \cdot A_s(h) \cdot 1000 \quad \text{Gleichung 8-24}$$

mit  $k_f$ : Durchlässigkeitsbeiwert (hydraulische Leitfähigkeit) (m/s)

$A_s(h)$ : versickerungswirksame Fläche (m<sup>2</sup>)

Die versickerungswirksame Fläche, die in Abhängigkeit von der Beckengeometrie für den jeweiligen Wasserstand  $h$  berechnet wird, entspricht der sich einstellenden freien Wasseroberfläche im Becken. Beim Obeliken sind es Rechteckflächen. Die versickerungswirksame Fläche wird aus der Horizontalprojektion berechnet. Dabei können für die Sohl- und Böschungsfäche unterschiedliche Durchlässigkeitsbeiwerte eingegeben werden.

Weicht der Anwender von der Vorbelegung "Obelisk" ab, muss neben der Volumenkennlinie auch die Versickerungskennlinie neu erstellt werden. Abb. 8-26 stellt eine Versickerungskennlinie für einen Obeliken dar.

Durch Multiplikation der Fläche  $A_s(h)$  mit dem Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  (hydraulische Leitfähigkeit), der vereinfachend auf die Hälfte der hydraulischen Leitfähig-

keit gesetzt wird (vgl. ATV A 138), ergibt sich nach Gleichung 8-24 die Versickerungsleistung zum jeweiligen Wasserstand. Die Versickerungsleistung  $Q_V$  hat ihr Maximum bei vollem Einstau ( $h=h$ ) und wird bei Überstau ( $h>h$ ) konstant auf diesem Wert gehalten.

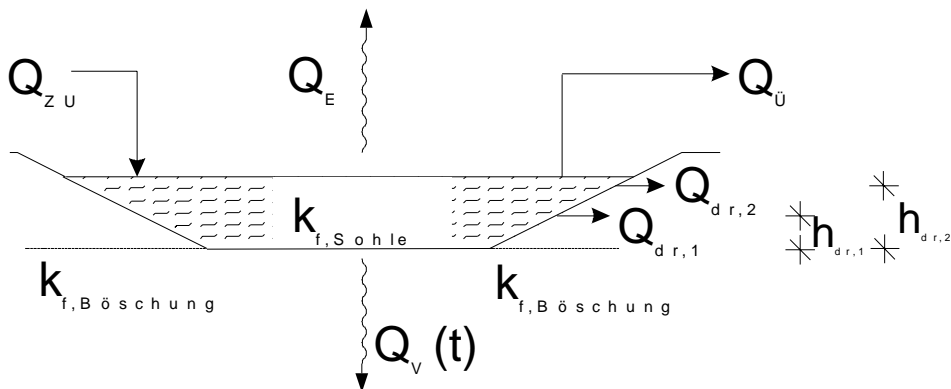


Abb. 8-25 Fließschema Regenrückhaltebecken

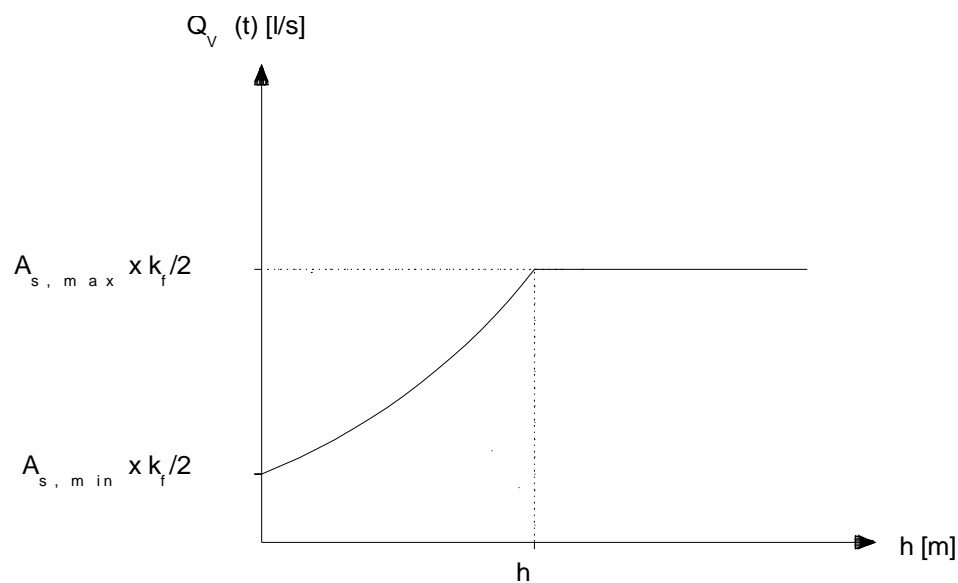


Abb. 8-26 Versickerungskennlinie Regenrückhaltebecken

Der **Überlauf** kann mit Hilfe der Länge der Überlaufschwelle und mit Hilfe des Überfallbeiwertes beschrieben werden. Die Berechnung des Überlaufverhaltens erfolgt dann mit einer daraus berechneten Überlaufkennlinie. Alternativ können die Überlaufwerte als Funktion des Wasserstandes direkt, d.h. benutzerdefiniert, in die Kennlinie eingetragen werden. Das kann z. B. bei speziellen Überlaufformen von Bedeutung sein.

Die Drosselabflüsse können als konstante Werte, d.h. unabhängig vom Wasserstand, eingegeben werden oder auch als Funktion des hydrostatischen Druckes. In diesem Fall ist der Durchmesser der Drossel und ein Drosselbeiwert einzugeben. Alternativ kann auch die Drosselleistung über eine Kennlinie eingegeben werden. Bei Regenrückhaltebecken können zwei verschiedene Drosselabflüsse berücksichtigt werden. Für jeden Drosselabfluss kann zusätzlich noch ein Abstand zwischen der Sohle und dem Drosselorgan angegeben werden. Damit ist es möglich, das Drosselverhalten des Bauwerkes in Abhängigkeit des Wasserstandes sehr variabel einzustellen. Besonders bei der Berücksichtigung eines Stauziels sollte, um ein Stauziel auch simulationstechnisch zu beschreiben, der Abstand zwischen Sohle und Drosselorgan so eingestellt werden, dass er mindestens dem Stauziel entspricht (siehe "Definition eines Stauziels" ab S. 127).

Die **Verdunstung**  $Q_E$  aus dem Regenrückhaltebecken wird als negativer Zufluss angesehen. Berücksichtigt wird der Jahresgang der Evapotranspiration. Es gilt:

$$h = 0 : Q_E = 0$$

Gleichung 8-25

$$h > 0 : Q_E = A_s(h) \cdot E_{\text{pot}} \frac{1}{86400} \cdot F$$

mit $\frac{1}{86400}$ :	Faktor zur Berücksichtigung der Einheiten
$Q_E$ :	Verdunstung aus dem Becken (l/s)
$A_s(h)$ :	Wasserfläche des Beckens (m <sup>2</sup> )
$E_{\text{pot}}$ :	potentielle Evapotranspiration (mm/d)
$F$ :	Verdunstungsfaktor

Bei der Berechnung der Verdunstungsleistung  $Q_E$  wird der Wasserstand des vorausgegangenen Zeitschrittes zugrunde gelegt.

### Definition eines Stauziels

Mit der Definition eines Stauziels kann erreicht werden, dass während der Simulation ein dauerhafter Einstau des Beckens bewirkt wird. Voraussetzung dafür ist, dass bis zu dem Stauziel keine Versickerungsmöglichkeit besteht und dass die Drosselorgane oberhalb des Stauziels angeordnet werden. In diesem Fall ist eine Entleerung des Regenrückhaltebeckens unterhalb des Stauziels nur noch über die Verdunstung möglich.

Bei einem definierten Stauziel wird bereits zu Beginn der Langzeitsimulation das Regenrückhaltebecken bis zum Stauziel mit Wasser gefüllt. Niederschlagswasser, das während der Simulation zuläuft, füllt das Becken anschließend oberhalb des Stauziels. Die Entleerung des Beckens oberhalb des Stauziels erfolgt über die Drosselorgane, bzw. über den Überlauf. Eine Entleerung unterhalb des Stauziels kann dann in der Regel nur über die Verdunstung erfolgen.

Die statistische Auswertung der Einstauereignisse erfolgt nur oberhalb des Stauziels (siehe Kapitel 10 "Statistische Auswertung").

Mit dieser Vorgehensweise können Teichanlagen in eine Entwässerungsplanung einbezogen und deren hydrologische Wirksamkeit mit Hilfe von KOSIM nachgewiesen werden.

### 8.3 Bauwerke zur Regenwasserbehandlung (KOSIM-MW + XL)

#### 8.3.1 Allgemeines

Mit weitergehenden Maßnahmen zur Mischwasserbehandlung soll im Vergleich zu den herkömmlichen Entlastungsbauwerken, bei denen lediglich durch einen teilweisen Volumenrückhalt der Schadstoffeintrag in das Fließgewässer begrenzt wird, in erster Linie eine Verbesserung der Qualität des entlasteten Mischwassers durch erhöhten Stoffrückhalt erreicht werden.

Ziel ist ein verstärkter Rückhalt verschiedener Stoffklassen. Dabei kann der Rückhalt einzelner oder mehrerer dieser Stoffe im Vordergrund stehen.

- ◆ Fest- bzw. Trübstoffe
- ◆ sauerstoffzehrende organische Stoffe
- ◆ sauerstoffzehrender und toxischer Ammoniumstickstoff
- ◆ Schwermetalle
- ◆ Nährstoffe (N und P)
- ◆ Keime (Bakterien und Viren) vor allem in Badegewässern

Bei Anlagen zur weitergehenden Mischwasserbehandlung handelt es sich in der Regel um klärtechnische Verfahren, die den Methoden der zentralen Abwasserreinigung entlehnt sind. Im Unterschied zu den kontinuierlich betriebenen Kläranlagen ist hier jedoch besonders zu beachten, dass an den Mischwasserüberläufen die Volumenströme erheblichen zeitlichen Mengen- und Konzentrationsschwankungen - bis hin zu monatelangen Beschickungspausen - ausgesetzt sind. Daraus ergeben sich die folgenden Anforderungen, die bei einer Auswahl von möglichen Verfahren an Anlagen zur weitergehenden Mischwasserbehandlung zu stellen sind:

- ◆ Generell sind einfache Verfahren mit geringem technischen und personellen Aufwand hochtechnisierten Lösungen vorzuziehen.
- ◆ Die Anlage zur Mischwasserbehandlung muss unempfindlich sowohl gegen langanhaltende Trockenzeiten als auch gegen stoßweise auftretende Belastung sein.
- ◆ Bei Entlastungsereignissen müssen die Anlagenteile sofort betriebsbereit sein, ohne dass beispielsweise Betriebspersonal eingesetzt werden muss.

Die Anlagen zur weitergehenden Mischwasserbehandlung können konzeptionell nach physikalischen, chemischen oder biologischen Methoden sowie deren Mischformen unterschieden werden. Einen Überblick über mögliche Verfahren gibt Tab. 8-1:

**Tab. 8-1 Verfahren und Behandlungsmaßnahmen zur weitergehenden Mischwasserbehandlung (nach ATV [2001, b])**

Verfahren	Behandlungsmaßnahme
mechanisch	Rechen und Siebe Mikrosiebung Hydrodynamischer Abscheider (z. B. Wirbelabscheider) Filtration
chemisch-physikalisch	Fällung und Flockung (ggf. einschl. Filtration) Flotation
biologisch	Teichanlagen Bodenfilter

### 8.3.2 Mechanische Verfahren

#### 8.3.2.1 Rechen und Siebe

Rechen und Siebe sind bereits lange aus der zentralen Abwasserreinigung zur Rückhaltung von Feststoffen bekannt. Nach DIN 19 569, Teil 2 sind dabei Rechen als "Anlagen zum Zurückhalten und Entnehmen von Grobstoffen durch im Abwasserstrom parallel angeordnete Stäbe" definiert, d.h. durch sie erfolgt eine eindimensionale Einengung des Fließquerschnitts. Demgegenüber können Siebe über ihre Eigenschaft einer zweidimensionalen Einengung des Fließquerschnitts definiert werden (PECHER [1996]).

Sieb- und Rechenanlagen werden im Allgemeinen als Ergänzung zu Regenüberlaufbecken eingesetzt. Sie dienen dem Rückhalt von groben Schwimm- und Treibstoffen und verhindern so zum einen unästhetische Ablagerungen am Gewässerrand und zum anderen Betriebsstörungen an nachgeschalteten Behandlungsanlagen (z. B. Wirbelabscheider, Bodenfilter). Aus vereinzelt Untersuchungen liegen Erfahrungswerte über die Reinigungsleistung von Sieb- und Rechenanlagen bei der Mischwasserbehandlung vor, die im Folgenden kurz zusammengefasst werden:

- ◆ Untersuchungen in der Schweiz haben gezeigt, dass für den Rückhalt von Grobstoffen aus Regenüberläufen die Maschenweite der Siebe bzw. Lichtweite der Rechen zwischen 3 und 10 mm liegen sollte. Bei einer spezifi-

schen Siebfläche von  $0,88 \text{ m}^2/\text{ha}_{\text{red}}$  mit Rundlöchern von 6 mm Durchmesser wurden i.M. 90 % der Überläufe vollständig behandelt; bei  $0,38 \text{ m}^2/\text{ha}_{\text{red}}$  waren es hingegen nur 49 % (KREJCI [1991]).

- ◆ Die genaue Dimensionierung von Siebanlagen (ohne Siebgutentfernung während des Betriebs) im Hinblick auf die Häufigkeit der Verstopfung ist sehr schwierig. Aus diesen Gründen besteht die große Wahrscheinlichkeit der Über- oder Unterdimensionierung. Dieses Problem kann in den Rechenanlagen durch die Rechengutentfernung während des Betriebs gelöst werden (KREJCI [1991]).
- ◆ Rechtecklochsiebe wurden nach einer Untersuchung des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft an der Universität Karlsruhe als ungeeignet eingestuft. Bei schneckengeräumten Rundlochsieben wurde ein Stoffrückhalt von 10 - 20 % hinsichtlich der Parameter AFS und CSB festgestellt. Von entscheidendem Einfluss hat sich die Winkelgeschwindigkeit der Schneckenpumpe herausgestellt. Hohe Geschwindigkeiten führen zwar zu einer besseren Reinigung der Siebfläche und damit zu einer höheren hydraulischen Leistungsfähigkeit, zerkleinern dann aber auch stärker die Wasserinhaltsstoffe und bewirken dadurch insgesamt einen niedrigeren Wirkungsgrad der Siebanlage (PECHER [1996]).
- ◆ Für jede Siebanlage ist eine hydraulische Bemessung anzufertigen, die den Druckabfall im Sieb, die Zu- und Ablaufverhältnisse und eventuell auch den Rückstau aus dem Vorfluter einschließt.

Insgesamt konnten noch keine gesicherten Kenntnisse zur Konzentrationsminderung von gelösten Stoffen gewonnen werden. Durch die unbestrittene Wirkung von Sieben und Rechen bei der Entnahme von Grobstoffen lässt sich allerdings eine Empfehlung zur Anwendung von Sieben oder Rechen an Entlastungsanlagen aussprechen, an denen große Mengen von Grobstoffen in den Vorfluter abgeschlagen werden, um unter ästhetischen Gesichtspunkten eine Verbesserung der Gewässergüte zu erreichen.

Dies wurde inzwischen auch bei der europäischen Normung für Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden berücksichtigt. Im Teil 4 der EN 752 - Hydraulische Berechnung und Umweltschutzaspekte - heißt es:

"Bei der Auslegung von Regenentlastungsbauwerken sind Maßnahmen vorzusehen, um die Einleitung von aufschwimmenden Feststoffen und anderem unansehnlichen Material auf ein annehmbares Maß zu beschränken. Dies kann den Einsatz von Rechen oder anderen Schutzmaßnahmen erfordern (prEN 752 [1993])."

Abschließend lässt sich sagen, dass mittels Rechen- und Siebanlagen bei geeigneter Betriebsweise ein zusätzlicher Stoffrückhalt an Mischwasserentlastungsbauwerken erzielt werden kann. Eine Berücksichtigung in der Bemessung von Regenwasserbehandlungsanlagen finden sie jedoch bislang nicht. In der Praxis werden sie für den Rückhalt von unästhetischen Grobstoffen vor dem Vorfluter eingesetzt. Häufig dienen die mechanischen Einrichtungen somit einer nachträglichen Ertüchtigung von Entlastungsbauwerken. Die Erfahrungen sind diesbezüglich sehr positiv. Auch der sich durch die Schaffung eines neuen Betriebspunktes im Entwässerungsnetz ergebende zusätzliche Aufwand stellt kein besonderes Problem dar. Eine Sichtkontrolle und die (selten erforderliche) Reinigung der Anlage erfolgen dabei im Rahmen der ohnehin notwendigen und vorgeschriebenen Kontrolle und Reinigung der Regenentlastungsanlage. Lediglich eine allgemeine Kontrolle, die von den Anlagenherstellern in gewöhnlich einjährigem Abstand empfohlen wird, stellt einen geringen zusätzlichen Aufwand dar.

#### 8.3.2.2 Mikrosiebe

Mikrosiebe bestehen aus engmaschigen Metall- oder Kunstgeweben mit Öffnungsweiten der Maschen zwischen 5 und 50 mm. Die Gewebe sind meist auf horizontal gelagerten, rotierenden Trommeln aufgespannt und werden von innen nach außen vom Abwasserstrom durchflossen. Der sich dabei auf der Innenseite der Gewebe bildende Feststoffbelag wird durch entsprechende Abspritzvorrichtungen entfernt und über eine zentral in der Trommel angeordnete Schmutzwasserablauffrinne aus der Trommel geführt.

Mikrosiebe dienen der weitergehenden Suspensa-Elimination bei der Abwasserreinigung um die besonders bei großen Kläranlagen gestiegenen Anforderungen zu erfüllen. Dort kann ein zusätzlicher CSB-Rückhalt von 10 - 25 % sowie eine  $P_{\text{ges}}$ -Elimination von rund 30 % erreicht werden (GRAU [1996]). Zur Mischwasserbehandlung eignen sich diese feinen Gewebe aufgrund der darin enthaltenen Grobstoffe und der stoßweise intermittierenden Beschickung jedoch nicht.

#### 8.3.2.3 Hydrodynamischer Abscheider

Ein hydrodynamischer Abscheider (auch Hydrozyklon) besteht im Wesentlichen aus einer zylindrischen Abscheiderkammer, in welche das Wasser tangential eingeleitet wird. Bei Trockenwetter fließt das Abwasser ungehindert durch den Abscheider über den geneigten Boden in den Ablauf.

Steigt bei Regenwetter der Zufluss an, so begrenzt die Ablaufdrossel den Abfluss zur Kläranlage und die Kammer des Wirbelabscheiders beginnt sich zu füllen. Zahlreiche kleine Regenereignisse werden so wie bei herkömmlichen Regenüberlaufbecken durch das vorhandene Volumen selbst aufgefangen.

Bei stärkeren und länger anhaltenden Regen beginnt der hydrodynamische Abscheider überzulaufen. Durch den tangentialen Zulauf wird dabei der gesamte im Abscheider befindliche Wasserkörper in Rotation versetzt und es bildet sich eine turbulenzarme Potenzialströmung aus. Die spezifisch schwereren Feststoffteilchen sinken ab (Sedimentation) und werden in Bodennähe zusätzlich in den sich ausbildenden wandnahen Grenzschichten durch Sekundärströmungen über den leicht geneigten Boden in den Ablaufstrom in Richtung Kläranlage gezogen. Während des Überlaufens werden die Schwimmstoffe durch eine Tauchwand zurückgehalten und nach dem Regenereignis vom Trockenwetterabfluss wieder mitgenommen.

Ihren Einsatz finden hydrodynamische Abscheider vorzugsweise als Ersatz für kleine Fangbecken bis 500 m<sup>3</sup> oder als Vorbehandlung in Kombination mit einem Durchlaufbecken.

Eine exakte Aussage über die Größe der Schmutzpartikel, die durch hydrodynamische Abscheider zurückgehalten werden können, ist jedoch schwierig, da Niederschlagsabflussereignisse hochdynamische Phänomene sind und somit die Betriebsbedingungen für einen hydrodynamischen Abscheider erheblichen Schwankungen unterliegen. Ab einer von der Bau- und Betriebsweise abhängigen hydraulischen Belastung muss der Inhalt des Abscheiders als vollständig durchmischt angesehen werden. Seine Effektivität geht in diesem Fall auf den Wert Null zurück (PECHER [1996]). Für ein gutes Abscheideverhalten sollte das Verhältnis von Kammertiefe zu Kammerdurchmesser ( $h/D$ ) möglichst hoch liegen (GEIGER u. HÜBNER [1994]). Da jedoch grundsätzlich ein von Fremdenergie unabhängiger Betrieb angestrebt wird, sind in der Praxis die gegebenen Randbedingungen wie verfügbare Druckhöhe (geodätischer Höhenunterschied), Bemessungszufluss, etc. für die Auswahl der Kammergeometrie maßgebend (PECHER [1996]).

Die Reinigungsleistung eines hydrodynamischen Abscheiders einer bestimmten Geometrie wird im Wesentlichen durch die hydraulische Belastung und die Sinkgeschwindigkeit der Mischwasserinhaltsstoffe bestimmt (GEIGER u. HÜBNER [1996]).

Messungen an den verschiedenen marktverfügbaren Bauformen ergaben Stoffrückhalte zwischen 35 und 80 % sowohl hinsichtlich der abfiltrierbaren Stoffe (AFS) als auch des gesamten CSB. Neben der Bauform ist hier insbesondere die Oberflächenbeschickung von maßgebendem Einfluss (PECHER [1996]).

Nach PECHER [1996] sind die Betriebserfahrungen mit hydrodynamischen Abscheidern in allen Fällen sehr gut. Auch in Kombination mit einem nachgeschalteten Durchlaufbecken haben sich gute Erfahrungen ergeben. Hierbei zeigte sich, dass ein Großteil der Regenereignisse bereits durch den Einstau des Wirbelabscheiders abgepuffert wird, ohne dass es zum Einstau des nachfolgenden

Beckens kommt. Die geringe Einstauhäufigkeit des Durchlaufbeckens und die Beschickung mit vorgereinigtem Mischwasser (Überlaufwasser des Abscheiders) vermindern insgesamt die Verschmutzung des Beckens und damit den erforderlichen Reinigungsaufwand. Wahrscheinlich ist auch eine Verbesserung der Ablaufqualität am Klärüberlauf.

Hydrodynamische Abscheider eignen sich besonders als Ersatz für kleine Fangbecken in Mischkanalisationen. Kleine Geräte bis zu etwa 3,50 m Durchmesser werden als Beton-, Stahl- oder HDPE-Fertigteil ausgeführt, größere Abscheider werden in Ortbeton mit eingehängten Leitblechen gebaut. Zur Ermittlung des erforderlichen Volumens liegt ein Bemessungsverfahren vor, das mit vereinfachten Ansätzen die jährlichen CSB-Entlastungsfrachten des Abscheiders mit denen eines konventionellen Fangbeckens vergleicht. Mit einem hydrodynamischen Abscheider lassen sich bei gleicher CSB-Entlastungsfracht 30 - 50 % des erforderlichen Beckenvolumens einsparen (BORCHERDING [1996]).

Untersuchungen von PECHER [1996] ergaben weiterhin, dass bei einem nur 10 %igen zusätzlichen, durchaus realistischen CSB-Rückhalt durch einen hydrodynamischen Abscheider das Volumen des nachgeschalteten Durchlaufbeckens vor der Kläranlage um rund 20 % reduziert werden kann. Bei einem zusätzlichen CSB-Rückhalt von rund 53 % könnte rein theoretisch auf das Becken sogar völlig verzichtet werden.

Die maßgeblichen Parameter für die Bemessung von Wirbelabscheidern sind die Sinkgeschwindigkeit der partikulären Feststoffe, die Oberflächenbeschickung sowie das Verhältnis von Zu- und Abfluss.

### 8.3.3 Physikalisch-chemische Verfahren

Der Einsatz physikalisch-chemischer Verfahren z. B. des Fällungsverfahrens zur Mischwasserbehandlung ist vergleichbar mit einer Vorfällung bei der Abwasserbehandlung in einer zentralen Kläranlage. Der wesentliche Unterschied liegt in der größeren Flächenbeschickung bzw. geringeren Aufenthaltszeit des Mischwassers sowie der im Allgemeinen geringeren Verschmutzung aufgrund der Verdünnung mit Regenwasser.

Dabei werden gelöste Substanzen (z. B. Phosphate) durch die Zugabe von Fällmitteln (z. B. ein Metallsalz) in eine schwer lösliche Verbindung umgewandelt. Die entstandenen Flocken können durch Phasenseparationsverfahren, wie z. B. durch Sedimentation oder Filtration, aus dem Abwasser entfernt werden. Bei der Zugabe von Fällmitteln, wie z. B. Eisen- oder Aluminiumsalzen, in das Abwasser werden zum einen gelöste Stoffe in die ungelöste Form überführt, und zum anderen wird die Oberflächenladung der sich im Wasser befindlichen Kolloide verringert.

Die Untersuchungen von SCHWEER und WEYAND [1994] haben ergeben, dass durch den Einsatz von Fällung und Flockung bei der Mischwasserbehandlung eine CSB-Verminderung um ca. 50 % erzielt werden kann. Der Wirkungsgrad ist dabei jedoch stark Abhängig von der Oberflächenbeschickung, von der Mischwasserzusammensetzung und vom pH-Wert. Da Mischwasserüberläufe jedoch gerade in Bezug auf diese Faktoren aufgrund ihres stoßweisen intermittierenden Charakters starken Schwankungen unterliegen, muss eine stabile Reinigungsleistung stark angezweifelt werden. Probleme ergaben sich insbesondere auch bei der anschließenden Feststoffabtrennung.

Hinzu kommt die aus der teilweise hohen Fällmittelzugabe resultierende Aufsalzung des Mischwassers und ein erhöhter Schlammanfall, der zu Problemen bei der anschließenden Behandlung auf der Kläranlage führen kann.

Der begrenzende Faktor ist nach SCHWEER und WEYAND [1994] jedoch die hydraulische Belastung des Sedimentationsbeckens. Die Umstellung des betroffenen Kanalnetzes oder der Neubau weiteren Beckenvolumens, womit eine wesentlich niedrigere maximale Flächenbeschickung erreicht werden kann, bedeutet einen erheblichen finanziellen und technischen Aufwand.

Als Maßnahme zur weitergehenden Mischwasserbehandlung stellt die Fällung/Flockung somit kein geeignetes Verfahren dar. Im Verhältnis zu anderen Einleitern wird die erreichte Verringerung des Schmutzeintrags nur einen geringen Anteil ausmachen. Für einen stabilen Verlauf von Fällung, Flockung und anschließender Phasenseparation ist ein unverhältnismäßig hoher Betriebsaufwand notwendig.

#### 8.3.4 Biologische Verfahren

Abwasserteiche sind in Deutschland bereits seit den 20er Jahren als Ergänzung, Übergangslösung oder als eigenständige Reinigungsanlagen vor allem im ländlichen Raum in Betrieb. Es handelt sich dabei um großräumige, meist naturnah gestaltete Abwasserreinigungsverfahren, die überwiegend der Behandlung häuslichen oder vergleichbaren gewerblichen Abwassers dienen und aufgrund ihres hohen spezifischen Flächenbedarfs auf Ausbaugrößen bis wenige tausend Einwohnerwerte beschränkt sind (ATV [1997]).

Im ATV-Arbeitsblatt A 201 (ATV [1989]), in dem Grundsätze für die Bemessung, den Bau und den Betrieb von Abwasserteichen für kommunales Abwasser beschrieben sind, werden folgende Verfahren unterschieden:

#### 8.3.4.1 Teiche

Absetzteiche werden i.d.R. als Vorstufe vor einer weiteren Behandlung eingesetzt und dienen hauptsächlich der Abscheidung der im Rohabwasser enthaltenen absetzbaren Stoffe und der Ausfäulung des abgesetzten Schlammes. Wegen der im Allgemeinen hohen organischen Belastung sind solche Teiche überwiegend anaerob, so dass Geruchsemissionen nicht auszuschließen sind. Bemessungskriterien sind Durchflusszeit, Schlammfall und Räumungshäufigkeit des ausgefäulten und gespeicherten Schlammes.

Unbelüftete Abwasserteiche sind großflächig und flach und werden ohne technische Belüftungseinrichtungen betrieben, d.h. der Sauerstoff wird ausschließlich auf natürliche Weise eingetragen, womit gleichzeitig eine Abhängigkeit von klimatischen Faktoren verbunden ist. Sie dienen der biologischen Abwasserbehandlung und können gleichzeitig zur Entfernung von absetzbaren Stoffen eingesetzt werden, wenn keine Absetzteiche zur Entschlammung vorgeschaltet werden. Während die obere Wasserschicht i.d.R. aerob ist, können sich im Einlaufbereich oder in tiefen Teichen an der Sohle zeitweise anaerobe Zonen einstellen. Der Einsatzbereich von unbelüfteten Abwasserteichen ist in der Regel auf Anschlusswerte unter 1.000 EW beschränkt.

In belüftete Abwasserteiche wird Sauerstoff mit technischen Belüftungseinrichtungen eingetragen. Dadurch vermindert sich der große Flächenbedarf, wie er bei unbelüfteten Abwasserteichen erforderlich ist. Die Belüfter müssen gleichzeitig eine ausreichende Durchmischung gewährleisten. Bemessungskriterium ist entweder die  $BSB_5$ -Raumbelastung oder die  $BSB_5$ -Flächenbelastung. Der Einsatzbereich von belüfteten Abwasserteichen liegt in der Regel bei Anschlusswerten unter 5.000 EW.

Schönungsteiche dienen der weitergehenden Reinigung von biologisch oder gleichwertig vorbehandeltem Abwasser. Bei hohen Anforderungen an die Ablaufqualität sind sie ein einfaches und zuverlässiges Verfahren, um den Ablauf einer biologischen Kläranlage hinsichtlich Schwebstoffe, organischer Restbelastung, anorganischer Nährstoffe und hygienischer Beschaffenheit zu verbessern. Eine künstliche Belüftung erfolgt in der Regel nicht. Ihr hohes Puffervermögen bewirkt einen Konzentrationsausgleich. Bemessungsgröße ist die Durchflusszeit.

Abwasserteichanlagen eignen sich prinzipiell auch zur Mitbehandlung des in Mischkanalisationen kleiner Orte anfallenden Regenwassers. Sie werden dabei in der Regel als unbelüftete Abwasserteiche mit oder ohne vorgeschalteten Absetzteich ausgebildet. Die Mischwasserzuflüsse können dabei meistens nach den Grundsätzen des ATV-Arbeitsblattes A 128 behandelt werden. Dazu sind die Aufstaumöglichkeiten zu nutzen und die Teiche durch sorgfältigen Betrieb und entsprechende Konstruktion der Zu- und Abläufe so zu gestalten, dass abgelagerter

Schlamm infolge der höheren hydraulischen Belastung nicht in den Ablauf verfrachtet wird. Das nachzuweisende Speichervolumen im ersten Teich errechnet sich aus der Differenz zwischen der Wasserspiegelhöhe bei Trockenwetterbetrieb und dem Stauwasserspiegel, bei dem ein vor dem Teich gelegener Überlauf in Tätigkeit tritt. Diese Aufstauhöhe hängt von dem höchsten zulässigen Wasserspiegel im Zulaufkanal ab. Sie ist i.d.R. konstruktiv bedingt und beträgt etwa 0,3 bis 0,6 m (ATV [1997]).

Abwasserteiche wurden bisher allerdings nur für die Mitbehandlung von in Mischkanalisationen kleiner Siedlungsgebiete anfallendem Regenwasser eingesetzt. Dabei ersetzt die Teichanlage gleichzeitig die Funktion einer Kläranlage, da der Trockenwetterabfluss ebenfalls behandelt wird. Dadurch erfolgt eine kontinuierliche Beschickung der Teichanlage; für das Mischwasser muss lediglich ein zusätzlicher Speicherraum berücksichtigt werden. Anwendungs- und Bemessungsbeispiele sind in (ATV [1997]) enthalten.

Für eine ausschließliche, weitergehende Behandlung von Mischwasserüberläufen wurden Teichanlagen bislang nicht eingesetzt. Es ist zu erwarten, dass die intermittierende Beschickung eines Teiches bei längeren Trockenzeiten zu Problemen durch Faulgasbildung und Algenbewuchs führt. Ein weiteres Problem stellen die während eines Entlastungsereignisses auftretenden plötzlichen hohen Zuflüsse dar.

Für eine Mischwasserbehandlung würden sich daher lediglich belüftete oder sehr große unbelüftete Abwasserteiche eignen, da ein ausreichender Sauerstoffeintrag gewährleistet sein muss. Unter Umständen lässt sich durch kombinierte mehrstufige Anlagen eine zufriedenstellende Reinigungsleistung erreichen.

Eindeutige Angaben über die Reinigungsleistung und die Bemessung von Teichanlagen zur weitergehenden Mischwasserbehandlung können hier nicht gemacht werden, da es zur Zeit an Erfahrungen aus der Praxis mangelt und über die Anwendbarkeit Unklarheit herrscht.

#### 8.3.4.2 Bodenfilter

Bodenfilter sind ebenso wie Abwasserteiche schon seit längerer Zeit aus der Abwasserreinigung bekannt. Bepflanzte Bodenfilter, auch Pflanzenbeete genannt, bieten im ländlichen Raum eine sinnvolle Alternative zum Anschluss an eine zentrale Kläranlage. Langjährige Erfahrungen gibt es auch bei der Reinigung von Regenwasser aus Trennkanalisationen in Retentionsfiltern.

Retentionsbodenfilter zur Mischwasserbehandlung (z. B. nach DWA [2005]) bestehen aus einem naturnah gestalteten offenen Rückhaltebecken in Erdbauweise mit einer als Filter ausgebildeten Sohle. Unter der Filterschicht liegt eine Drainage, die das Filtratwasser gedrosselt zum Vorfluter leitet. Hierdurch wird ein künstlicher Aufstau in der Anlage erzeugt, der zum Ziel hat, die Aufenthaltszeit im System zu erhöhen und damit die Reinigungsleistung zu verbessern. Ein vorgeschaltetes Absetzbecken dient dem Rückhalt von Schlamm und visuellen Grobstoffen.

Eine derartige Anlage ist in der Lage, alle heute im Zusammenhang mit weitergehenden Anforderungen gestellten Auflagen gleichzeitig zu erfüllen (BRUNNER [1991]):

- ◆ Entfernung visueller Grobstoffe
- ◆ Entfernung von Schlamm
- ◆ Entfernung von Trübstoffen
- ◆ starke Reduzierung von Ammoniumstickstoff
- ◆ starke Reduzierung von Phosphaten
- ◆ starke Keimreduzierung
- ◆ Reduzierung von sauerstoffzehrenden Stoffen über die mit Regenüberlaufbecken gebotenen Möglichkeiten hinaus
- ◆ starke Reduzierung der hydraulischen Belastung

Ein Retentionsbodenfilter für die Mischwasserbehandlung unterscheidet sich lediglich im Substrat vom Filter für Oberflächenwasser. Während es bei ammoniumarmem Oberflächenwasser möglich ist, mit Sand / Kies auszukommen, ist man beim Mischwasser in wesentlich stärkerem Maße auf sorptionsstarke Substrate angewiesen. Dafür eignet sich bindiger Boden, dessen Tonminerale hervorragend in der Lage sind, Ammonium vorübergehend festzuhalten, bis es in den nachfolgenden Trockenphasen biologisch zu Nitrat oxidiert wird (BRUNNER [1996]).

Der stabilen Reduzierung von Ammoniumstickstoff kommt nach dem derzeitigen Stand der Diskussion im Rahmen weitergehender Anforderungen an Mischwasserreinleitungen infolge seiner sauerstoffzehrenden und bei hohen pH-Werten toxischen Eigenschaften eine Schlüsselrolle zu.

### 8.3.5 Regenwasserbehandlungsanlagen - Geometrie und Abfluss

Das Volumen der Regenwasserbehandlungsanlage kann direkt (mit Angabe der max. Einstauhöhe) oder über eine benutzerdefinierte Volumenkennlinie eingegeben werden.

Die Entleerung findet über

- ◆ den Ablauf oder
- ◆ den Überlauf

statt. Der Ablauf kann direkt oder über eine wasserstandsabhängige Kennlinie eingegeben werden. Der Überlauf wird mit "unendlicher" Leistungsfähigkeit ( $Q_{\text{max}} = 9999 \text{ l/s}$ ) angenommen. Er springt an, sobald der Wasserstand die max. Einstauhöhe erreicht ist. Alternativ kann der Überlauf über eine Kennlinie eingegeben werden. Für den spezifischen Drosselabfluss kann ein Richtwert von  $0,01 \text{ l/s je m}^2$  Filterfläche angenommen werden. Als Richtwert für die Filterfläche  $A_F$  kann ein Wert von  $0,01 A_U$  angenommen werden (gleichbedeutend mit  $A_F = 100 \text{ m}^2 \text{ je ha}$  befestigte Fläche). Hieraus ergibt sich ein Wert von  $1 \text{ l/s je ha}$  angeschlossener befestigter Fläche.

#### Bemessung

Bei den zur Zeit üblichen Berechnungsverfahren zur Bemessung von Mischwasserentlastungsanlagen werden alternative Verfahren zur Mischwasserbehandlung bislang kaum berücksichtigt. Gerade in der heutigen Zeit knapper öffentlicher Mittel wird jedoch eine solche Maßnahme in der Regel erst dann von den Prüfbehörden akzeptiert, wenn durch sie ein Ersatz bzw. eine verbessernde Ergänzung von herkömmlichen Anlagen zu erwarten ist. Zweckmäßigerweise müssen daher Ansätze erarbeitet werden, mit denen sowohl die Auswirkungen von weitergehenden Maßnahmen auf die Mischwasserentlastungen abgeschätzt werden können, als auch eine Vergleichbarkeit mit den herkömmlichen Methoden gegeben ist.

Zur Dimensionierung und zum Stoffrückhalt von Verfahren zur weitergehenden Mischwasserbehandlung existieren bislang hauptsächlich Erfahrungswerte aus Versuchsanlagen und Pilotprojekten, die für diese Zwecke aus der Literatur sowie aus Expertenbefragungen ermittelt wurden. Da dieses Datenmaterial noch nicht als abgesichert gelten kann, mussten bei der Nachbildung der Reinigungsprozesse teilweise starke Vereinfachungen vorgenommen werden. Eine detailliertere Berücksichtigung der Wirkungsweisen wäre hier entweder nur mit sehr großem Aufwand möglich oder reine Spekulation.

Um einen Vergleich mit den bisher praktizierten Methoden zu ermöglichen, ist es erforderlich, die dafür zur Zeit geltenden Bemessungsregeln auch bei der Nachweisrechnung für Anlagen zur weitergehenden Mischwasserbehandlung anzuwenden.

Die Dimensionierung von herkömmlichen Mischwasserentlastungsanlagen erfolgt heute, neben ergänzenden Richtlinien einzelner Bundesländer, auf der Grundlage des ATV-Arbeitsblattes A 128 (siehe Kapitel 2.2.1). Eine vernünftige Abschätzung der Wirkungsweise von alternativen Verfahren auf die Mischwasserentlastungen ist ohne den Einsatz von Simulationsmodellen kaum möglich.

### Bodenfilteranlagen

Ein wesentliches Bemessungskriterium für einen Bodenfilter ist seine hydraulische Leistungsfähigkeit (Stapelhöhe). Im Gegensatz zum reinen Versickerungsvorgang wird bei einem gedrosselten Retentionsbodenfilter die Filtergeschwindigkeit durch ein Drosselorgan reduziert und damit die Aufenthaltszeit des Wassers im Boden verlängert. Dadurch kann nach BRUNNER [1996] die über den mechanischen Filtervorgang hinausgehende Reinigungsleistung wesentlich gesteigert werden. Somit ist nicht die Durchlässigkeit  $k_f$  der Filterschicht für die Bemessung maßgebend, sondern die Leistung der am Ablauf des Bodenfilters befindlichen Drossel. Als weiteres Bemessungskriterium gibt BRUNNER [1996] die Stapelhöhe an. Die Stapelhöhe berechnet sich aus dem durch den Filterkörper durchgesickerten Volumen dividiert durch die Filteroberfläche.

Bodenfilter besitzen gegenüber Fangbecken wesentliche Vorteile. Während bei einem Fangbecken die gesamte Entlastungsfracht aus ungereinigtem Mischwasser stammt, das stoßweise in das Fließgewässer gelangt, entsteht die Entlastungsfracht des Bodenfilters zu weniger als 30 % aus den Beckenüberläufen. Die übrige Fracht gelangt durch den gedrosselten Ablauf des Bodenfilters in das Fließgewässer, wobei für die CSB-Konzentration Kläranlagen-Qualität erreicht werden kann.

Neben den mechanisch zurückgehaltenen abfiltrierbaren Stoffen (AFS) wird auch ein erheblicher Teil an gelösten Stoffen ( $\text{BSB}_5$  und Ammonium) durch mikrobiellen Abbau und Adsorptionsvorgänge im Bodenfilter reduziert.

Die Reduktion des Ammoniums, dass neben seiner sauerstoffzehrenden Wirkung im Fließgewässer bei hohen pH-Werten auch eine toxische Wirkung haben kann, erfolgt hauptsächlich durch den vorübergehenden Einbau in den Boden und biologischer Oxidation zu Nitrat in den nachfolgenden Trockenphasen. Hierdurch ist auch der Nachteil zu begründen, den der Bodenfilter bezüglich des Rückhalts an



Gesamtstickstoff hat. Das Nitrat, das sich durch den mikrobiellen Umsatz des Ammoniums in der Filterschicht anreichert, wird bei der nächsten Beschickung des Bodenfilters größtenteils wieder ausgewaschen und gelangt schließlich in das Fließgewässer, wo es als Pflanzennährstoff zum Algenwachstum beitragen kann.

## 9 Schmutzfrachtberechnung

Neben den Wassermengen können in KOSIM auch Schmutzfrachten berechnet werden. Hierzu können beliebig viele Schmutzparameter definiert werden. Zur modelltechnischen Beschreibung bieten sich prinzipiell ähnliche Vorgehensweisen wie bei der mengenbezogenen Niederschlag-Abfluss-Simulation an, die im Folgenden vorgestellt werden. Dabei ist jedoch zu bedenken, dass die naturwissenschaftlichen Zusammenhänge des Schmutzfrachtgeschehens wesentlich komplexer sind als die des Niederschlag-Abfluss-Geschehens, da neben der mengenmäßigen die stoffliche Komponente hinzukommt. Wegen der Komplexität der zu beschreibenden Prozesse sind detaillierte, das physikalische Geschehen genau nachvollziehende Modelle nicht oder nur mit nicht vertretbarem Aufwand zu erstellen bzw. zu kalibrieren. In der Regel werden hydrologische Ersatzsysteme aufgestellt, die das Systemverhalten mit vereinfachenden Annahmen hinreichend genau darstellen sollen.

### 9.1 Generelle Beschreibung des Schmutzfrachtgeschehens

Schmutzfrachtprozesse werden von vielen Faktoren beeinflusst. Die Vorgänge, die letztlich zur Einleitung von Schmutzfrachten in die Kläranlage oder in das Fließgewässer führen, vollziehen sich in mehreren Phasen, die zur überschaubaren Darstellung als Teilsysteme und Teilprozesse definiert werden.

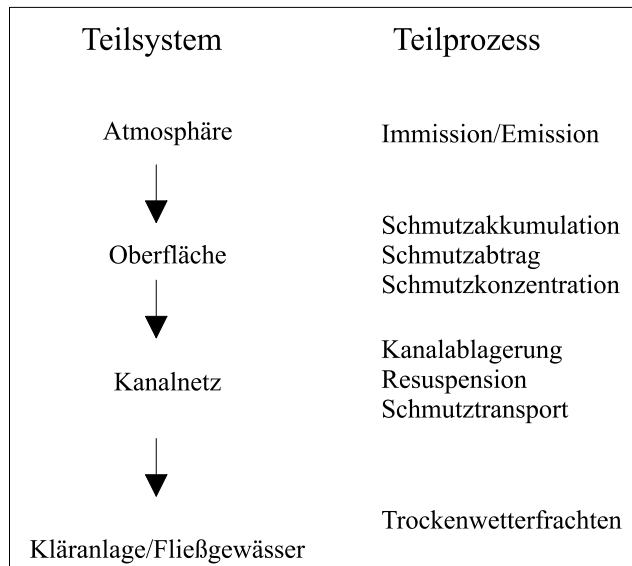


Abb. 9-1 Teilsysteme und Teilprozesse des Schmutzfrachtgeschehens (DURCHSCHLAG [1989], modifiziert)

### Teilsystem Atmosphäre

Im Teilsystem Atmosphäre ist zwischen Trocken- und Niederschlagsperiode zu unterscheiden. In der Trockenphase findet eine Anreicherung von Schmutzstoffen statt. Ursachen können z. B. Industrieemissionen, Stoffverfrachtungen durch Wind etc. sein. Die Schmutzstoffe werden bei Niederschlagsereignissen aus der Atmosphäre gewaschen und tragen zur Verschmutzung des Regenwassers bei.

### Teilsystem Oberfläche

Auch hier kann zwischen Trocken- und Niederschlagsperiode unterschieden werden. In der niederschlagsfreien Phase findet sowohl Schmutzakkumulation als auch Schmutzabtrag statt.

Die Schmutzakkumulation erfolgt z. B. durch:

- ◆ Staubniederschlag
- ◆ Verkehrsemissionen
- ◆ Tierexkrementen
- ◆ Streumaterial etc.

Der Schmutzabtrag erfolgt im Wesentlichen durch:

- ◆ Windabtrag
- ◆ Straßenreinigung

In der Niederschlagsphase werden die Schmutzstoffe mit dem Niederschlagswasser dem Kanalnetz zugeführt. Die Menge der abgespülten Schmutzstoffe ist insbesondere vom aktuellen Schmutzvorrat und von der Intensität des abflusswirksamen Niederschlages abhängig. Die Berechnung der abgespülten Fracht wird analog zur Niederschlag-Abfluss-Modellierung auch als Schmutzfrachtbildung bezeichnet. Die zeitliche Verteilung der abgespülten Schmutzfrachten wird durch die Schmutzkonzentration beschrieben.

### Teilsystem Kanalnetz

Im Mischsystem überlagern sich die niederschlagsbedingten Schmutzfrachten mit den Schmutzfrachten aus dem Trockenwetter. Die Trockenwetterfrachten setzen sich in der Regel aus häuslichem Schmutzwasser und industriellen Schmutzfrachten zusammen. Die Frachtratenganglinie des Schmutzwassers unterliegt periodischen Schwankungen und kann erhebliche stochastische Komponenten enthalten.

Im Kanalnetz werden die Schmutzfrachten in Richtung Kläranlage oder Überlauf transportiert. Bei geringen Fließgeschwindigkeiten können Schmutzstoffe in Form von Ablagerungen deponiert werden, die bei hohen Fließgeschwindigkeiten wieder resuspendiert werden können. Somit können in flachen Kanalnetzen Quellen und Senken auftreten. Senken treten in der Form auf, dass bei geringen Fließgeschwindigkeiten die Transportkapazität des Abwassers nicht mehr ausreicht, um sämtliche Sedimente zu transportieren - es bilden sich Ablagerungen. Quellen treten in der Form auf, dass bei höheren Fließgeschwindigkeiten und Vorhandensein von Ablagerungen die Transportkapazität und die Schubspannungen ausreichen, um Ablagerungen zu mobilisieren und dem Abwasserstrom zuzuführen. Untersuchungen (z. B. SIEKER [1994a]) zeigen, dass in flachen Einzugsgebieten ablagerungsbedingte Schmutzfrachten dominant sein können. Steile Einzugsgebiete hingegen sind in der Regel ablagerungsfrei.

In der Praxis und somit auch in KOSIM werden die mit Ablagerungen in Zusammenhang stehenden Prozesse vernachlässigt, so dass die Schmutzfrachten ohne Veränderung über die Oberfläche und durch das Kanalnetz transportiert werden. In steilen Einzugsgebieten ist diese Annahme gerechtfertigt, in flachen Einzugsgebieten nicht.

## 9.2 Schmutzfrachtbildung

Unter Schmutzfrachtbildung wird, analog zur Abflussbildung, die Berechnung von Schmutzfrachten verstanden, die in das Kanalnetz gelangen. Der Mischwasserabfluss setzt sich aus den Komponenten Regenwasser- und Trockenwetterabfluss zusammen. In KOSIM ist für die Verschmutzung des Regenwasserabflusses zwischen Ansätzen mit variablen und konstanten Konzentrationen zu unterscheiden, die in drei Berechnungsmodi angewendet werden können.

### 9.2.1 Konstante Verschmutzung des Regenwasserabflusses

Die Regenwasserkonzentration wird über die gesamte Regenabflusszeit als konstant angenommen. Sie wird mit dem aktuellen Regenwasserabfluss multipliziert, so dass man die Regenwasserfracht erhält.

$$f_{R,t} = C_R \cdot q_{R,t}$$

Gleichung 9-1

mit  $C_R$ : Regenwasserkonzentration  
 $q_{R,t}$ : Regenwasserabfluss  
 $f_{R,t}$ : Regenwasserfracht

### 9.2.2 Variable Verschmutzung des Regenwasserabflusses

In KOSIM können variable Regenwasserkonzentrationen auf der Grundlage von Akkumulations- und Abtragsprozessen berechnet werden.

#### Schmutzakkumulation

In der niederschlagsfreien Phase werden Schmutzfrachten auf der Oberfläche in Abhängigkeit der Zeit angelagert werden. Die Schmutzfrachten stehen bei Niederschlagsereignissen zum Abtrag in das Kanalnetz bereit und werden dementsprechend Schmutzpotenzial genannt. Das Schmutzpotenzial kann nicht unendlich anwachsen, sondern wird durch Windverfrachtung etc. einen Grenzwert  $P_{\max}$  nicht überschreiten.

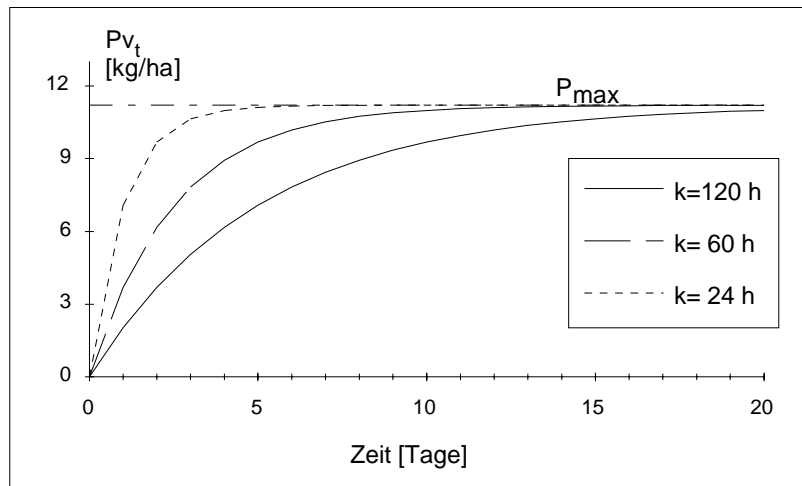


Abb. 9-2 Akkumulationsfunktion

Zur mathematischen Beschreibung kann z. B. ein e-funktionaler Ansatz (PAULSEN [1987]) gewählt werden.

$$P_{v_t} = P_{\max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{k}}\right)$$

Gleichung 9-2

mit  $P_{v_t}$  [kg/ha] aktueller Schmutzvorrat zum Zeitpunkt  $t$   
 $P_{\max}$  [kg/ha] maximaler Schmutzpotenzial auf der Oberfläche  
 $k$  [h] Akkumulationsrate

Die Parameter  $P_{\max}$  und  $k$  sind gebietsspezifisch. Das maximale Schmutzpotenzial hängt im Wesentlichen von der atmosphärischen Belastung und den Gebietsnutzungen ab.

Während der Niederschlag-Abfluss-Ereignisse wird ein Teil des vorhandenen Schmutzpotenzials abgetragen. Der verbleibende Teil der Schmutzfrachten auf der Oberfläche ist der Startwert für die Akkumulationsphase während der nächsten Trockenwetterperiode. Trägt man den kontinuierlichen Verlauf des Schmutzpotenzials über die Zeit auf, ergibt sich eine "Sägezahnkurve".

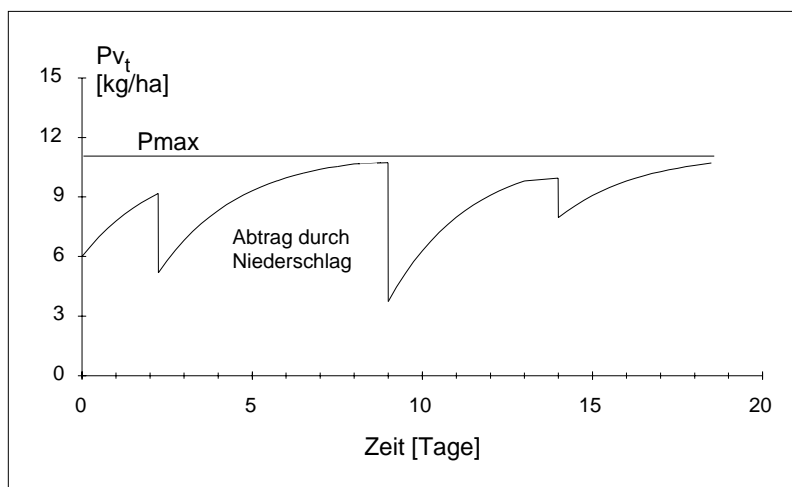
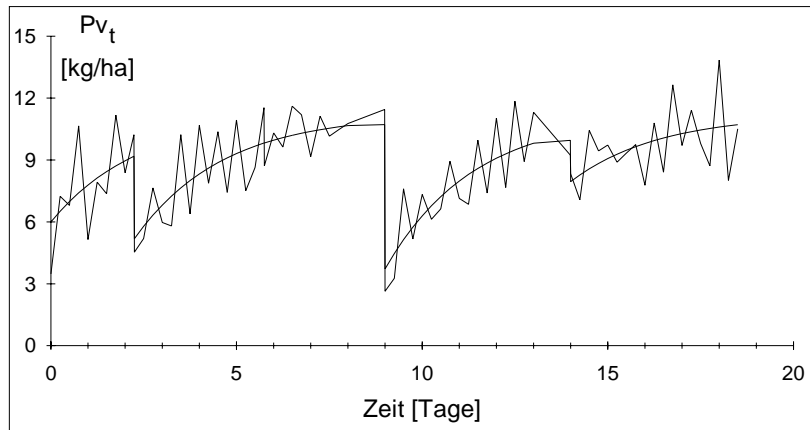


Abb. 9-3 Schmutzakkumulation und -abtrag auf der Oberfläche

Der idealisierte e-funktionale Verlauf der Schmutzakkumulation auf der Oberfläche befestigter Flächen wird sich in der Realität nicht einstellen, da z. B.

- ◆ meteorologische Einflüsse, wie z. B. Winddauer und Windstärke,
- ◆ urbane Einflüsse, wie z. B. Nutzungsart und Nutzungsdauer sowie
- ◆ klimatologische Einflüsse, wie Luftfeuchtigkeit und Temperaturinversionen etc.

den idealisiert gleichmäßigen Prozess "stören" und ein mehr oder weniger starkes Schwanken der Akkumulationsfunktion erwarten lassen.



**Abb. 9-4** Schmutzakkumulation und -abtrag auf der Oberfläche mit stochastischen Komponenten

Der e-funktionale Verlauf stellt also nicht den wahren Verlauf dar, sondern einen mittleren. Die Annahme, dass sich das Schmutzpotenzial asymptotisch einem maximal möglichen Potenzial  $P_{\max}$  nähert, ist jedoch sinnvoll, da sich z. B. durch Windverfrachtungen endliche Schmutzpotenziale bilden. Die stochastischen Komponenten werden in KOSIM vernachlässigt.

### Schmutzabtrag

Der Schmutzabtrag auf der Oberfläche hängt von zwei wesentlichen Größen ab: dem aktuellen Schmutzvorrat und dem abflusswirksamen Niederschlag. PAULSEN [1987] geht davon aus, dass der Schmutzabtrag sowohl von der Intensität des abflusswirksamen Niederschlages als auch vom Schmutzpotenzial linear abhängig ist.

$$Pab_t = N_{Wt} \cdot s_2 \cdot Pv_{t-1} \cdot \Delta t$$

Gleichung 9-3

mit	$PAB_t$	[kg/ha]	abgespülte Schmutzfracht
	$Pv_t$	[kg/ha]	aktueller Schmutzvorrat
	$s_2$	[1/mm]	Abtragsrate
	$N_{Wt}$	[mm/min]	abflusswirksame Niederschlagsintensität

Der verbleibende Schmutzvorrat kann anschließend durch Subtraktion der abgespülten Schmutzfracht vom Schmutzpotenzial berechnet werden.

$$Pv_t = Pv_{t-1} - Pab_t$$

Gleichung 9-4

Im nächsten Zeitschritt ist das Schmutzpotenzial auf der Oberfläche entsprechend verringert. Somit werden bei konstantem Niederschlagsverlauf die abgespülten Schmutzfrachten mit der Zeit kleiner.

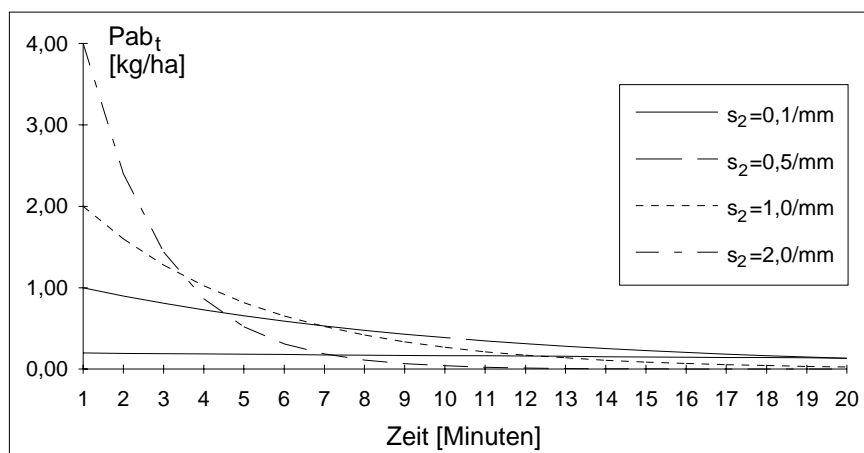
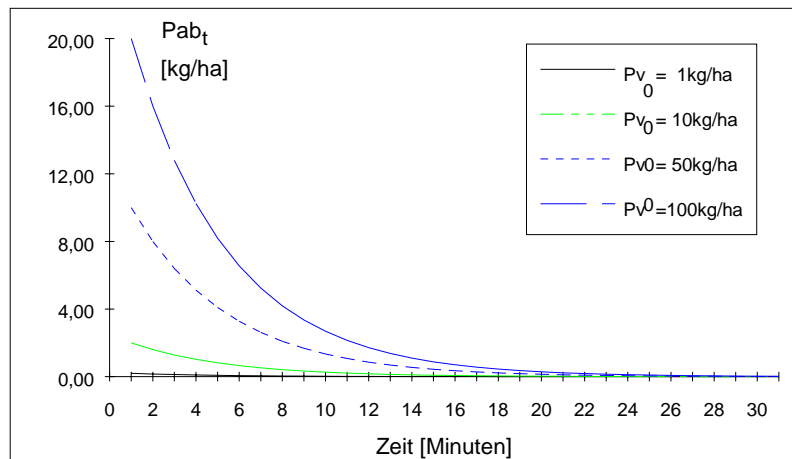


Abb. 9-5 Abgspülte Schmutzfrachten bei konstantem Regen und veränderlicher Abtragsrate

Der Schmutzabtrag  $Pab_t$  ist vom Schmutzvorrat  $Pv_{t-1}$  abhängig (vgl. dazu Gleichung 9-3).



**Abb. 9-6** Abgespülte Schmutzfrachten bei veränderlichem Schmutzpotenzial zu Beginn des Ereignisses sowie konstantem Niederschlag und konstanter Abtragsrate

### 9.2.3 Berechnungsmodi in KOSIM zur niederschlagsbedingten Schmutzfrachtbildung

#### Befestigte Flächen im Modus "konstante Regenwasserkonzentration"

Bei der Berechnung werden mit einem mittleren jährlichen Schmutzabtrag jährlich konstante Konzentrationen aus dem jährlichen abflusswirksamen Niederschlag berechnet. Der pro Jahr durch Niederschlag abspülbare Schmutzabtrag wird durch den abflusswirksamen Niederschlag dividiert. Man erhält so eine ortsspezifische, jährliche Konzentration des jeweiligen Stoffes im Regenabfluss. Zum Beispiel bei einem jährlichen Schmutzabtrag von  $500 \text{ kg}/(\text{ha}_{\text{red}} \cdot \text{a})$  und einem abflusswirksamen Niederschlag von  $500 \text{ mm/a}$  ergibt sich eine Verschmutzungskonzentration von  $100 \text{ mg/l}$ .

Die programminterne Berechnung der mittleren Stoffkonzentrationen aus den Stoffpotenzialen setzt die Kenntnis des abflusswirksamen Niederschlags voraus. Hierfür wird vor der eigentlichen Simulation ein Vorlauf durchgeführt. Dort werden die abflusswirksamen Niederschläge berechnet, so dass beim Start der Simulation die jährliche Regenwasserkonzentration berechenbar wird.

Gegenüber dem Ansatz gleicher Regenabflusskonzentrationen für den gesamten Simulationszeitraum wird bei Zugrundelegung eines mittleren Jahrespotenzials

der Tatsache Rechnung getragen, dass in Jahren hoher Niederschläge der Regenabfluss und damit der Mischwasserabfluss geringer verschmutzt (stärker verdünnt) ist, als in Jahren mit geringerem Niederschlagsaufkommen, wenn infolge der schwächeren Verdünnung der Regenabfluss stärker verschmutzt ist.

### **Befestigte Flächen im Modus "variable Regenwasserkonzentration"**

In diesem Modus wird für eine Komponente des Schmutzabtrages mit variablen Regenwasserkonzentrationen und für eine Komponente des Schmutzabtrages mit konstanten Regenwasserkonzentrationen gerechnet. Die prozentuale Verteilung der variablen und konstanten Komponente wurde auf der Grundlage umfangreicher Voruntersuchungen programmintern festgelegt und ist in der Online-Hilfe dokumentiert.

- ◆ Die programminterne Berechnung der konstanten Stoffkonzentrationen setzt die Kenntnis des abflusswirksamen Niederschlags voraus. Hierfür wird vor der eigentlichen Simulation ein Vorlauf durchgeführt. Dabei werden die abflusswirksamen Niederschläge berechnet. Mit Kenntnis der jährlichen abflusswirksamen Niederschläge sind die jährlich konstanten Regenwasserkonzentrationen berechenbar. Zum Beispiel ergibt sich bei einem 25-prozentigen Anteil der konstanten Regenwasserkonzentration und einem gesamten Schmutzabtrag von 600 kg-CSB/(ha a) sowie einem abflusswirksamen Niederschlag von 600 mm/a eine konstante Regenwasserkonzentration von 25 mg-CSB/l.
- ◆ Die programminterne Berechnung der variablen Stoffkonzentrationen macht sich die Proportionalität zwischen Schmutzabtrag und Schmutzfrachtpotenzial zu Nutze. In einem Vorlauf wird mit einem Schmutzpotenzial von "1" der Schmutzabtrag berechnet. Mit Hilfe des berechneten Schmutzabtrages und des Sollwertes des Schmutzabtrages kann das erforderliche Schmutzpotenzial bestimmt werden. Die Abtragsrate und die Akkumulationsrate wurden auf der Grundlage umfangreicher Voruntersuchungen festgelegt und sind in der Online-Hilfe dokumentiert.

Mit dem Modus "variable Regenwasserkonzentration" können in kontrollierter Weise besser die tatsächlichen Prozesse und insbesondere die Wirkungsweisen der Bauwerke berücksichtigt werden. Es wird daher empfohlen, soweit möglich, diesen Ansatz zu verwenden. Da die Berechnung mit variablen Regenwasserkonzentrationen nicht von allen Aufsichtsbehörden akzeptiert wird, ist jedoch eine Vorabstimmung über deren Anwendung zu empfehlen.

### **Befestigte Flächen im Modus "benutzerdefiniert"**

Die in den Kapiteln 9.2.1 und 9.2.2 vorgestellten Parameter können hier benutzerdefiniert eingegeben werden. Damit ist eine benutzerspezifische Anwendung des Modells möglich. Es kann simultan mit über den gesamten Zeitraum konstanten Regenwasserkonzentrationen und variablen Regenwasserkonzentrationen, die auf Grundlage des Akkumulations- und Abtragsansatzes bestimmt wurden, gerechnet werden.

- ◆ Bei der Berechnung mit variablen Regenwasserkonzentrationen ist jedoch zu bedenken, dass ohne Fixierung des Schmutzabtrags eine sehr detaillierte Anwendung des Berechnungsmodells erforderlich ist, um zu hydrologisch bewertbaren und zur Entwässerungsplanung verwertbaren Ergebnissen zu kommen.
- ◆ Die Berechnung mit konstanten Regenwasserkonzentrationen über den Simulationszeitraum führt bei unterschiedlichem Niederschlagsaufkommen zu einem unterschiedlichen Frachtabtrag von der Oberfläche. Mit zunehmendem abflusswirksamen Niederschlag wird auch ein zunehmender Frachtabtrag simuliert.

Insgesamt ist zu empfehlen den Modus "benutzerdefiniert" nur im Rahmen von experimentellen Untersuchungen oder auf Grundlage von belastungsfähigen Messdaten anzuwenden.

### **Unbefestigte Flächen und Natürliche Flächen**

Die Existenz eines endlichen Schmutzpotenzials kann bei unbefestigten und natürlichen Flächen nicht vorausgesetzt werden. Zumindest für die Feststoffe kann davon ausgegangen werden, dass auch bei langanhaltenden Niederschlägen nicht mit einer Verminderung der abgespülten Schmutzfrachten zu rechnen ist. Dementsprechend wird in KOSIM von konstanten Regenwasserkonzentrationen ausgegangen.

#### 9.2.4 Verschmutzung des Trockenwetterabflusses

Für die Verschmutzung des Trockenwetterabflusses können grundsätzlich die gleichen Frachtganglinien wie für die Abflussmenge angegeben werden. Dies führt allerdings zu konstanten Trockenwetterkonzentrationen. Messungen von Kläranlagenzuläufen zeigen jedoch, dass die Trockenwetterkonzentration einen Tagesgang aufweist.

Um diesen Tagesgang in KOSIM zu berücksichtigen, können benutzerdefinierte Frachtganglinien eingegeben werden. Alternativ können in KOSIM vorgelegte Ganglinien verwendet werden. Diese Ganglinien basieren auf den von Imhoff vorgeschlagenen Frachtganglinien.

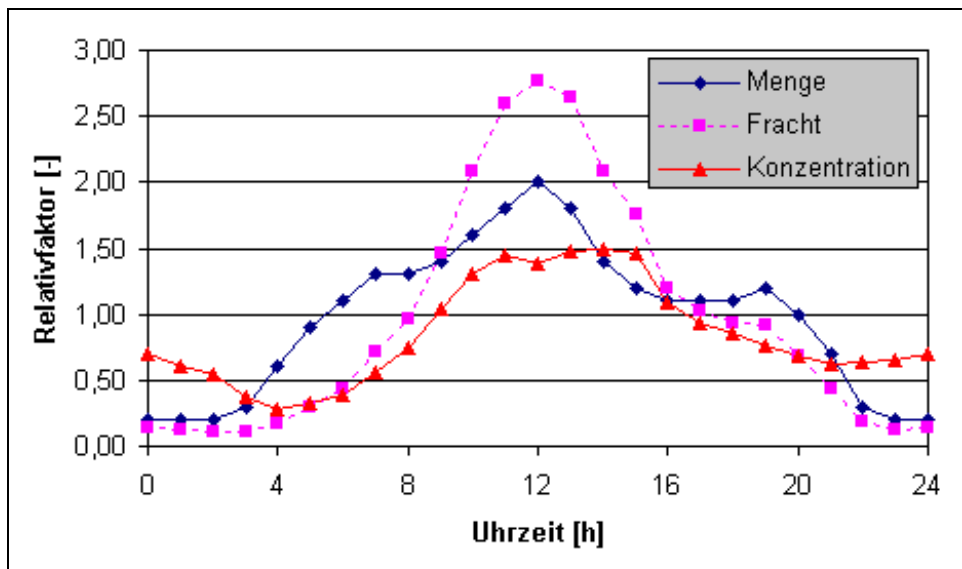


Abb. 9-7 Relativfaktoren für mittlere Abfluss- und Frachtganglinien für 10.000 - 50.000 Einwohner mit daraus berechneter Konzentrationsganglinie

#### 9.2.5 Hinweise zur Parameterwahl

Für den Leitparameter CSB kann für mittlere Verhältnisse von folgenden Verschmutzungskonzentrationen ausgegangen werden:

- ◆ Regenwetterabfluss von befestigten Flächen
  - Schmutzabtrag zwischen 500 und 600 kg-CSB/(ha a)
  - Konzentration von 50 bis 150 mg-CSB/l je nach abflusswirksamem Niederschlag

- ◆ Regenwetterabfluss von unbefestigten und natürlichen Flächen  
Häufig wird die Verschmutzung von diesen Flächen vernachlässigt.
- ◆ Trockenwetterabfluss
  - Fracht je Einwohner 120 g-CSB/d
  - Konzentration 300-1200 mg-CSB/l je nach Fremdwasseranfall

### 9.3 Berechnung von Frachtganglinien

Analog zum Abflusskonzentrationsprozess wird beim Schmutzkonzentrationsprozess die zeitliche Verteilung der abgespülten Schmutzfrachten am Tiefpunkt des Konzentrationsgebietes bestimmt.

Es wird davon ausgegangen, dass die abgespülten Schmutzfrachten zwischen Schmutzbildungsort und Konzentrationspunkt mengenmäßig nicht verändert werden. Sedimentations- oder Erosionsphänomene, die über die Schmutzbildung hinausgehen, werden nicht berücksichtigt. Setzt man diese Idealisierung voraus, können Schmutzkonzentrationsberechnungen analog zur Abflusskonzentrationsberechnung durchgeführt werden. Die Übertragungsfunktion hat die gleichen Eigenschaften und kann mit den gleichen Methoden berechnet werden.

Der Systemabfluss wird um eine Angabe zur Beschaffenheit des Niederschlagswassers erweitert. Die Systemantwort ist dann eine Frachtfunktion.

Für die allgemeine Form der nichtlinearen Speicherkaskade gilt:

$$f_{t,j} = f_{2,t} \cdot (f_{1,t} \cdot f_{t-1} + f_{t,j-1}) \quad \text{Gleichung 9-5}$$

mit

$$f_{2,t} = 1 - \alpha_t$$

$$f_{1,t} = \frac{\alpha_{t-1}}{1 - \alpha_{t-1}}$$

## 9.4 Schmutzüberlagerung

Die Regenfrachten werden zeitsynchron mit dem tagesperiodischen Verlauf der Schmutzfrachten überlagert. Dabei entstehen variable Mischwasserkonzentrationen, die sich aus den Fracht- und Abflussanteilen der einzelnen Komponenten ergeben. Der Überlagerungsvorgang ist in Abb. 9-8 dargestellt. Nur bei der Berechnung mit konstanten Regenwasserkonzentrationen sind Abfluss- und Frachtratenganglinien des Mischwassers proportional.

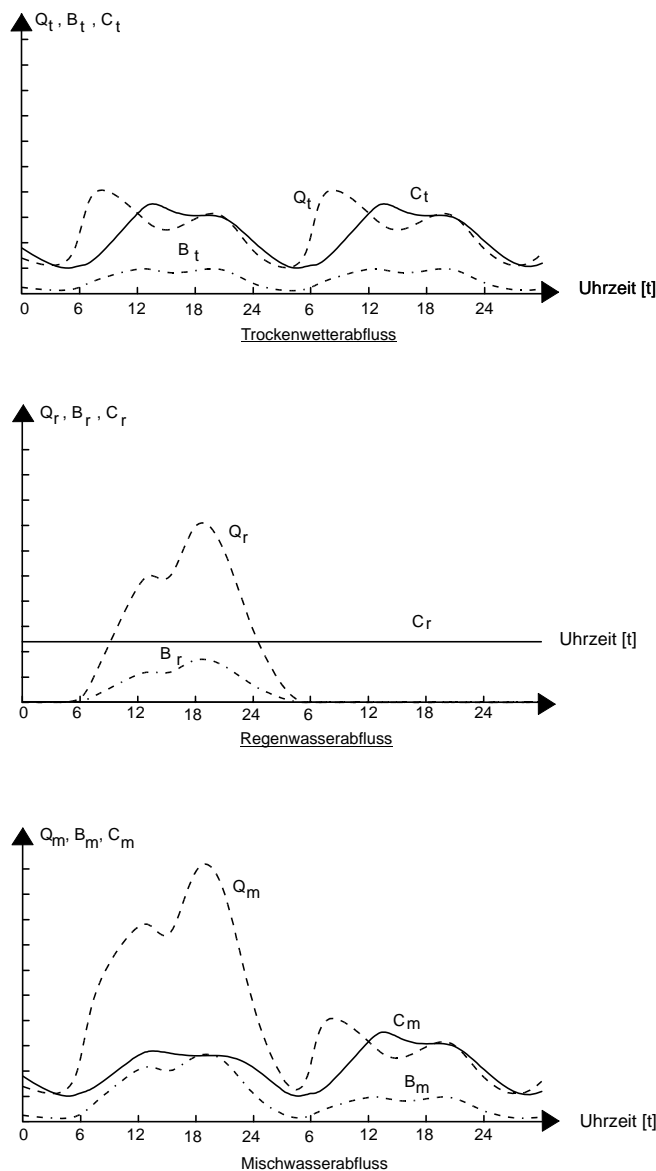


Abb. 9-8 Überlagerungsvorgang nach der Komponentenmethode

Die Mischwasserkonzentration  $C_{m,t}$  errechnet sich zeitschrittweise wie folgt:

$$C_{m,t} = \frac{Q_{TW,t} \cdot C_{TW,t} + \sum_{i=1}^n Q_{R,t} \cdot C_R}{Q_{TW,t} + \sum_{i=1}^n Q_{R,t}}$$

Gleichung 9-6

- mit t: Zeitschritt (5 Minuten)  
 $Q_{TW,t}$ : Trockenwetterabfluss in l/s  
 $Q_{R,t}$ : Regenabfluss in l/s  
 $C_{TW,t}$ : Trockenwetterkonzentration in mg/l  
 $C_R$ : Regenwasserkonzentration in mg/l (konstant)  
n: Zahl der angeschlossenen Flächen

Aus der Überlagerung mit der Abflussganglinie erhält man eine Mischwasserfrachtganglinie.

## 9.5 Schmutztransport

An jedem Einleitungspunkt, an dem eine kanalisierte Fläche oder eine Einzeleinleitung in ein Transportelement fließt, findet eine zeitgerechte Überlagerung der Regen- und Trockenwetterabflüsse und der darin enthaltenen Stofffrachten statt.

Über eine Mischungsrechnung wird unter der Annahme vollständiger Durchmischung beider Abflussanteile, die im jeweiligen Zeitschritt auftretende, zeitlich veränderliche Mischkonzentration des Mischwasserabflusses ermittelt. Es wird konservatives Verhalten der Stoffe unterstellt, d.h. auf dem Transportweg findet kein Stoffumsatz statt.

### 9.5.1 Berechnung mit Translation

Analog zur Abflusstransportberechnung werden die Frachten ohne Veränderung der Ganglinienform wie ein Pfropfen durch die Transportstrecke "geschoben". Die Fließzeit  $t_f$  ist aus der Abflusstransportberechnung bekannt.

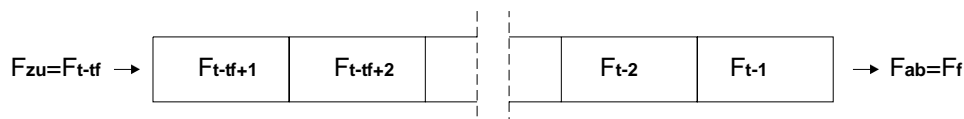


Abb. 9-9 Translation von Schmutzfrachten

### 9.5.2 Schmutztransport mit Retention

Das Kalinin-Miljukov-Verfahren (siehe Kapitel 7.2 "Berechnung mit Retention") kann vom Abflusstransport unmittelbar auf den Schmutztransport übertragen werden. Die Abflusskomponente muss hierfür lediglich durch Schmutzfracht ersetzt werden.

$$f_{t,j} = \alpha \cdot f_{t-1,j} + (1 - \alpha) \cdot f_{t,j-1}$$

Gleichung 9-7

mit

$j = 1, \dots, n$  Zahl der Berechnungsabschnitte (Speicher)

$$\alpha = e^{-\frac{\Delta t}{K^*}}$$

$f_{t,0}$  Zufluss zum Transportelement

$f_{t,n}$  Abfluss des Transportelementes

### 9.5.3 Schmutztransport mit Retention und Rückstau

Analog zur mengenbezogenen Betrachtung sind die Ansätze der nichtlinearen Speicherkaskade zu berücksichtigen.

$$f_{t,j} = f_{2,t} \cdot (f_{1,t} \cdot f_{t-1} + f_{t,j-1})$$

Gleichung 9-8

mit

$j = 1, \dots, n$  Berechnungsabschnitt

$f_{t,0}$  Zufluss zum Transportelement

$f_{t,n}$  Abfluss des Transportelementes

$$f_{2,t} = 1 - \alpha_t$$

$$f_{1,t} = \frac{\alpha_{t-1}}{1 - \alpha_{t-1}}$$

mit

$$\alpha_t = e^{-\frac{\Delta t}{K_t}}$$

$$K_t = \frac{V_{\text{Einstau},t}}{V}$$

mit

$V_{\text{Einstau},t}$  eingestautes Volumen des Abflusstransportelementes  
 $V$  Gesamtvolumen des Abflusstransportelementes

## 9.6 Stoffaufteilung in Mischwasserbauwerken (KOSIM-MW + XL)

Die Abfluss- und Stoffaufteilung findet in den Entlastungsanlagen statt. Je nach Anlagentyp wird das Mischwasser unterschiedlich behandelt. Das Arbeitsblatt A 128 der ATV unterteilt die Entlastungsbauwerke nach ihrer Funktion in folgende Bauwerkstypen:

- ◆ Regenüberlauf (RUE)
- ◆ Durchlaufbecken im Hauptschluss (DBH)
- ◆ Durchlaufbecken im Nebenschluss (DBN)
- ◆ Fangbecken im Hauptschluss (FBH)
- ◆ Fangbecken im Nebenschluss (FBN)
- ◆ Stauraumkanal mit untenliegender Entlastung (SKUE)
- ◆ Stauraumkanal mit obenliegender Entlastung (SKOE)

Unter Mischwasserbehandlung wird die Speicherung des Mischwassers und die Sedimentation von Sinkstoffen verstanden. Die Speicherung ist wegen der begrenzten Kanal- und Kläranlagenkapazität erforderlich. Der Drosselabfluss von Mischwasserbecken kann z. B. proportional zum maximalen Kläranlagenzulauf begrenzt werden.

Bei einem einfachen Überlauf wird die gesamte überschüssige Wassermenge, die Differenz zwischen Zu- und Ablauf, abgeschlagen.

Um die Leistungsfähigkeit von Entlastungsanlagen berechnen zu können, werden Speicherräume rechnerisch mit den simulierten Abfluss- und Frachtganglinien der Teilgebiete beaufschlagt. Die Füll-, Speicher- und Entleerungsprozesse der Becken werden dabei kontinuierlich simuliert.

Kanalstauräume werden programmintern bei untenliegender Entlastung rechnerisch wie Durchlaufbecken im Hauptschluss und bei obenliegender Entlastung wie Fangbecken behandelt, da die Füll- und Speicherprozesse identisch sind.

In den nachfolgenden Systemskizzen und Berechnungsgleichungen haben die Abkürzungen folgende Bedeutung:

**Abflüsse in  $\text{m}^3/\text{s}$ :**  $Q_{\text{zu}}$ : Zufluss zum Entlastungsbauwerk

$Q_{\text{zu}}^*$ : Zufluss zum Becken

$Q_{\text{ab}}$ : Abfluss zur Kläranlage

$Q_{\text{ab}}^*$ : Entleerung von Becken im Nebenschluss

$Q_{\text{kue}}$ : Klärüberlauf

$Q_{\text{bue}}$ : Beckenüberlauf

**Volumen in  $\text{m}^3$ :**  $V_{\text{B}}$ : gespeichertes Volumen im Becken

**Konzentrationen  
in  $\text{mg/l}$  bzw.  $\text{ml/l}$ :**

$C_{\text{zu}}$ : Konzentration des Zulaufs

$C_{\text{ab}}$ : Konzentration des Abflusses zur Kläranlage

$C_{\text{kue}}$ : Konzentration des Klärüberlaufs

$C_{\text{bue}}$ : Konzentration des Beckenüberlaufs

$C_{\text{B}}$ : Konzentration im Becken

$C_{\text{ü}}$ : Überlaufkonzentration =  $f(C_{\text{Kü}}, C_{\text{Bü}})$

### 9.6.1 Regenüberlauf

Bei einem einfachen Überlauf werden die ankommenden Abfluss- und Schmutzfrachten aufgeteilt. Es findet keine Speicherung der Wassermengen statt. Die Überlaufkonzentration ist gleich der Zu- und Ablaufkonzentration.

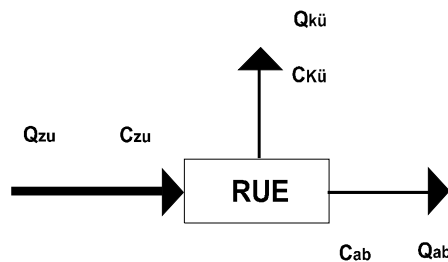


Abb. 9-10 Regenüberlauf (RUE)

### 9.6.2 Durchlaufbecken

Durchlaufbecken im Hauptschluss (Abb. 9-11) speichern die ankommenden Wassermengen, die nicht durch die Drossel abgeführt werden. Bei Vollfüllung des Beckens springt zunächst der Klärüberlauf am unterliegenden Ende des Durchlaufbeckens an. Die Überlauffracht wird infolge der Schmutzstoffsedimentation reduziert. Bei den absetzbaren Stoffen kann dieser Prozess am stärksten beobachtet werden.

Ist der Beckenzulauf größer als die Summe des Beckenablaufs und Klärüberlaufs, springt der Beckenüberlauf an, der am Einlauf der Entlastungsanlage angeordnet ist. Hier wird unsedimentiertes Mischwasser in den Vorfluter direkt abgeschlagen.

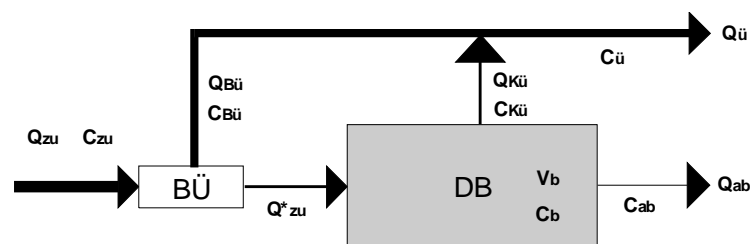


Abb. 9-11 Durchlaufbecken im Hauptschluss (DBH)

Im Gegensatz zum Durchlaufbecken im Hauptschluss, bei dem der Trockenwetterabfluss durch das Becken hindurchgeführt wird, wird beim Durchlaufbecken im Nebenschluss der Trockenwetterabfluss um die Entlastungsanlage herum abgeführt.

Die Vorteile des Nebenschlusses liegen in der geringeren hydraulischen Belastung des Beckens sowie im Rückhalt von Schmutzfrachten am Ende des Regenereignisses, dabei wird die Schmutzwasserzufuhr unterbunden und hat keinen Einfluss mehr auf die Beckenkonzentration.

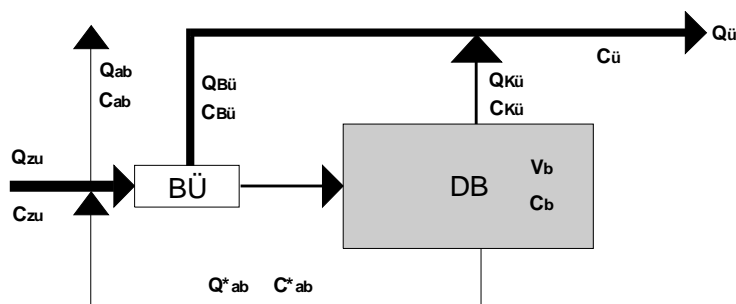


Abb. 9-12 Durchlaufbecken im Nebenschluss (DBN)

### 9.6.3 Fangbecken

Im Unterschied zu Durchlaufbecken besitzen die Fangbecken keinen Klärüberlauf. Um eine Entlastung des Spülstoßes zu vermeiden, wird die Abflussmenge zu Beginn eines Abflussereignisses gespeichert und bei Fangbecken im Hauptschluss (Abb. 9-13) gedrosselt weitergeleitet. Bei Fangbecken im Nebenschluss erfolgt eine Entleerung erst am Ende des Regenereignisses.

Der Beckenüberlauf springt erst bei vollständiger Füllung des Beckens an.

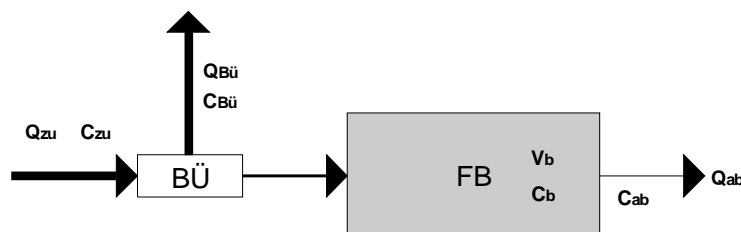


Abb. 9-13 Fangbecken im Hauptschluss (FBH)

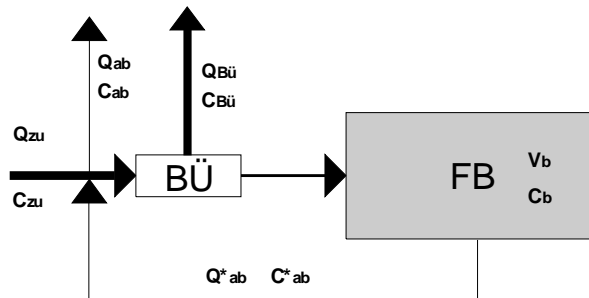


Abb. 9-14 Fangbecken im Nebenschluss (FBN)

#### 9.6.4 Konzentrationsberechnung

Unabhängig vom Beckentyp berechnet sich die Schmutzstoffkonzentration im Becken unter der Annahme einer vollständigen Durchmischung zu:

$$C_{B,t} = \frac{V_{B,t-1} \cdot C_{B,t-1} + Q_{zu,t}^* \cdot C_{zu,t} \cdot \Delta t}{V_{B,t-1} + Q_{ab,t}^* \cdot \Delta t} \quad \text{Gleichung 9-9}$$

Das sich bereits im Becken befindliche Volumen zu Beginn des betrachteten Zeitintervalls  $V_{B,t-1}$  ergibt sich aus der Bilanzierung der möglichen Zu- und Abflüsse des Beckens, wobei einzelne Terme der nachstehenden Gleichung 9-10 je nach Beckentyp oder abhängig von Füll-, Überlauf- oder Entleerungsphase entfallen können, weil ihr Wert Null oder für den betrachteten Beckentyp nicht relevant ist.

$$V_{B,t-1} = V_{B,t-2} + \Delta t (Q_{zu,t-1}^* - Q_{ab,t-1}^* - Q_{Kue,t-1}) \geq 0 \quad \text{Gleichung 9-10}$$

Die Zu- und Abflussterme der Gleichung 9-10 ergeben sich für Becken im Hauptschluss zu

$$\begin{aligned} Q_{zu}^* &= Q_{zu} - Q_{Bue} \\ Q_{ab}^* &= Q_{ab} \end{aligned} \quad \text{Gleichung 9-11}$$

und für Becken im Nebenschluss zu

$$\begin{aligned} Q_{zu}^* &= Q_{zu} - Q_{ab} - Q_{Bue} \geq 0 \\ Q_{ab}^* &= Q_{ab} - Q_{zu} \geq 0 \end{aligned} \quad \text{Gleichung 9-12}$$

Die Konzentrationen der für eine Frachtenberechnung relevanten Abflüsse nehmen folgende Werte an:

- ◆ unabhängig vom Beckentyp gilt:  $C_{bue} = C_{zu}$
- ◆ für Durchlaufbecken gilt:  $C_{kue} = C_B$

Die gedrosselten Weiterleitungen zur Kläranlage weisen bei Becken im Hauptschluss als Konzentrationen

$$\begin{aligned} C_{ab} &= C_B \quad \text{für } V_B > 0 \\ C_{ab} &= C_{zu} \quad \text{für } V_B = 0 \end{aligned} \quad \text{Gleichung 9-13}$$

und für Becken im Nebenschluss

$$\begin{aligned} C_{ab} &= C_{zu} \quad \text{für } V_B = 0 \\ C_{ab} &= \frac{Q_{zu} \cdot C_{zu} + Q_{ab}^* \cdot C_B}{Q_{zu} + Q_{ab}^*} \quad \text{für } V_B > 0 \end{aligned} \quad \text{Gleichung 9-14}$$

auf.

### 9.6.5 Absetzwirkung in Mischwasserbauwerken

Bei der Speicherung von Mischwasserabflüssen kann es aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeiten zu Ablagerungen auf der Beckensohle und somit zu einer Absetzwirkung kommen. Dieser Effekt geht mit der Verringerung der Klärüberlaufkonzentration einher. Physikalisch begründete Ansätze (z. B. Sedimentationsgeschwindigkeit nach Stokes) liegen zwar vor, jedoch wegen fehlender Kenntnisse

über das individuelle Prozessgeschehen und Zusammensetzung des Mischwasserabflusses (z. B. Kornverteilung Mischwasserzufluss) ist keine erfolversprechende Simulation des Absetzgeschehens mit deterministischen Methoden möglich.

Stattdessen wird gem. Arbeitsblatt 128 unter Absetzwirkung die prozentuale Verringerung der Klärüberlaufkonzentration verstanden. Dabei wird in KOSIM folgende Vorgehensweise zur Berücksichtigung der Absetzwirkung gewählt:

1. Die vor dem Becken (Fang-/Durchlaufbecken) angeordneten Beckenüberläufe entlasten mit der Mischkonzentration des Zulaufes; diese wird i.d.R. von der in Rechnung gestellten Absetzwirkung des Beckens nicht beeinflusst. (Lediglich bei sehr großem Beckenüberstau und gleichzeitig kleinen Beckenzuflüssen kann es zu einem Rückfluss aus den Becken zum Beckenüberlauf kommen. In diesem Fall entlastet teilweise abgesetztes Mischwasser.)
2. Von der im Zeitintervall dem Becken zulaufenden Schmutzfracht wird ein prozentualer Anteil in einen fiktiven Schlamm-speicher "abgelegt". Der restliche Anteil wird mit der im Becken vorhandenen Konzentration vollständig durchmischt. Es ergibt sich eine neue momentane Mischkonzentration. Entlastungen über den Klärüberlauf weisen diese Mischkonzentration auf.
3. Für den Anteil des CSB, der sich im Schlamm-speicher absetzen kann, werden in Abhängigkeit von konstruktiver Gestaltung und hydraulischer Belastung folgende Werte für die Absetzwirkung empfohlen:
  - Keine Absetzwirkung: 0 Prozent
  - Schlechte Absetzwirkung: 5 Prozent
  - Mittlere Absetzwirkung: 10 Prozent
  - Gute Absetzwirkung: 15 Prozent
4. Becken im Nebenschluss weisen einen unbegrenzten Schlamm-speicher auf. Becken im Hauptschluss weisen einen Schlamm-speicher auf, dessen maximale Masse in kg zahlenmäßig 30 Prozent des Speicherinhalts in  $m^3$  entspricht. Dies entspricht einer trockenen Schlamm-schicht von 1-2 mm Dicke. Wenn die Maximalfüllung des Schlamm-speichers beim Becken im Hauptschluss erreicht ist, bewirkt der sich nach wie vor absetzende Schmutzfrachtanteil direkt eine Erhöhung der Mischkonzentration im Becken.

5. Das Leerlaufen des Beckens nach Beendigung des Regens erfolgt (unabhängig von Beckentyp und -anordnung) zunächst mit der Mischkonzentration des Beckens. Der sich während des Ereignisses gebildete Schlamm-speicher bleibt unangetastet. Wenn das Becken zu 75 % geleert ist, wird eine vollständige Durchmischung im Becken unterstellt; der Schlamm-speicher wird aufgelöst. Dies führt zu einer schlagartigen Erhöhung der Konzentration des im Becken befindlichen Mischwassers (25 % des Beckenvolumens), die bis zur völligen Entleerung der Konzentration des Ablaufs entspricht.
6. Durch die beschriebende Simulation der Absetzwirkung wird bei Fangbecken oder teilgefüllten Durchlaufbecken lediglich die zeitliche Konzentrationsverteilung des Ablaufes zur Kläranlage beeinflusst.

## 9.7 Stoffaufteilung in Regenwasserbehandlungsanlagen (KOSIM-MW + XL)

Die Regenwasserbehandlungsanlage hat einen Drosselabfluss und einen Überlauf. Der Überlauf ist vor dem Becken angeordnet, so dass die Überlaufkonzentration der Zulaufkonzentration entspricht. In der Regenwasserbehandlungsanlage findet eine vollständige Durchmischung statt (Beckenkonzentration  $c_B$ ). Die Ablaufkonzentration ergibt sich aus  $c_B$  und dem Wirkungsgrad  $\eta$  unter Berücksichtigung der Mindestkonzentration  $c_{\min}$  (siehe auch Beispiele zur Abbauleistung, S. 165).

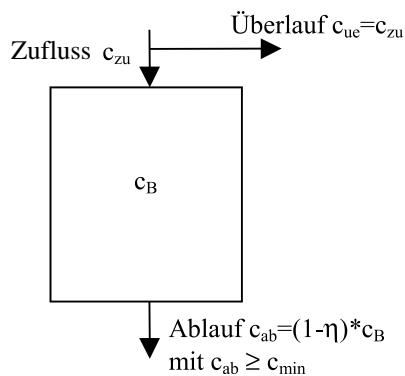


Abb. 9-15 Regenwasserbehandlungsanlagen

Die Bestimmungsgleichung für die Entlastungsfracht des Bodenfilters lautet:

$$SF_{ue} = VQ_{ue} \cdot c_{ue} + VQ_{ab} \cdot c_{ab}$$

Gleichung 9-15

Dabei bedeutet:

- $SF_{ue}$ : Entlastungsfracht des Bodenfilters in kg CSB
- $VQ_{zu}$ : Der Regenwasserbehandlungsanlage zulaufende Mischwassermenge in  $m^3$
- $VQ_{ue}$ : Am Überlauf der Regenwasserbehandlungsanlage entlastete Mischwassermenge in  $m^3$
- $VQ_{ab}$ : Vom Bodenfilter behandelte Mischwassermenge in  $m^3$
- $c_{zu}$ : Zulaufkonzentration des Mischwassers in mg CSB/l
- $c_{ue}$ : Überlaufkonzentration in mg CSB/l
- $c_B$ : Konzentration des Mischwassers in der Regenwasserbehandlungsanlage in mg CSB/l



- $c_{ab}$ : Ablaufkonzentration der Regenwasserbehandlungsanlage in mg CSB/l  
 $c_{min}$ : Minimalwert der Ablaufkonzentration der durch den Abbau in der Regenwasserbehandlungsanlage erreicht werden kann in mg CSB/l  
 $\eta_{CSB}$ : Wirkungsgrad für den CSB-Rückhalt im Bodenfilter

Die Mindestkonzentration  $c_{min}$  gibt den Wert an, der durch den Abbau in der Regenwasserbehandlungsanlage für die Ablaufkonzentration minimal erreicht werden kann. Liegt die Beckenkonzentration (aufgrund der geringen Zulaufkonzentration) bereits unterhalb der Mindestkonzentration, ist  $c_{ab} = c_B$ . Im Folgenden hierzu drei Beispiele:

Bsp. 1	$c_B = 100 \text{ mg/l}$ Abbauleistung = 50% $c_{min} = 40 \text{ mg/l}$	$c_{ab} = 50 \text{ mg/l}$
Bsp. 2	$c_B = 100 \text{ mg/l}$ Abbauleistung = 80% $c_{min} = 40 \text{ mg/l}$	$c_{ab} = 40 \text{ mg/l}$
Bsp. 3	$c_B = 30 \text{ mg/l}$ Abbauleistung = 50% $c_{min} = 40 \text{ mg/l}$	$c_{ab} = 30 \text{ mg/l}$

### 9.8 Stoffaufteilung in Mulden-Rigolen-Elementen (KOSIM-RW + XL)

Mulden-Rigolen-Elemente werden in der Regel nach der Überlaufhäufigkeit bemessen. Hierfür ist keine Schmutzfrachtberechnung erforderlich.

Bei der Betrachtung von kombinierten Systemen, z. B. wenn der Überlauf einer Mulde an ein Mischsystem angeschlossen wird, kann jedoch eine Berücksichtigung von Schmutzfrachten sinnvoll sein. Für die Aufteilung der Stofffrachten in den Speicherbauwerken Mulde und Rigole wird dabei von einem vollständig durchmischten Reaktor ausgegangen.

Für die Absetzwirkung und den Stoffabbau in Mulden-Rigolen-Elementen liegen z. Z. noch keine gesicherten Erkenntnisse vor. Zur qualitativen Einordnung können folgende Aussagen getroffen werden:

- ◆ Die naturnahe Regenwasserbewirtschaftung wird häufig nur für gering belastete Fläche angewendet. Zur Berücksichtigung in KOSIM sollte für diese Teilflächen ein verringerter jährlicher Schmutzabtrag bzw. eine verringerte Regenwasserkonzentration angesetzt werden.
- ◆ In Mulden und Rigolen findet durch das hohe spezifische Volumen (i.d.R. mehr als 200 cbm/ha) eine erhebliche Absetzwirkung statt. Durch die geringen Überlaufmengen aus Mulden-Rigolen-Elementen kann praktisch für alle Überlaufmengen von einer Absetzwirkung ausgegangen werden. In KOSIM kann diese Absetzwirkung z. Z. nicht berücksichtigt werden. Es besteht jedoch die Möglichkeit die Absetzwirkung schon unmittelbar bei der Eingabe des jährlichen Schmutzabtrages bzw. der Regenwasserkonzentration zu berücksichtigen.
- ◆ Im Muldenbett kann durch die belebte Bodenzone mit einer deutlichen Stoffakkumulation bzw. Stoffabbau gerechnet werden.

Insgesamt wird daher empfohlen, Abflüsse, die durch Mulden- und Rigolenelemente bewirtschaftet werden, als unverschmutzt anzunehmen.

## 9.9 Stoffaufteilung in Regenwassernutzungsanlagen (KOSIM-RW + XL)

In Regenwassernutzungsanlagen wird eine vollständige Durchmischung angenommen. Die zulaufende Wassermenge und Frachten werden im "Becken" Regenwassernutzungsanlage vermischt.

$$V_t \cdot c_{B,t} = Q_{zu,t} \cdot c_{zu,t} \cdot \Delta t - (Q_{ue,t} \cdot c_{ue,t} + Q_{dr,t} \cdot c_{dr,t} + Q_{ent,t} \cdot c_{ent,t}) \cdot \Delta t \quad \text{Gleichung 9-16}$$

Somit entsprechen Entnahme-, Ablauf und Überlaufkonzentration der Beckenkonzentration.

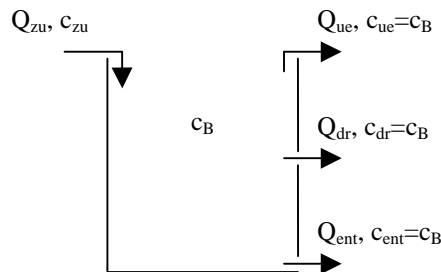


Abb. 9-16 Regenwassernutzungsanlagen

$$V_t \cdot c_{B,t} = Q_{zu,t} \cdot c_{zu,t} \cdot \Delta t - c_{B,t} \cdot (Q_{ue,t} + Q_{dr,t} + Q_{ent,t}) \cdot \Delta t \quad \text{Gleichung 9-17}$$

$$c_{B,t} = \frac{Q_{zu,t} \cdot c_{zu,t} \cdot \Delta t}{V_t + (Q_{ue,t} + Q_{dr,t} + Q_{ent,t}) \cdot \Delta t}$$

Feststoffe, die in die Regenwassernutzungsanlage gelangen, werden sich i.d.R. absetzen können. Damit wird in der Regel eine Verringerung der Ablaufkonzentration eintreten. Die Annahme der vollständigen Durchmischung liegt auf der sicheren Seite. Im Rahmen von Schmutzfrachtbetrachtungen können Absetzwirkungen in Regenwassernutzungsanlagen nicht berücksichtigt werden. Alternativ können jedoch verringerte Regenwasserkonzentrationen angesetzt werden.



### 9.10 Stoffaufteilung in Regenrückhaltebecken (KOSIM-RW + XL)

Regenrückhaltebecken werden in der Regel nach der Überlaufhäufigkeit bemessen. Eine Frachtbetrachtung ist hierfür nicht erforderlich. Im Regenrückhaltebecken selbst werden keine Absetzwirkungen und auch kein Stoffabbau berücksichtigt. Das Becken wird als vollständig durchmischter Reaktor betrachtet. Die Berechnung erfolgt gemäß Gleichung 9-9.

## 10 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung wird für Mulden, Rigolen und Regenrückhaltebecken durchgeführt. Für Regenrückhaltebecken erfolgt die statistische Auswertung oberhalb des Stauziels.

Bei der Berechnung mit KOSIM wird für die Speicherelemente der Speicherinhalt und Abfluss plus ggf. Überlauf berechnet. Für jedes Einstau-Ereignis werden die Maximalwerte

- ◆ der Zuflussganglinie (l/s),
- ◆ der Überlaufganglinie (l/s),
- ◆ des Einstauvolumens (m<sup>3</sup>) und
- ◆ der Summe des Überstaus (m<sup>3</sup>)

ermittelt. Durch eine statistische Auswertung wird eine Beziehung zwischen Volumen und zugehöriger Häufigkeit ermittelt.

Eine einfache Häufigkeitsanalyse, bei der die Wiederkehrzeit des Größtwertes mit der Länge der Zeitreihe gleichgesetzt wird, ist nicht zulässig, da der Größtwert auch ein selteneres Ereignis sein kann und damit eine größere Wiederkehrzeit hat, als die Länge der Zeitreihe. Deshalb müssen die Ansätze der Extremwertstatistik verwendet werden, bei denen den einzelnen Merkmalswerten eine größere Wiederkehrzeit (geringere Häufigkeit) zugeordnet wird, als sie sich durch einfache Auszählung ergeben würde.

In Analogie zu der Vorgehensweise bei der statistischen Analyse von Einstauereignissen in Regenrückhalteräumen (Arbeitsblatt A 117 der DWA) wird die geschätzte Wiederkehrzeit  $T_{nk}$  ermittelt zu:

$$T_{nk} = (L + 1)/k \cdot M/L$$

Gleichung 10-1

- mit  $T_{nk}$ : Wiederkehrzeit [a]  
M: Simulationszeitraum [a]  
L: Stichprobenumfang [-] (empfohlen:  $\cong 2,7 \cdot M$ )  
k: Rang der Stichprobenwerte,  
k = 1 größter Wert der Stichprobe  
k = L kleinster Wert der Stichprobe

Zur Ermittlung des funktionalen Zusammenhangs zwischen Rückhalte/Überlaufvolumina und Wiederkehrzeit wird als Verteilungsfunktion die Exponentialverteilung

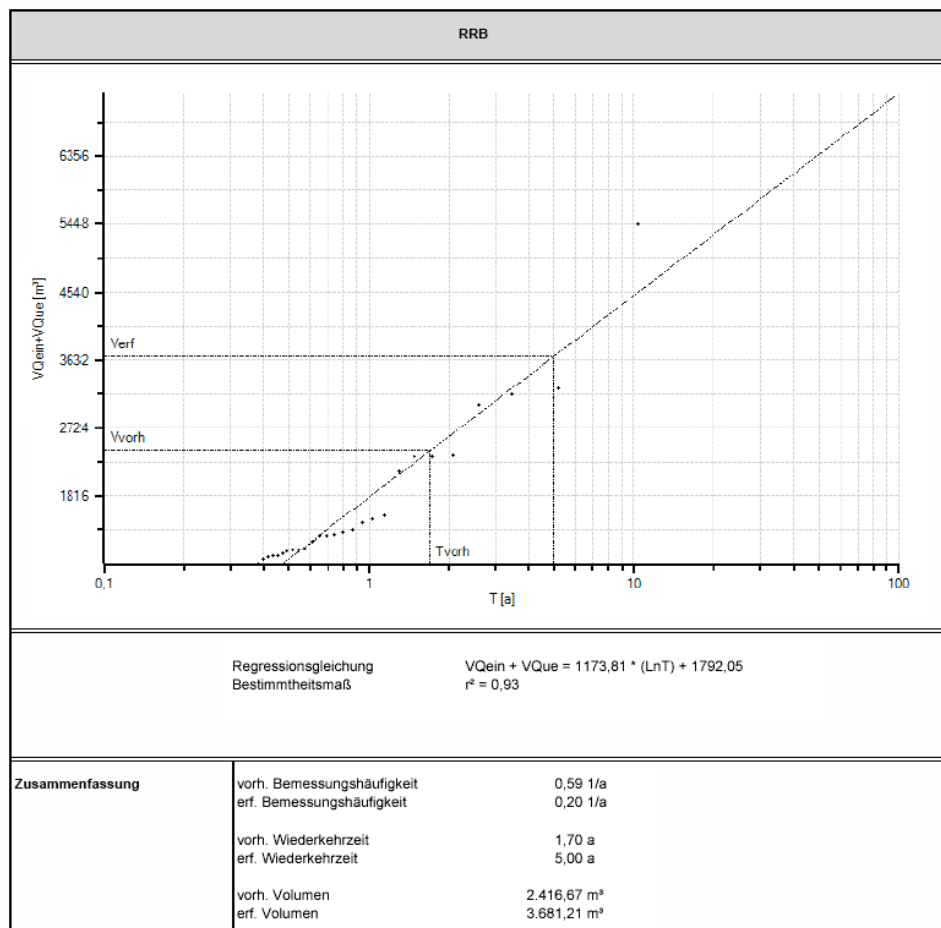
$$V_{RK} = u_p + w_p \cdot \ln(T_{nk}) \quad \text{Gleichung 10-2}$$

mit  $V_{RK}$ : Summe aus Rückhalte- und Überlaufvolumen [m<sup>3</sup>]  
 $u_p + w_p$ : Funktionsparameter

verwendet. Wird die Punktfolge ( $V_{RK}$ ,  $T_{nk}$ ) im halblogarithmischen Achsenkreuz aufgetragen, so stellt sich die Verteilungsfunktion als Gerade dar. Die Parameter  $u_p$  und  $w_p$  der Verteilungsfunktion können durch lineare Regression ermittelt werden.

Als Ergebnis der Langzeitsimulation liegen für alle abgeschlossenen Niederschlag-Abflussereignisse u. a. die Maximalwerte von Speichervolumen und - sofern aufgetreten - Überlaufvolumen vor. Für die weitere Auswertung zur Ermittlung der Beziehung zwischen Volumen und Häufigkeit werden für jedes Ereignis die Summen von Speicher- und Überlaufvolumen gebildet und diese Merkmalswerte der Größe nach geordnet.

Sofern in dem betrachteten Simulationszeitraum kein Überstauereignis auftritt, entspricht der Größtwert der maximal aufgetretenen Beckenfüllung. Weitere Hinweise und Beispiele können dem Arbeitsblatt A 117 der DWA entnommen werden.



**Abb. 10-1** Statistische Auswertung der Einstauereignisse

## 11 Systemoptimierung

Mit Hilfe der Langzeitsimulation kann durch die Variation von Eingabewerten die Auswirkung auf das Berechnungsergebnis und somit auf relevante Prozessgrößen untersucht werden. In der täglichen Arbeit führt das zu einem "Versuch-und-Irrtum"-Vorgehen, das notwendig ist, um die

- ◆ individuellen Zusammenhänge eines Entwässerungssystems zu untersuchen bzw.
- ◆ die beste Lösung auf Grundlage der bestehenden Randbedingungen

zu finden.

Mit zunehmender Anzahl von Speicherbauwerken nimmt die Anzahl variierbarer Eingabewerte und somit auch die Komplexität der Aufgabe zu.

- ◆ Zur Untersuchung des Zusammenhangs der Drosselabflüsse von zwei benachbarten Speicherbauwerken sind z. B. bei 5 Drosseleinstellungen je Bauwerk bereits 25 Simulationen erforderlich.
- ◆ Zur Dimensionierung eines Speicherbauwerks in einem bestehenden Entwässerungssystem mit insgesamt 10 Becken sind das Beckenvolumen und ggf. 10 Drosselabflüsse so festzulegen, dass eine optimale Lösung (z. B. hinsichtlich der Minimierung des erforderlichen Beckenvolumens) vorliegt.

In beiden Fällen sind viele bzw. sehr viele Rechenläufe erforderlich. Die zunehmende Komplexität geht dabei mit zunehmender Rechen- und Bearbeitungszeit einher, um die bestmögliche Systemkonfiguration zu finden. Bei umfangreichen Entwässerungssystemen bzw. komplexen Systemkonfigurationen ist es denkbar, dass mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand die beste Lösung nicht gefunden werden kann. Zur Durchführung dieser Aufgabenstellungen bietet KOSIM mit dem Modus [Systemoptimierung] Unterstützung an. Verfügbare Verfahren sind:

- ◆ Sensitivitätsuntersuchung  
zur strukturierten Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Eingabewerten und Ergebnisdaten
- ◆ Optimierung  
zur automatisierten Berechnung "optimaler" Systemkonfigurationen.

## 11.1 Sensitivitätsuntersuchung

Sensitivitätsuntersuchungen

- ◆ dienen der Untersuchung des Einflusses ausgewählter Parameter auf die Berechnungsergebnisse und
- ◆ helfen somit
  - die entwässerungstechnischen Zusammenhänge im vorliegenden System zu erkennen sowie
  - die Berechnungen des Simulationsmodells KOSIM nachzuvollziehen.

Insgesamt werden wesentliche Zusammenhänge transparent und die Projektbearbeitung vereinfacht.

### Unabhängige Größen

Zur Durchführung von Sensitivitätsuntersuchungen sind folgende Vorgaben zu definieren:

- ◆ unabhängige Größen
- ◆ deren Bandbreite (Minimum, Maximum)
- ◆ die Schrittweite für die Simulation.

Um den Berechnungsaufwand in Grenzen zu halten und die grafische Darstellbarkeit sicherzustellen, können maximal bis zu zwei unabhängige Größen zugleich variiert werden.

## Berechnung

Die Berechnung der mit den unabhängigen Größen und deren Bandbreite und Schrittweite definierten Rechenläufe wird mit KOSIM automatisiert durchgeführt. Die Ergebnisdaten in Abhängigkeit der unabhängigen Größen können in grafischer und tabellarischer Form dargestellt werden:

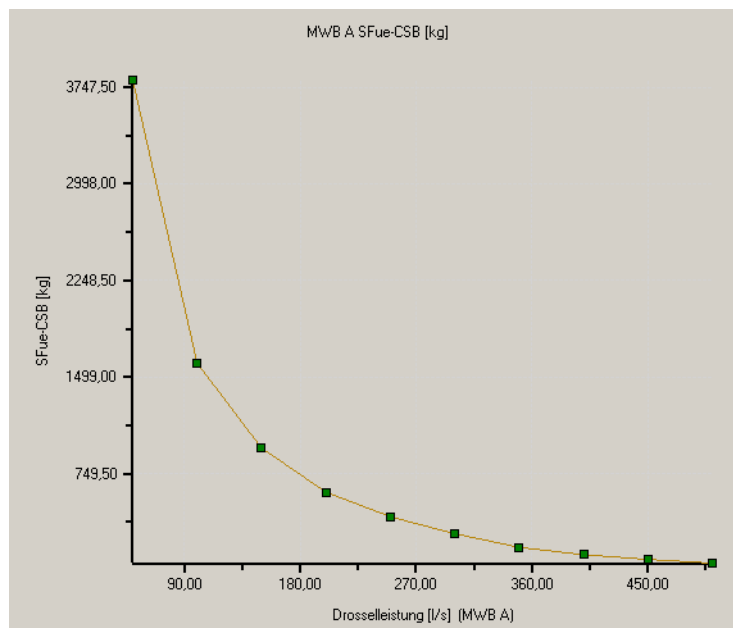


Abb. 11-1 Berechnungsbeispiel mit einer unabhängigen Größe - grafische Darstellung

Tab. 11-1 Berechnungsbeispiel mit einer unabhängigen Größe - tabellarische Darstellung

Drosselleistung [l/s] (MWB A)	SFue-CSB [kg] (MWB A)
50	3802.9
100	1608.2
150	948.7
200	606.5
250	415.8
300	283.9
350	178.5
400	120.9
450	84.8
500	55.6

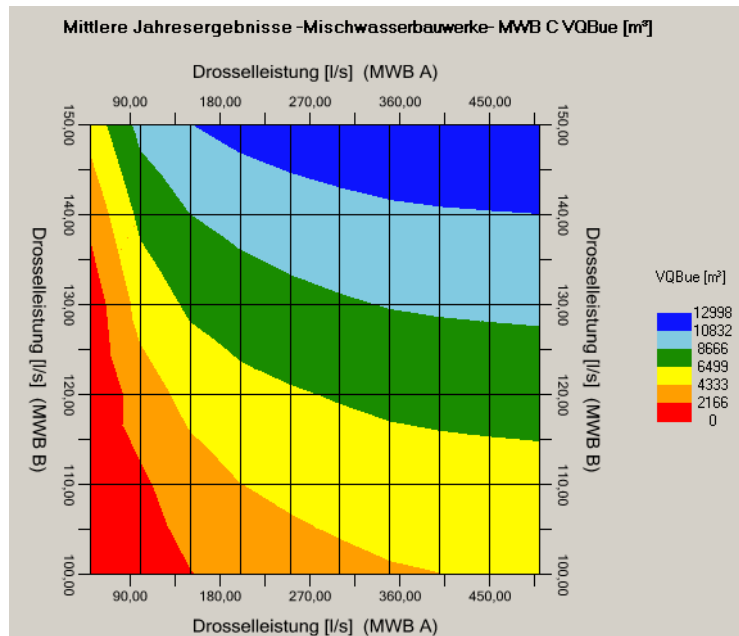


Abb. 11-2 Berechnungsbeispiel mit zwei unabhängigen Größen

## 11.2 Optimierung

Die Durchführung von

- ◆ Dimensionierungen von Speicherbauwerken in Mischsystemen,
- ◆ Dimensionierungen von Regenrückhaltebecken
- ◆ Anpassungen bestehender Entwässerungssysteme

erfordert

- ◆ Zielgrößen, die Grundlage zur Dimensionierung bzw. zur Anpassung sind, und
- ◆ unabhängige Größen (Eingabewerte für Elementattribute), die modifiziert werden, um die Zielgrößen zu optimieren.

### 11.2.1 Zielgrößen

Für ausgewählte Aufgabenstellungen und Eingabewerte bietet das Modul Systemoptimierung die Möglichkeit auf Grundlage

- ◆ eines bestehenden Entwässerungssystems,
- ◆ definierter Zielgrößen und
- ◆ modifizierbarer Eingabewerte (unabhängiger Größen)

automatisiert einen Vorschlag zur Verbesserung der Systemkonfiguration zu berechnen. Möglich sind die Zielgrößen

- ◆ Minimierung der Entlastungsmenge
- ◆ Minimierung der Entlastungsfracht
- ◆ Minimierung des Beckenvolumens

### 11.2.2 Globale und lokale Restriktionen

Um eine Berechnung mit der Zielgröße "Minimierung des Beckenvolumens" durchführen zu können, ist die Festlegung einer globalen, d.h. das gesamte Entwässerungssystem betreffenden, Restriktion erforderlich. In Abhängigkeit der definierten Schmutzparameter kann zwischen

- ◆ Maximaler Entlastungsmenge ( $\text{m}^3/\text{a}$ ) und
- ◆ Maximaler Entlastungsfracht ( $\text{kg}/\text{a}$ )

gewählt werden. Darüber hinaus kann im Rahmen von Berechnungen gemäß Arbeitsblatt A 128 als bauwerksspezifische, lokale Restriktion für Mischwasserbauwerke die

- ◆ Einhaltung des Mischverhältnisses

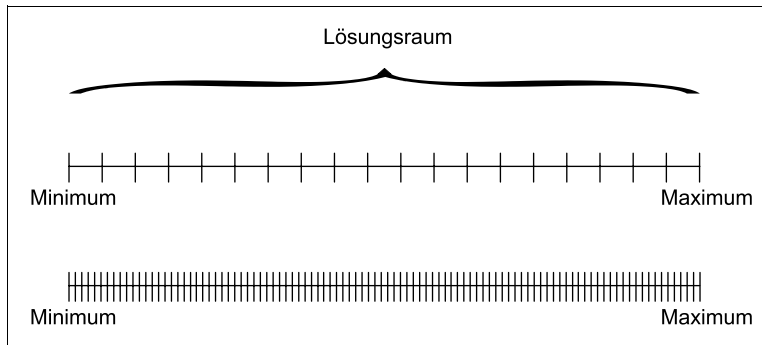
definiert werden.

### 11.2.3 Unabhängige Größen

Mit den unabhängigen Größen werden die Eingabewerte definiert, die im Rahmen der Optimierungsberechnungen der Zielgröße entsprechend modifiziert werden.

Mit der Diskretisierung des Lösungsraums werden für alle unabhängigen Größen die möglichen Lösungen, die zwischen dem definierten Minimal- und Maximalwert

liegen, festgelegt. Bei einer Diskretisierung des Lösungsraums von z. B. 20 sind 20 diskrete Werte je Variable als Lösung möglich.



**Abb. 11-3 Diskretisierung des Lösungsraums**  
(oberes Beispiel Diskretisierung = 20, unteres Beispiel Diskretisierung = 100)

Eine hochaufgelöste Diskretisierung des Lösungsraums (z. B. 100) führt

- ◆ zu "hochaufgelösten" Berechnungsergebnissen, die jedoch häufig nicht erforderlich bzw. technisch nicht umsetzbar sind.
- ◆ wegen der zufälligen Auswahl möglicher Lösungen (vgl. Kapitel 11.2.4), zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit, dass insbesondere Randbereiche (z. B. Minimal- und Maximalwert) nicht berücksichtigt werden und keine optimalen Verbesserungen vorgeschlagen werden können bzw. dass abwasserfachlich sinnvolle Maximalwerte nicht berücksichtigt werden. Dazu gehört z. B., dass bei variabler Drosselleistung des letzten Beckens des betrachteten Entwässerungssystems und der Zielgröße "Minimierung der Entlastungsmenge" die richtige Lösung diejenige ist, bei der tatsächlich der Randwert, also die maximale Drosselleistung des letzten Beckens, verwendet wurde.

Eine grobe Diskretisierung des Lösungsraums (z. B. 10) führt

- ◆ zu groben Berechnungsergebnissen, die jedoch für die praktische Umsetzung häufig ausreichend sind,
- ◆ bei hinreichender Anzahl der Simulationen zur Berücksichtigung der gesamten Bandbreite an möglichen Lösungen und somit auch der Randbereiche.

Um effizient und mit hoher Wahrscheinlichkeit die besten Lösungen zu finden, wird empfohlen,

- ♦ den Minimal- und Maximalwert der unabhängigen Größen auf den praktisch umsetzbaren Bereich einzugrenzen,
- ♦ die Diskretisierung des Lösungsraums so klein wie möglich und so groß wie nötig zu wählen. Der Standardwert ist 20.

#### 11.2.4 Modifikation von Entwässerungssystemen mit genetischen Methoden

Die wesentliche Grundlage zur Durchführung der Optimierung in KOSIM ist die Modifikation des Entwässerungssystems. Diese kann erfolgen durch:

- ♦ Mutation oder
- ♦ Kreuzung.

Die Festlegung welche Art der Modifikation jeweils vorgenommen wird, erfolgt zufällig. Mit dem Parameter [Mutationsrate] wird festgelegt wie im Mittel der Anteil der Mutationen ist. Der gültige Bereich liegt zwischen von 0 (0 Prozent) und 1 (100 Prozent). Standardwert ist 0.5 (50 Prozent).

##### Mutation

Es werden eine oder mehrere unabhängige Größen ausgewählt und zufällig verändert. Dabei wird

- ♦ innerhalb der definierten Bandbreite und
- ♦ im diskretisierten Lösungsraum

zufällig ein neuer Wert gesucht.

Die Zufallsvariablen sind gleichverteilt. Alle möglichen Werte besitzen dieselbe Wahrscheinlichkeit.

##### Kreuzung

Mit einer Kreuzung erfolgt die Modifikation unabhängiger Größen/Variablen durch eine "Vermischung" von zwei Entwässerungssystemen (Eltern) zu einem neuen Entwässerungssystem (Kind).

Für jede Variable wird durch eine gleichverteilte Zufallszahl festgelegt, welcher Elternteil (Vater oder Mutter) den Variableninhalt weitervererben kann. Die gezogenen Zufallszahlen sind gleichverteilt, so dass "Väter" (erstes Entwässerungssystem) und "Mütter" (zweites Entwässerungssystem) im Mittel die gleiche Wahrscheinlichkeit besitzen ihre "Erbmasse" (Variablen-Inhalte) weiterzugeben.

Tab. 11-2 Beispiel für eine Kreuzung

	Vater	Mutter	Kind
Variable 1			
Variable 2			
Variable 3			
Variable 4			

## 11.2.5 Interner Berechnungsgang

### 1. Schritt: Berechnung im Ausgangszustand

Im ersten Schritt wird auf der Grundlage des im Modus [Nachweis] eingegebenen Entwässerungssystems (Ausgangszustand) eine Langzeitsimulation durchgeführt. Der Wert für die Zielgröße bzw. globale Restriktion ist Grundlage für die Bewertung der folgenden Berechnungen.

Der weitere Berechnungsgang wird abgebrochen, wenn im Ausgangszustand die globale oder eine lokale Restriktion nicht eingehalten wird.

### 2. Schritt: Aufbau einer Fitnessfunktion

KOSIM erzeugt 20 Entwässerungssysteme mit jeweils im Rahmen der vorgegebenen Bandbreite zufällig erzeugten unabhängigen Variablen. Für jedes Entwässerungssystem wird eine Langzeitsimulation durchgeführt und der Wert für die Zielgröße wird berechnet.

Berechnungen mit nicht eingehaltener globaler Restriktion oder nicht eingehaltenen lokalen Restriktionen sind erfolglose Simulationen. In diesem Fall wird ein neues Entwässerungssystem mit neuen zufällig gewählten unabhängigen Variablen erzeugt und die Langzeitsimulation wird wiederholt.

Der weitere Berechnungsgang wird abgebrochen, wenn der Parameter [max. erfolglose Simulationen in Folge] erreicht ist. Der Standardwert hierfür ist 25.

Wenn 20 Entwässerungssysteme mit erfolgreichen Simulationen vorliegen, werden die Ergebnisse nach der Rangfolge der Zielgröße (z. B. Entlastungsfracht) sortiert.

- ◆ Das beste Ergebnis (kleinstes Entwässerungssystem) wird an die erste Stelle und
- ◆ das schlechteste Ergebnis (größte Entlastungsfracht) an die 20. Stelle platziert.

Die Liste der 20 Entwässerungssysteme wird als Fitnessfunktion bezeichnet.

### 3. Schritt: Verbesserung der Fitnessfunktion

In einem weiteren Schritt wird durch gezieltes Vorgehen versucht, die Fitnessfunktion zu verbessern. Hierzu wird mit genetischen Methoden (vgl. Kapitel 11.2.4) ein neues Entwässerungssystem entwickelt. Grundlage hierfür sind die bestehenden Entwässerungssysteme in der Fitnessfunktion.

Die Auswahl der für die neue Entwicklung eines Entwässerungssystems erforderlichen Systeme erfolgt mit Hilfe einer Selektionsfunktion, die die "besten" Entwässerungssysteme (kleiner Rang in der Fitnessfunktion) bevorzugt.

$$i = 1 + \text{int}(20 \cdot (\text{Zufallszahl}(0, 1))^2)$$

Gleichung 11-1

mit

int: ganzzahliger Anteil einer Fließkommazahl

Zufallszahl (0,1): gleichverteilte Zufallszahl zwischen 0 und 1

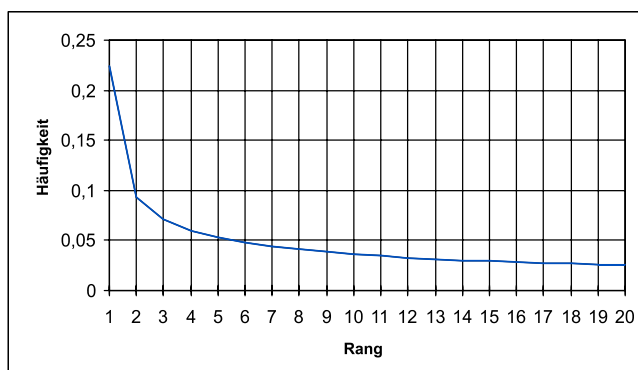


Abb. 11-4 Häufigkeit der Auswahl von Entwässerungssystemen aus der Fitnessfunktion für 20 Systeme

Anschließend wird eine Langzeitsimulation mit dem neuen Entwässerungssystem durchgeführt. Die Bewertung des Entwässerungssystems erfolgt mit Hilfe der Berechnungsergebnisse.

- ◆ Nicht eingehaltene Restriktionen führen zum Verwerfen des Entwässerungssystems (erfolglose Simulation).
- ◆ Die Einordnung in die Fitnessfunktion erfolgt anhand der Zielgröße.
- ◆ Für die weitere Verbesserung der Fitnessfunktion werden nur die 20 besten Entwässerungssysteme verwendet.

### 11.2.6 Steuerung der internen Berechnungen

Die Steuerung der internen Berechnungen erfolgt auf Grundlage von Zyklen. Ein Zyklus ergibt sich aus der Anzahl der Entwässerungssysteme in der Fitnessfunktion. Bei 20 Entwässerungssystemen in der Fitnessfunktion entspricht somit ein kompletter Zyklus 20 erfolgreichen Simulationen.

- ◆ Um eine ausreichende Zahl an Simulationen zu gewährleisten, sollte ein Minimum an Zyklen berechnet werden (Parameter [Minimum Zyklen]). Der Standardwert ist 6 Zyklen. Erst wenn der Parameter [Minimum Zyklen] erreicht ist können die folgenden Abbruchkriterien greifen.
- ◆ Nach sehr vielen Zyklen, ist davon auszugehen, dass keine weitere Verbesserung der Fitnessfunktion zu erwarten ist (Parameter [Maximum Zyklen]). Der Standardwert ist 20 Zyklen. Wenn der Parameter [Maximum Zyklen] erreicht ist, werden die Berechnungen abgebrochen.
- ◆ Nach vielen Zyklen ohne Verbesserung ist davon auszugehen, dass keine weitere Verbesserung der Fitnessfunktion zu erwarten ist (Parameter [Abbruch nach Zyklen ohne Verbesserung]). Der Standardwert ist 8 Zyklen. Wenn der Parameter [Abbruch nach Zyklen ohne Verbesserung] erreicht ist, werden die Berechnungen abgebrochen.
- ◆ Berechnungen mit nicht eingehaltener globaler Restriktion oder nicht eingehaltenen lokalen Restriktionen sind erfolglose Simulationen. In diesem Fall wird ein neues Entwässerungssystem mit neuen zufällig definierten unabhängigen Größen erzeugt und die Langzeitsimulation wird wiederholt. Der weitere Berechnungsgang wird abgebrochen, wenn der Parameter [max. erfolglose Simulationen in Folge] erreicht ist. Der Standardwert für diesen Parameter ist 25.

Nach dem Abschluss aller Berechnungen erfolgt die Ausgabe des besten Entwässerungssystems (Rang eins der Fitnessfunktion).

### 11.2.7 Vorgehensweise zur Durchführung von Optimierungen

Die Durchführung von Optimierungsberechnungen wird in folgenden Schritten empfohlen:

- ◆ Schritt 1: Definition des Entwässerungssystems  
Eingabe eines Entwässerungssystems. Das Entwässerungssystem entspricht dem Ausgangszustand gemäß Kapitel 11.2.5.
- ◆ Schritt 2: Durchführung einer Langzeitsimulation  
Nach der Simulation wird empfohlen zu prüfen, ob die in Schritt 3 ggf. zu definierenden globalen und lokalen Restriktionen eingehalten sind. Andernfalls ist die Eingabe zu modifizieren und die Langzeitsimulation zu wiederholen.
- ◆ Schritt 3: Festlegung der Optimierungsparameter  
Dazu gehören:
  - Festlegung der Zielgröße
  - Definition einer globalen Restriktion (optional, nur wenn Zielgröße = Minimierung des Beckenvolumens)
  - Definition lokaler Restriktionen (Mischwassernachweis nach A 128 mit der Einhaltung eines Mindestmischverhältnisses)
  - nur im Bedarfsfall: Anpassung der Eingabewerte im Bereich [Einflussgrößen] (es wird empfohlen, die Standardwerte beizubehalten).
- ◆ Schritt 4: Definition der möglichen unabhängigen Größen  
Für jedes einzelne Bauwerk ist festzulegen welche Attribute (z. B. Länge eines Bauwerks) als unabhängige Größe gewählt werden dürfen und zwischen welchem Minimum und Maximum sich die Werte für das jeweilige Attribut bewegen dürfen.
- ◆ Schritt 5: Optimierung  
Mit der Funktion [Nachweis]-[Optimierung starten] wird der Optimierungsprozess gestartet.
- ◆ Schritt 6: Auswertung und Prüfung der Berechnungsergebnisse  
Das mit der Optimierung ermittelte Entwässerungssystem ist lediglich ein Vorschlag. Für das Finden einer tatsächlich "optimalen", d.h. besten, Lösung gibt es keine Gewähr. Durch die Nutzung von Zufallszahlen können neue Optimierungen zu anderen Lösungen führen.



---

## **Teil 3:**

### **Anhänge und Literaturverzeichnis**

## **Anhang A: Ergebnisauswertung und Abkürzungen**

Die Ergebnisdatei hat das Format \*.klsb. Es handelt sich um eine Binärdatei, die schnell im Zugriff ist und nicht mit einem Texteditor geändert werden kann. Die Funktionen zur Ergebnisauswertung greifen auf die Ergebnisdatei zu, um z. B. druckbare Berichte zu generieren.

Die Ergebnisdatei liegt immer im gleichen Verzeichnis wie die Projektdatei.

Es sind verschiedene Wege der Auswertung möglich:

- ◆ Funktion [Ergebnisauswertung]-[Schnellansicht]  
Aufbereitung der Daten im HTML-Format zur Anzeige im Standard-Browser (mit aktiviertem Javascript!)  
Hinweis: Die Schnellansicht kann über die Einstellungen global abgeschaltet werden, um die Rechenzeit in KOSIM zu verkürzen.
- ◆ Funktion [Ergebnisauswertung]-[Berichtsassistent]  
Ausgabe der Ergebnisse in einer PDF-Datei deren Metadaten (z. B. Kopfzeile und Seitenzahl) individuell konfigurierbar sind
- ◆ Funktion [Ergebnisauswertung]-[Diagramm Sensitivitätsuntersuchung]  
Grafische Aufbereitung der Ergebnisse einer Sensitivitätsuntersuchung (nur im Betriebsmodus [Systemoptimierung])

Die Bedeutung der **Abkürzungen**, die in den Ergebnislisten bzw. -berichten verwendet werden, können Sie überprüfen, indem Sie vom Berichtsassistent einen Bericht mit dem Berichtsthema "Abkürzungsverzeichnis" erstellen lassen.

## Anhang B: Wertebereiche und Vorgaben für neue Datensätze

Dieser Anhang beschreibt die Wertebereiche und die Vorgaben für neue Datensätze, die standardmäßig in KOSIM implementiert sind.

FELDNAME	Möglicher Wertebereich		Sinnvoller Wertebereich		Vorbelegungen
	Min. Wert	Max. Wert	Min. Wert	Max. Wert	
<b>Tagesganglinien</b>					
Relativfaktoren Stunde	0	24	0	24	siehe weiteren Anhang
<b>Jahresganglinien</b>					
Relativfaktor Monat	0	365	0	365	siehe weiteren Anhang
<b>Perioden</b>					siehe weiteren Anhang
<b>Regenabflussparameter</b> befestigte Flächen teibefestigte Flächen unbefestigte Flächen natürliche Flächen					siehe weiteren Anhang
<b>Simulationsgrunddaten</b>					
Berechnungszeitschritt [min] oder [sek]	1 sek*	60 min*			5 min * möglich sind Werte von 1 sek bis 60 min (in Abhängigkeit der Regendaten-Intervallbreite)
Hydrostatischer Rückstau	Ja (mit 800 Min-DN)	Nein			Nein
Überregnung	gleichm.	ungleichm.			gleichmäßig
<b>Generierung von Gebietsdaten</b>	eine befestigte Fläche wird je Gebiet standardmäßig definiert; bis zu vier Flächen sind als Vorgabe möglich (je eine befestigte, teibefestigte, unbefestigte und natürliche Fläche)				
<b>Stoffgrößen</b>	beliebig viele				keine
<b>Verdunstung</b>					
Verdunstung					657 mm/a
Verdunstung bei Regen	Ja	Nein			Ja



## Anhang B: Wertebereiche und Vorgaben für neue Datensätze

FELDNAME	Möglicher Wertebereich		Sinnvoller Wertebereich		Vorbelegungen
	Min. Wert	Max. Wert	Min. Wert	Max. Wert	
Verdunstungsart	konst.	period.			periodisch
<b>Trockenwetter-Gebietsabflusssspende</b>	ein Standard-Parametersatz, der jedoch keine allgemeingültigen Vorgaben enthält; beliebig viele Parametersätze sind möglich				
<b>System: Gebiete</b>					
(Gebiets-)Flächen	siehe auch "Generierung von Gebietsdaten" und "Flächen"				
Neigungsgruppe	1	4			1
Trockenwetter-Gebietsabflusssspende	beliebiger Parametersatz wählbar				
Oberflächenabfluss als niederschlagsbed. Fremdwasser	Ja	Nein			Nein
<b>System: Flächen (teil-)befestigt</b>					
Regenabflussparameter	beliebig wählbar aus vordefinierten und benutzerdefinierten Parametersätzen				
Einheit Fläche	ha	m <sup>2</sup>			ha
Abflusskonzentration	Speicherkonstante (mit Anzahl Speicher = wählbar) Fließzeiten (mit Anzahl Speicher = 3) Schwerpunktlaufzeit (mit Anzahl Speicher = 3)				Speicherkonstante
Speicherkonstante [min]	0,001			100	0,01
Längste Fließzeit im Kanalnetz [min]	0			200	
Fließzeit auf der Oberfläche [min]	0			20	3
<b>System: Flächen unbefestigt</b>					
Regenabflussparameter	beliebig wählbar aus vordefinierten und benutzerdefinierten Parametersätzen				
Einheit Fläche	ha	m <sup>2</sup>			ha
Abflusskonzentration	Speicherkonstante (mit Anzahl Speicher = wählbar) Fließzeiten (mit Anzahl Speicher = 3) Schwerpunktlaufzeit (mit Anzahl Speicher = 3)				Speicherkonstante
Speicherkonstante [min]	0,001			100	0,01



## Anhang B: Wertebereiche und Vorgaben für neue Datensätze

FELDNAME	Möglicher Wertebereich		Sinnvoller Wertebereich		Vorbelegungen
	Min. Wert	Max. Wert	Min. Wert	Max. Wert	
Längste Fließzeit im Kanalnetz [min]	0			200	
Fließzeit auf der Oberfläche [min]	0			20	3
Regenabflussparameter	beliebig wählbar aus vordefinierten und benutzerdefinierten Parametersätzen				
<b>System: Flächen natürlich</b>					
Regenabflussparameter	beliebig wählbar aus vordefinierten und benutzerdefinierten Parametersätzen				
Einheit Fläche	ha	km <sup>2</sup>			ha
Abflusskonzentration	Speicherkonstante (mit Anzahl Speicher = wählbar) Fließgewässerparameter (frei definierbar)				Speicherkonstante
Speicherkonstante [min]	0,001			100	0,01
Länge Fließgewässer [km]	0			200	
Gefälle Fließgewässer [%]	0			200	0
<b>System: Einzeleinleiter</b>					
Periodische Einleitung	Ja	Nein			Ja
Periode Wasserverbrauch	beliebig wählbar aus vordefinierten und benutzerdefinierten Ganglinien				Konstant
Wasserverbrauch [l/EW*d]	0		80	200	
Einheit Wasserverbrauch [(l/s) oder (l/d) oder (m <sup>3</sup> /a) oder (l/EW*d) oder (m <sup>3</sup> /EW*a)]					l/s
Einwohnerwert [EW]	0				80
Fremdwasseranfall [(% von Qs,d) oder (l/s) oder (m <sup>3</sup> /a)]	0				0 Einheit: % von Qs,d
Stoffgrößen: Verschmutzung [(mg/l) oder (kg/d) oder (g/EW*d) oder (t/a)]	0				0 Einheit: mg/l



## Anhang B: Wertebereiche und Vorgaben für neue Datensätze

FELDNAME	Möglicher Wertebereich		Sinnvoller Wertebereich		Vorbelegungen
	Min. Wert	Max. Wert	Min. Wert	Max. Wert	
<b>System: Verbindung/Transportelement</b>					
Transporttyp	Transportstrecke Haltung Verbindung				Transportstrecke
Berechnungsmodus	Translation oder Retention (Hydrost. Rückstau möglich bei Retention - Vorgabe ist Nein; vgl. Simulationsgrunddaten)				Translation für Transportstrecken; nur Retention möglich für Haltungen
Abflussbeschränkung	Ja	Nein			Nein
Fließzeit bei Vollfüllung [min]	0	freie Eingabe nur bei Transportstrecke/Translation möglich, sonst berechneter Wert			
Sohlgefälle berechnen	Ja	Nein			Nein
Sohlgefälle [%]	0			10	
Profiltyp	Rechteck, Ei, Maul oder Kreis				Rechteck
Profilhöhe (ggf. -breite) [mm]	0				
Länge der Transportstrecke [m]	0				
Betriebsrauheit [mm]	0,1		0,25	1,5	1,5
<b>System: Mischwasserbauwerke RUE</b>					
Typ Drosselabfluss	konstant oder gesteuert durch (anderes Bauwerk)				konstant
Drosselleistung [l/s]	0				1
Trennschärfe	1	2		1,3	1,05
<b>System: Mischwasserbauwerke SKUE/ SKOE</b>					
Absetzwirkung	Ja	Nein	nur bei definierten Stoffgrößen; Vorgabe ist Nein		
Rückstau	Ja	Nein	nur bei entsprechenden Simulationsgrunddaten; Vorgabe ist Nein		
Profiltyp	Rechteck, Ei, Maul oder Kreis				Rechteck
Profilhöhe (ggf. -breite) [mm]	0				
Stauraumlänge [m]	0				



## Anhang B: Wertebereiche und Vorgaben für neue Datensätze

FELDFNAME	Möglicher Wertebereich		Sinnvoller Wertebereich		Vorbelegungen
	Min. Wert	Max. Wert	Min. Wert	Max. Wert	
Gefälle [‰]	0				
Schwelle über Tiefpunkt [m]					
Typ Drosselabfluss	konstant oder druckabhängig oder gesteuert durch (anderes Bauwerk)				konstant
Drosselabfluss Konstant [l/s]	0				1
Durchmesser Drossel [mm]	0				
Drosselbeiwert	0,2	1	0,59	0,9	0,65
Schwellenlänge [m] (für KÜ bei SKUE; für BÜ bei SKOE)	0				10 für SKUE; 5 für SKOE
Überfallbeiwert (für KÜ bei SKUE; für BÜ bei SKOE)	0,2	1	0,5	0,8	0,65
<b>System: Mischwasserbauwerke FBN/ FBH</b>					
Absetzwirkung	Ja	Nein	nur bei definierten Stoffgrößen; Vorgabe ist Nein		
Rückstau	Ja	Nein	nur bei entsprechenden Simulationsgrunddaten; Vorgabe ist Nein		
Länge [m]	0	Werte werden definiert oder nach Volumeneingabe identisch gesetzt			
Breite [m]	0				
Tiefe [m]	0	Wert wird definiert oder nach Volumeneingabe auf 2 gesetzt			
Volumen [m <sup>3</sup> ]	0	Wert wird definiert oder aus Geometriedaten berechnet			
Typ Drosselabfluss	konstant oder druckabhängig oder gesteuert durch (anderes Bauwerk)				konstant
Drosselabfluss Konstant [l/s]	0				1
Durchmesser Drossel [mm]	0				
Drosselbeiwert	0,2	1	0,59	0,9	0,65
Schwellenlänge (BÜ) [m]	0				5
Überfallbeiwert (BÜ)	0,2	1	0,5	0,8	0,65



## Anhang B: Wertebereiche und Vorgaben für neue Datensätze

FELDNAME	Möglicher Wertebereich		Sinnvoller Wertebereich		Vorbelegungen
	Min. Wert	Max. Wert	Min. Wert	Max. Wert	
<b>System: Mischwasserbauwerke DBN/ DBH</b>					
Absetzwirkung	Ja	Nein	nur bei definierten Stoffgrößen; Vorgabe ist Nein		
Rückstau	Ja	Nein	nur bei entsprechenden Simulationsgrunddaten; Vorgabe ist Nein		
Länge [m]	0	Werte werden definiert oder nach Volumeneingabe identisch gesetzt			
Breite [m]	0				
Tiefe [m]	0	Wert wird definiert oder nach Volumeneingabe auf 2 gesetzt			
Volumen [m³]	0	Wert wird definiert oder aus Geometriedaten berechnet			
Typ Drosselabfluss	konstant oder druckabhängig oder gesteuert durch (anderes Bauwerk)				konstant
Drosselabfluss Konstant [l/s]	0				1
Durchmesser Drossel [mm]	0				
Drosselbeiwert	0,2	1	0,59	0,9	0,65
Schwellenlänge (BÜ) [m]	0				5
Überfallbeiwert (BÜ)	0,2	1	0,49	0,8	0,65
Typ max. KÜ	direkt	Bauwerksdaten			Bauwerksdaten
Max KÜ [l/s]	0				
Schwellenlänge (KÜ) [m]	0				10
Überfallbeiwert (KÜ)	0,2	1	0,49	0,8	0,65
<b>System: Mulden</b>					
Bemessungshäufigkeit Soll [1/a]	0				1
Länge [m]	0	1000			10
Breite [m]	0	1000			2,50
Max. Einstautiefe [m]	0	1000			0,30
Böschungsneigung [1: ]	0	1000			2,50
kf-Wert [m/s]	0	10 <sup>-2</sup>			10 <sup>-5</sup>



FELDNAME	Möglicher Wertebereich		Sinnvoller Wertebereich		Vorbelegungen
	Min. Wert	Max. Wert	Min. Wert	Max. Wert	
Nutzbare Feldkapazität [%]	0	100			20,0
Mächtigkeit [m]	0	1000			0,30
<b>System: Rigolen</b>					
Bemessungshäufigkeit Soll [1/a]	0				0,2
Länge [m]	0	1000			10
Breite [m]	0	1000			1,0
Höhe [m]	0	1000			0,50
Porenanteil (der Füllung) [%]	0	100			35
Durchmesser Dränrohr [mm]	0	1000			150
Dränrohrsohle über Rigolensohle [m]					0
Wandstärke Dränrohr [mm]	0	1000			1,50
Typ Drosselabfluss	[l/s] oder [l/s*ha] oder [gesteuert durch (anderes Bauwerk)]				l/s
Drosselleistung					0
kf-Wert	0	$10^{-2}$			$10^{-7}$
<b>System: Regenwassernutzung</b>					
Bemessungshäufigkeit Soll [1/a]	0				0,2
Nutzungsvolumen [m <sup>3</sup> ]	0				
Retentionsvolumen [m <sup>3</sup> ]	0				
Mittlere Entnahmerate [m <sup>3</sup> /a]	0				
Periode Entnahme	beliebig wählbar aus vordefinierten und benutzerdefinierten Ganglinien				Konstant
Typ Drosselabfluss	konstant oder gesteuert durch (anderes Bauwerk)				konstant
Drosselleistung [l/s]	0				
<b>System: Regenrückhaltebecken</b>					
Bemessungshäufigkeit Soll [1/a]	0				0,2
Länge [m]	0	1000			



FELDNAME	Möglicher Wertebereich		Sinnvoller Wertebereich		Vorbelegungen
	Min. Wert	Max. Wert	Min. Wert	Max. Wert	
Breite [m]	0	1000			
Tiefe [m]	0	1000			
Böschungsneigung [1: ]	0	1000			
Stauziel über Sohle [m]	0				
kf-Wert Sohle [m/s]	0	$10^{-2}$			
kf-Wert Böschung [m/s]	0	$10^{-2}$			
Typ Drosselabfluss (Drossel 1/2)	konstant oder druckabhängig oder gesteuert durch (anderes Bauwerk)				konstant
Rohrsohle über Beckensohle Drossel [m] (Drossel 1/2)	0				
Drosselleistung (konstant) [l/s] (Drossel 1/2)	0				
Durchmesser Drossel [mm] (Drossel 1/2)	0				
Drosselbeiwert (Drossel 1/2)	0,2	1	0,59	0,9	
Überlauf Schwellenlänge [m]					2,0
Überfallbeiwert					0,650
<b>System: Regenwasserbehandlung</b>					
Überlauf	Becken-überl.	Klär-überl.			Beckenüberlauf
Volumen [m <sup>3</sup> ]	0				
Max. Einstauhöhe [m]	0		0,75	1	1
Typ Drosselabfluss	l/s oder gesteuert durch (anderes Bauwerk)				l/s
Drosselleistung [l/s]	0				
<b>System: Kläranlage</b>					
Modus	[Kein Stoffabbau] oder [Abbauleistung mit Mindestkonzentration] oder [GESIM]				kein Stoffabbau

## Anhang C: Bereitgestellte Datensätze für Tagesganglinien

Die Tagesganglinien werden nach der DWA (früher: ATV) nach der Größe des Einzugsgebietes eingeteilt. Die Klassifizierung erfolgt nach Einzugsgebieten

- ◆ größer als 250.000 Einwohner
- ◆ 50.000 bis 250.000 Einwohner
- ◆ 10.000 bis 50.000 Einwohner
- ◆ 5.000 bis 10.000 Einwohner
- ◆ 0 bis 5.000 Einwohner.

Außerdem sind in den Vorbelegungen eine Tagesganglinie für Gewerbe von 6-18 Uhr, eine konstante Tagesganglinie und 5 Stoffganglinien vorgegeben.

	ATV >250 TsdE (x=16)	ATV 50-250 TsdE (x=14,1)	ATV 10-50 TsdE (x=12)	ATV 5-10 TsdE (x=10)	ATV 0-5 TsdE (x=8)	Gewerbe 6-18 Uhr (x=12)	Konstant (x=24)
0 Uhr	0,6	0,4	0,2	0	0	0	1
1 Uhr	0,5	0,3	0,2	0	0	0	1
2 Uhr	0,6	0,3	0,2	0,1	0	0	1
3 Uhr	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1	0	1
4 Uhr	0,9	0,7	0,6	0,4	0,6	0	1
5 Uhr	1	0,9	0,9	1,1	1,6	0	1
6 Uhr	1	1	1,1	1,2	1,9	2	1
7 Uhr	1,1	1,1	1,3	1,1	1,3	2	1
8 Uhr	1,1	1,2	1,3	0,9	1,1	2	1
9 Uhr	1,2	1,3	1,4	0,7	0,8	2	1
10 Uhr	1,3	1,4	1,6	1,1	1	2	1
11 Uhr	1,4	1,6	1,8	1,7	1,9	2	1
12 Uhr	1,5	1,7	2	2,4	3	2	1
13 Uhr	1,4	1,6	1,8	2,2	2,5	2	1
14 Uhr	1,3	1,4	1,4	1,7	1,6	2	1
15 Uhr	1,1	1,3	1,2	1,4	0,8	2	1
16 Uhr	1,1	1,2	1,1	1,4	0,7	2	1
17 Uhr	1,1	1,1	1,1	1,6	1,3	2	1
18 Uhr	1	1,2	1,1	1,6	1,8	0	1
19 Uhr	0,9	1	1,2	1,3	1,5	0	1
20 Uhr	0,9	0,9	1	0,9	0,4	0	1
21 Uhr	0,8	0,8	0,7	0,5	0,1	0	1
22 Uhr	0,8	0,6	0,3	0,3	0	0	1
23 Uhr	0,7	0,5	0,2	0,2	0	0	1

	Stoff 0-5 TsdE	Stoff 5-10 TsdE	Stoff 10-50 TsdE	Stoff 50-250 TsdE	Stoff >250 TsdE
0 Uhr	0	0	0,14	0,27	0,44
1 Uhr	0	0	0,12	0,2	0,36
2 Uhr	0	0,05	0,11	0,19	0,36
3 Uhr	0,02	0,06	0,11	0,21	0,34
4 Uhr	0,12	0,1	0,17	0,24	0,37
5 Uhr	0,45	0,32	0,3	0,34	0,46
6 Uhr	0,68	0,44	0,43	0,44	0,53
7 Uhr	0,69	0,58	0,72	0,66	0,73
8 Uhr	0,79	0,65	0,96	0,93	0,92
9 Uhr	0,83	0,72	1,46	1,39	1,33
10 Uhr	1,31	1,41	2,08	1,85	1,75
11 Uhr	2,77	2,42	2,6	2,34	2,06
12 Uhr	4,2	3,28	2,77	2,38	2,1
13 Uhr	3,7	3,18	2,65	2,37	2,08
14 Uhr	2,4	2,48	2,09	2,11	1,97
15 Uhr	1,17	2	1,76	1,92	1,66
16 Uhr	0,75	1,47	1,2	1,33	1,27
17 Uhr	1,19	1,44	1,03	1,07	1,12
18 Uhr	1,5	1,3	0,94	1,06	0,96
19 Uhr	1,11	0,95	0,91	0,81	0,8
20 Uhr	0,26	0,59	0,69	0,67	0,74
21 Uhr	0,06	0,3	0,44	0,54	0,62
22 Uhr	0	0,16	0,19	0,38	0,56
23 Uhr	0	0,1	0,13	0,3	0,47

Die genannten Tagesganglinien sind im Programm bereits als "vordefinierte" Ganglinien implementiert. Sie können durch eigene ("benutzerdefinierte") Ganglinien ergänzt werden.

Die Vorbelegungen enthalten außerdem vordefinierte Jahresganglinien:

- ◆ Konstant,
- ◆ Sommerurlaub und
- ◆ Schule.

Perioden, die auf die vordefinierten Tages- und Jahresganglinien zurückgreifen, sind ebenfalls im Programm implementiert. Es können jedoch beliebig viele eigene Perioden angelegt werden, bei denen für jeden Wochentag eine eigene Tagesganglinie gewählt werden kann. Die Jahresganglinien "Sommerurlaub" und "Schule" eignen sich insbesondere zum Erstellen einer Periode für Regenwassernutzungsanlagen.

## Anhang D: Bereitgestellte Parametersätze für Flächen

Dieser Anhang beschreibt die Parametersätze, die standardmäßig in jeder neu erstellten Projektdatei als Vorbelegungen eingetragen sind. Zusätzliche Parametersätze können vom Anwender angelegt und in der Vorbelegungsdatei (`kosim.default`) gespeichert werden (vgl. auch Kapitel "Die Vorbelegungsdatei" in der Online-Hilfe).

### Parameter befestigte Flächen

Für befestigte Flächen sind folgende Parametersätze vordefiniert:

- ◆ flache Dachflächen
- ◆ geneigte Dachflächen
- ◆ Hof- und Wegflächen
- ◆ Standard
- ◆ Straßenflächen
- ◆ Standard A 128
- ◆ Standard Niedersachsen
- ◆ Standard Sachsen-Anhalt

	Flache Dachflächen	Geneigte Dachflächen	Hof- und Wegflächen	Straßen- flächen
$V_{\text{Ben}}$	2,0	0,3	0,7	0,5
$V_{\text{Muld}}$	0,0	0,0	1,8	1,8
$\text{Psi}_0$	1,0	1,0	0,0	0,0
$\text{Psi}_e$	1,0	1,0	0,75	0,95
CSB	500*	500*	500*	500*

	Standard	Standard A 128	Standard Niedersachsen	Standard Sachsen-Anhalt
$V_{Ben}$	0,5	0,5	0,25	0,25
$V_{Muld}$	1,8	1,8	1,8	1,8
$Psi_0$	0,3	0,25	0,25	0,30
$Psi_e$	0,85	1	0,85	0,85
CSB	500*	600*	500*	500*

\*Einheit Schmutzabtrag Stoffgröße: kg/(ha\*a)

Beachten Sie, dass der Wert für CSB erst relevant wird, wenn die Stoffgröße für das Projekt generell definiert wird - in der Vorbelegungsdatei ist standardmäßig zunächst keine Stoffgröße definiert.

### Parameter teilbefestigte Flächen

Für teilbefestigte Flächen können folgende Parametersätze genutzt werden:

- ◆ Pflasterflächen mit Fugenanteil < 15%
- ◆ Pflasterflächen mit Fugenanteil  $\geq$  15%
- ◆ Rasengittersteine
- ◆ Gründach, extensiv, bis 10 cm Aufbau
- ◆ Gründach, extensiv, ab 10 cm Aufbau
- ◆ Gründach, intensiv

	Pflasterflächen mit Fugenanteil < 15%	Pflasterflächen mit Fugenanteil $\geq$ 15%	Rasengitter- steine
$V_{Ben}$	0,8	0,8	1,5
$V_{Muld}$	1,5	2,5	3,5
$Psi_0$	0	0	0
$Psi_e$	0,8	0,6	0,5
CSB	0*	0*	0*

	Gründach, extensiv, bis 10 cm Aufbau	Gründach, extensiv, ab 10 cm Aufbau	Gründach, inten- siv
$V_{Ben}$	1,5	1,5	2
$V_{Muld}$	2,5	3,5	4
$Psi_0$	0	0	0
$Psi_e$	0,8	0,7	0,6
CSB	0*	0*	0*

\*Einheit Schmutzabtrag Stoffgröße: kg/(ha\*a)

Beachten Sie, dass der Wert für CSB erst relevant wird, wenn die Stoffgröße für das Projekt generell definiert wird - in der Vorbelegungsdatei ist standardmäßig zunächst keine Stoffgröße definiert.

### Parameter unbefestigte Flächen

Für unbefestigte Flächen können folgende Parametersätze genutzt werden:

- ◆ Laubwald
- ◆ Nadelwald und
- ◆ Rasen

	Laubwald	Nadelwald	Rasen
$V_{Ben}$	8	5	2
$V_{Muld}$	5	4	3
$Psi_0$	0	0	0
$Psi_e$	0,3	0,3	0,3
Bodenart	Löss	Löss	Löss
$Fi_0$	1	1	1
$Fi_e$	0,048	0,048	0,048
$K_{Rück}$	72	72	72
$K_D$	0,432	0,432	0,432
CSB	0*	0*	0*

\*Einheit Schmutzabtrag Stoffgröße: kg/(ha\*a)

Beachten Sie, dass der Wert für CSB erst relevant wird, wenn die Stoffgröße für das Projekt generell definiert wird - in der Vorbelegungsdatei ist standardmäßig zunächst keine Stoffgröße definiert.



### Parameter natürliche Flächen

Für natürliche Flächen steht der Parametersatz "Land und Forst" zur Verfügung:

	Land und Forst
$V_{Ben}$	5
$V_{Muld}$	10
$Psi_0$	0
$Psi_e$	0,3
CSB	0*

\*Einheit Schmutzabtrag Stoffgröße: kg/(ha\*a)

Beachten Sie, dass der Wert für CSB erst relevant wird, wenn die Stoffgröße für das Projekt generell definiert wird - in der Vorbelegungsdatei ist standardmäßig zunächst keine Stoffgröße definiert.

## Anhang E: Das MD-Format zur Speicherung von Massendaten

Massendaten sind z. B.:

- ◆ Niederschlagsdaten
- ◆ Abflussdaten
- ◆ Wasserstandsdaten

Regendaten liegen grundsätzlich als Zeitreihen mit äquidistanten Werten vor. In dem hier beschriebenen Massendatenformat (MD-Format) können jedoch auch Einzelereignisse abgelegt werden. Im Standardfall werden die Regendaten stationsweise abgelegt. Für jede Station enthält die Datei folgende Angaben:

- ◆ Kennsätze (mindestens 2, maximal 11 Sätze bzw. Zeilen)
- ◆ Datensätze (beliebig viele, plus 1 Endesatz)

### Kennsätze

Die Kennsätze enthalten Angaben über:

- ◆ Name der Messstelle/Station
- ◆ Lage der Messstelle (Koordinaten)
- ◆ Art der Daten (Niederschläge, Abflüsse, usw.)
- ◆ Intervallbreite der Daten
- ◆ Dimension der Daten
- ◆ weitere Informationen

Die folgende Tabelle beschreibt das Format für Kennsätze.

Kennsätze			
Record	Format	Beschreibung	Einheit
1	A4	Kurzbeschreibung der Station, darf innerhalb der Datei nicht wechseln. Beim Schreiben verbindlich, nur Großschrift, keine Leerzeichen, keine Umlaute. Beim Lesen optional, auch Nichtangabe (Leerzeichen) zulässig.	
1	1X	Leerzeichen	
1	A8	die Zeichenfolge "_0_0__0" ( _ steht für Leerzeichen)	

Kennsätze			
Record	Format	Beschreibung	Einheit
1	I2	Laufende Nummer der Zeile innerhalb der Kenndaten (1 ≤ laufende Nummer ≤ 11), hier = 1	
1	A5	die Zeichenfolge "_0_0_" ( _ steht für Leerzeichen)	
1	A30	Bezeichnung der Messstelle/Station bzw. des Gebietes <b>Die Angabe ist optional.</b>	
1	F8.3/ F8.4	Rechts-Koordinate bzw. geogr. Länge Rechtswerte des Gauss-Krüger-Systems sind in km im Format F8.3 (auf m genau) erfasst. Längen als geogr. Koordinaten werden im Format F8.4 als gg.mmss angegeben mit gg=Grad, mm= Bogenminute, ss=Bogensekunden <b>Die Angabe ist optional.</b>	km/ gg.mmss
1	1X	frei	
1	F8.3/ F8.4	Hoch-Koordinate bzw. geogr. Breite Hochwerte des Gauss-Krüger-Systems sind in km im Format F8.3 (auf m genau) erfasst. Breiten als geogr. Koordinaten werden im Format F8.4 als gg.mmss angegeben mit gg=Grad, mm= Bogenminute, ss=Bogensekunden <b>Die Angabe ist optional.</b>	km/ gg.mmss
1	1X	frei	
1	A3	Kurzbezeichnung des Koordinatensystems: GKK = Gauss-Krüger GEO = Geographische K. Wenn Hoch- und Rechtskoordinaten angegeben sind, muss auch dieser Wert angegeben werden.	
1	1X	frei	
1	F8.2	Höhe des Geländes an der Messstelle <b>Die Angabe ist optional.</b>	m NN
2	A4	Kurzbeschreibung der Station, darf innerhalb der Datei nicht wechseln. Beim Schreiben verbindlich, nur Großschrift, keine Leerzeichen, keine Umlaute. Beim Lesen optional, auch Nichtangabe (Leerzeichen) zulässig.	
2	1X	Leerzeichen	
2	A8	die Zeichenfolge "_0_0__0_" ( _ steht für Leerzeichen)	
2	I2	Laufende Nummer der Zeile innerhalb der Kenndaten (1 ≤ laufende Nummer ≤ 11), hier = 2	
2	A5	die Zeichenfolge "_0_0_" ( _ steht für Leerzeichen)	
2	I5	Intervallbreite der Daten (IB)	min

Kennsätze			
Record	Format	Beschreibung	Einheit
2	I5	Dimension der Daten als Zehnerpotenz. Die Daten sind ganzzahlig abgelegt. Dieser Wert gibt an, mit welcher Zehnerpotenz die Daten multipliziert werden müssen, damit dimensionsechte Werte entstehen. Niederschläge werden standardmäßig gespeichert in - 1/100 mm bei IB = 1 .. 15 min (--> IDIM=-2) - 1/10 mm bei IB > 15 min (--> IDIM = -1)	
2	I2 I2 I4 I2 I2 I2	Datum/Uhrzeit des ersten Tagessatzes Tag Monat Jahr Stunde Minute Sekunde Uhrzeitangaben alle = 0, aber bei Tageswerten Beginn/ Ende des Messtages <b>Die Angabe ist optional.</b>	
2	I2 I2 I4 I2 I2 I2	Datum/Uhrzeit des letzten Tagessatzes Tag Monat Jahr Stunde Minute Sekunde Uhrzeitangaben alle = 0 <b>Die Angabe ist optional.</b>	
2	I5	Anzahl der folgenden Kommentarsätze (Werte 0 bis 9 sind möglich)	
2	A5	Angabe der Datenart, verbindlich beim Schreiben: "N" = Niederschläge "Q" = Abflüsse "WST" = Wasserstände <b>Die Angabe ist optional.</b>	
2	A10	Dimension der Daten (beliebiger Text), z. B. "mm", "l/sec", "mm/IB" = verbindlich beim Schreiben für Niederschläge <b>Die Angabe ist optional.</b>	
Weitere Zeilen (Kennsätze) 3 bis max. 11 sind nur dann zulässig, wenn die "Anzahl der folgenden Kommentarsätze" (siehe oben) entsprechend auf 1 bis max. 9 gesetzt ist. Falls vorhanden, entsprechen alle weiteren Kommentarzeilen der folgenden Beschreibung.			

Kennsätze			
Record	Format	Beschreibung	Einheit
3 ... 11	A4	Kurzbeschreibung der Station, darf innerhalb der Datei nicht wechseln. Beim Schreiben verbindlich, nur Großschrift, keine Leerzeichen, keine Umlaute. Beim Lesen optional, auch Nichtangabe (Leerzeichen) zulässig.	
3 ...11	1X	Leerzeichen	
3 ...11	A8	die Zeichenfolge "_0_0__0" ( _ steht für Leerzeichen)	
3 ...11	I2	Laufende Nummer der Zeile innerhalb der Kenndaten (1 ≤ laufende Nummer ≤ 11), hier 3 ... 11	
3 ...11	A5	die Zeichenfolge "_0_0_" ( _ steht für Leerzeichen)	
3 ...11	A60	Kommentar	

## Datensätze (Intervall- und Tageswerte)

Die Datensätze enthalten jeweils Sortier- und Identifikations-Informationen und Daten. Die Anzahl der Datenwerte pro Satz hängt ab von der Intervallbreite der Daten (IB im Kennsatz).

Sortier- und Identifikations-Informationen belegen die ersten 20 Zeichen jedes Satzes (Zeile). Im Folgenden wird zunächst das Format für Intervallwerte, danach das Format für Tageswerte beschrieben.

Format für Intervallwerte (IB = 1 .. 720)			
Record	Format	Beschreibung	Einheit
1	A4	Kurzbeschreibung der Station, darf innerhalb der Datei nicht wechseln. Beim Schreiben verbindlich, nur Großschrift, keine Leerzeichen, keine Umlaute. Beim Lesen optional, auch Nichtangabe (Leerzeichen) zulässig.	
1	1X	Leerzeichen	
1	I2	Datum/Uhrzeit des 1. abgelegten Wertes	
	I2	Tag	
	I4	Monat	
	I2	Jahr	
	I2	Stunde	
	I2	Minute	
	I2	Sekunde	

Format für Intervallwerte (IB = 1 .. 720)			
Record	Format	Beschreibung	Einheit
1	A1	<p>Kennzeichnung der Zeile:</p> <p>_ = normale Datenzeile ( _ = Leerzeichen)</p> <p>S = wie normale Datenzeile, aber mit Ausfällen (-9999)</p> <p>A = Ausfallsatz (es folgen keine Daten)</p> <p>N = Nullsatz (es folgen keine Daten)</p> <p>E = Endesatz (Datum = 0 0 9999, Uhrzeit = 0 0 0, es folgen keine Daten)</p> <p>M = Mittelwertsatz, es folgt ein Wert, es ist nur eine Zeile pro Tag vorhanden, die Uhrzeitangabe ist immer 00:00:00 Uhr (nicht für Niederschläge)</p> <p>K = Konstantzeile, es folgt ein Wert, der für alle Werte der Zeile gilt (Datenreduzierung)</p> <p>Ganze Ausfalltage sind durch eine Zeile mit KENNZ = A angegeben. Sind <b>Ausfälle und Daten</b> innerhalb eines Tages vorhanden, so sind die Ausfälle durch -9999 gekennzeichnet, ggf. als Konstantzeilen.</p>	
1	12 * I5	Daten pro Intervall, die Anzahl in der Zeile hängt ab von der Intervallbreite und der Kennzeichnung der Zeile	

Format für Tageswerte (IB = 1440)			
Record	Format	Beschreibung	Einheit
<p>Die Tageswerte sind monatsweise abgelegt, für einen Monat sind immer 3 Zeilen vorhanden. In den ersten beiden Zeilen sind jeweils 10 Werte (für den 1. bis 10. und den 11. bis 20. Tag des Monats abgelegt, in der dritten Zeile der Rest ab dem 21., also 8, 9, 10 oder 11 Werte.</p>			
1	A4	<p>Kurzbeschreibung der Station, darf innerhalb der Datei nicht wechseln.</p> <p>Beim Schreiben verbindlich, nur Großschrift, keine Leerzeichen, keine Umlaute.</p> <p>Beim Lesen optional, auch Nichtangabe (Leerzeichen) zulässig.</p>	
1	1X	Leerzeichen	
1	I2 I2 I4 I2 I2 I2	<p>Datum/Uhrzeit des 1. Tages der Zeile (1,11 oder 21)</p> <p>Tag</p> <p>Monat</p> <p>Jahr</p> <p>Stunde immer = 0</p> <p>Minute immer = 0</p> <p>Sekunde immer = 0</p> <p>Anfangs-/Endzeit der Tageswerte steht im Kennsatz.</p>	

Format für Tageswerte (IB = 1440)			
Record	Format	Beschreibung	Einheit
1	A1	Kennzeichnung der Zeile: _ = normale Datenzeile ( _ = Leerzeichen) S = wie normale Datenzeile, aber mit Ausfällen (-9999) E = Endesatz (Datum = 0 0 9999, Uhrzeit = 0 0 0, es folgen keine Daten)	
1	11 * I5	Daten pro Tag, Anzahl = 10 in der 1. und 2. Zeile bzw. 8, 9, 10 oder 11 in der 3. Zeile d. Monats.	

## Struktur der Datenzeilen für einen Tag

Je nach Intervallbreite können pro Tag zwischen 1 und 120 Zeilen vorhanden sein. Da bei den Niederschlägen innerhalb eines Tages nur die Sätze gespeichert sind, die mindestens einen Wert  $\neq 0$  enthalten, stellen die folgenden Angaben die Maximalwerte dar, die aktuelle Zahl der Zeilen pro Tag kann geringer sein. Alle nicht gespeicherten Zeilen eines Tages haben automatisch nur Werte = 0.

Die Anfangszeit der einzelnen Zeilen ist nicht beliebig, sondern ergibt sich immer aus der Randbedingung, dass die erste Zeile eines Tages immer um 00:00 Uhr beginnt. Bei einer Intervallbreite von IB = 5 min kann die Anfangszeit einer Zeile also nur auf einer vollen Stunde liegen, bei IB = 1 min immer nur auf 00, 12, 24, 36 usw. Minuten.

In der folgenden Tabelle ist i die logische Nummer der Zeile innerhalb eines Tages (i = 0 .. n-1).

Struktur der Datenzeilen für Tageswerte					
IB (min)	Werte pro Zeile	Dauer pro Zeile	Anzahl der Zeilen		Anfangszeit der Zeilen
			pro Std	pro Tag	
1	12	12 min	5	120	00:00+i*12'
2	10	20 min	3	72	00:00+i*20'
3	10	30 min	2	48	00:00+i*30'
5	12	60 min	1	24	00:00+i*1 h
10	12	2 h		12	00:00+i*2 h
15	12	3 h		8	00:00+i*3 h
20	12	4 h		6	00:00+i*4 h



Struktur der Datenzeilen für Tageswerte					
IB (min)	Werte pro Zeile	Dauer pro Zeile	Anzahl der Zeilen		Anfangszeit der Zeilen
			pro Std	pro Tag	
30	12	6 h		4	00:00+i*6 h
60	12	12 h		2	00:00+i*12 h
120	12	24 h		1	00:00
180	8	24 h		1	00:00
240	6	24 h		1	00:00
360	4	24 h		1	00:00
720	2	24 h		1	00:00
<b>Sonderfall Tageswerte:</b>					
1440	10 (11)	10 (11)d	3 Zeilen pro Monat		00:00

Bei Tageswerten sind die Stunden-, Minuten- und Sekundenangaben jedes Satzes immer gleich Null. Die tägliche Ablesezeit bzw. die Grenze zwischen den einzelnen Werten ist im Kennsatz unter IDATA bei Stunde, Minute und Sekunde anzugeben.

## Literaturverzeichnis

ATV [1986]:

Die Berechnung des Oberflächenabflusses in der Kanalnetzberechnung -  
Teil I: Abflußbildung. Arbeitsbericht der ATV-AG 1.2.6 "Hydrologie der Stadt-  
entwässerung", Korrespondenz Abwasser, 33, Heft 2

ATV [1987]:

Die Berechnung des Oberflächenabflusses in der Kanalnetzberechnung -  
Teil II: Abflußkonzentration. Arbeitsbericht der ATV-AG 1.2.6 "Hydrologie  
der Stadtentwässerung", Korrespondenz Abwasser, 34, Heft 3

ATV [1989]:

Arbeitsblatt A 201 der Abwassertechnischen Vereinigung, Grundsätze, Bau  
und Betrieb von Abwasserteichen für kommunales Abwasser, Gesellschaft  
zur Förderung der Abwassertechnik, St. Augustin, 2. Aufl., Oktober 1989

ATV [1990]:

Arbeitsblatt A 138 der Abwassertechnischen Vereinigung, Bau und Bemessung  
von Anlagen zur dezentralen Versickerung von nicht schädlich verun-  
reinigtem Niederschlagswasser, Gesellschaft zur Förderung der  
Abwassertechnik, Hennef

ATV [1992]:

Arbeitsblatt A 128 der Abwassertechnischen Vereinigung, Richtlinien für die  
Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischwas-  
serkanälen, Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik, St. Augustin,  
April 1992

ATV [1995]:

Hinweise zur Versickerung von Niederschlagsabflüssen, Arbeitsbericht der  
ATV-AG 1.4.1, Korrespondenz Abwasser, 42, Heft 5, S. 797-806

ATV [1997]:

ATV-Handbuch Biologische und weitergehende Abwasserreinigung, 4.  
Aufl., Ernst & Sohn, Berlin 1997

ATV [2001], a):

ATV-DVWK-Regelwerk, Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 117 NEU, Bemessung von Regenrückhalteräumen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Februar 2001

ATV [2001], b):

ATV-DVWK-Regelwerk, Merkblatt ATV-DVWK-M 177, Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen - Erläuterungen und Beispiele, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Juni 2001

BORCHERDING, H. [1996]:

Neue Verfahren und Geräte zur Ausrüstung von Regenüberlaufbecken. Abwasser und Abfallwirtschaft. Umweltschutz vor neuen Aufgaben. ATV-Bundestagung vom 14. - 16. Oktober 1996 in Leipzig. ATV-Schriftenreihe 4, Hennef, 1996

BROMBACH, H. und WEIß, G. [1997]:

Wirbelabscheideranlagen: Hinweise zu Entwurf und Bemessung. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Handbuch Wasser 4, Bd. 5

BRUNNER, P. G. [1991]:

Bodenfiltersysteme für die weitergehende Mischwasserbehandlung. Anforderungen an die Regenwasserbehandlung bei Mischwasserkanalisation. Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft, Universität - Gesamthochschule Kassel, Bd. 7

BRUNNER, P. G. [1996]:

Weitergehende Regenwasserbehandlung durch Bodenfilter. Abwasser und Abfallwirtschaft. Umweltschutz vor neuen Aufgaben. ATV-Bundestagung vom 14. - 16. Oktober 1996 in Leipzig. ATV-Schriftenreihe 4, Hennef, 1996

DVWK [1984]:

Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluß-Modellen in kleinen Einzugsgebieten, Teil II: Synthese. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK), Regeln zur Wasserwirtschaft, Heft 113. Verlag Paul Parey, Hamburg 1984

DWA [2005]:

Merkblatt M 178 Empfehlungen für Planung, Bau und Betrieb von Retentionsbodenfiltern zur weitergehenden Regenwasserbehandlung im Misch- und Trennsystem, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Oktober 2005

EULER, G. [1983]:

Ein hydrologisches Näherungsverfahren für die Berechnung des Wellenablaufs in Kreisrohren. Wasser und Boden, Heft 2

EULER, G. et al. [1989]:

Dokumentation SMUSI, Version 3.0. Institut für Wasserbau der TH Darmstadt, Fachgebiet Ingenieurhydrologie und Hydraulik

FAHRNER, H. und GRESA, L. [1994]:

Weitergehende Regenwasserbehandlung mit Siebrechen an Entlastungsbauwerken der Mischkanalisation. Korrespondenz Abwasser, 41, Heft 5, S. 714-726

FUCHS, L.; SCHEFFER, C.; VERWORN, H.-R. [1994]:

Mikrocomputer in der Stadtentwässerung, Modellbeschreibung HYSTEM-EXTRAN Vers. 5.1, 1994

GEIGER, W. F. und HÜBNER, M. [1994]:

Hydrozyklone zur Leistungssteigerung von Regenbecken. Abschlußbericht des Teilprojektes R02 des BMFT-Verbundprojektes: Niederschlagsbedingte Schmutzbelastung der Gewässer, Phase I, Heft 10, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der Universität Karlsruhe (Hrsg.)

GEIGER, W. F. und HÜBNER, M. [1996]:

Wertfreie Beurteilung der Reinigungsleistung von Anlagen zur Regenwasserbehandlung. Abwasser und Abfallwirtschaft. Umweltschutz vor neuen Aufgaben. ATV-Bundestagung vom 14. - 16. Oktober 1996 in Leipzig. ATV-Schriftenreihe 4, Hennef, 1996

GROTEHUSMANN, J. [1995]:

Versickerung von Niederschlagsabflüssen unter Berücksichtigung des Grundwasserschutzes - Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz Nr. 12, SuG-Verlagsgesellschaft, Hannover

HARMS, R. W. und KENTER, G. [1991]:

Mischwasserentlastungen - Dokumentation des Modells KOSIM Vers. III.1. Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie, Hannover

HARMS, R. W. und VERWORN, H.-R. [1984]:

HYSTEM - ein hydrologisches Stadtentwässerungsmodell, Teil I: Modellbeschreibung. Korrespondenz Abwasser, 31, Heft 2

HÜBNER, M. und GEIGER, W. F. [1996]:

Wertfreie Beurteilung der Reinigungsleistung von Anlagen zur Regenwasserbehandlung. Abwasser und Abfallwirtschaft. Umweltschutz vor neuen Aufgaben. ATV-Bundestagung vom 14. - 16. Oktober 1996 in Leipzig. ATV-Schriftenreihe 4, Hennef, 1996

HUHN, V. et al. [1996]:

Leitfaden zur umweltverträglichen Regenwasserentsorgung - Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz Nr. 35, SuG-Verlagsgesellschaft, Hannover

HUHN, V. und SWIRIDJUK, Th. [1994]:

Modellierung des Abflußverhaltens begrünter Dächer - Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz Nr. 28, SuG-Verlagsgesellschaft, Hannover

HUHN, V. und WEIDELHOFER, D. [1995]:

Bemessung von Regenrückhaltebecken im Lastfall- und Nachweisverfahren - Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz Nr. 30, SuG-Verlagsgesellschaft, Hannover

KESER, J. [1980]:

Beitrag zur Quantifizierung der hydrologischen Parameter für Siedlungsgebiete - Erfahrungsbericht und Ergebnisse hydrometrischer Untersuchungen im Stadtgebiet von Hildesheim. Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Univ. Hannover, Heft 47

KREJCI, V. [1991]:

Sieb- und Rechenanlagen für die Behandlung von Regenüberläufen aus Mischkanalisation in der Schweiz. Anforderungen an die Regenwasserbehandlung bei Mischwasserkanalisation. Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft, Universität - Gesamthochschule Kassel, Bd. 7

MEHLER, R. [1996]:

Ermittlung von regionalspezifischen hessischen Grundlagen zur Verbesserung der Bemessung von Regenwasserbehandlungsanlagen. Forschungsbericht 438/96, TH Darmstadt, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

MEHLER, R. [1997]:

Berechnung von Regenentlastungsanlagen - Berücksichtigung weitergehender Mischwasserbehandlungsmaßnahmen. Wasser-Abwasser-Praxis, 6. Jg., Nr. 3, S. 20-25

MEIßNER, E. [1996]:

Fragen und Beispiele zum A 128 und dem vereinfachten Aufteilungsverfahren. ATV-Seminar "Aktuelles zur Regenwasserbehandlung", 14./15.02.1996, Bremen

NEUMANN, W. [1976]:

Der Oberflächenabfluß in städtischen Einzugsgebieten - ein Beitrag zur Kanalnetzberechnung. Institut für Wassergütewirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, TU München, Bericht Nr. 11

OESTREICH, I. [1999]:

Langzeitsimulation von Schmutzakkumulations- und Schmutzabtragsprozessen zum Nachweis von Mischwasserbehandlungen. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Landwirtschaftlichen Wasserbau, Univ. Hannover, Diplomarbeit

PAULSEN, O. [1987]:

Kontinuierliche Simulation von Abflüssen und Stofffrachten in der Trennentwässerung, Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Univ. Hannover, Heft 62

PECHER, R. [1986]:

Kosten der Regenwasserbehandlung in mischkanalisierten Entwässerungsgebieten und Auswirkungen auf den Gewässerschutz. gwf - Wasser - Abwasser, 127. Jg., Nr. 8, S. 374 ff.

RUDOLPH, K.-U. und SIEKER, F. (Hg.) [1993]:

Regenwasserbewirtschaftung statt Regenwasserentsorgung, Vorträge eines Workshops am 26.8.93 in Schönower - Sonderband der Schriftenreihe für Umwelttechnik und Umweltmanagement der Privaten Universität Witten/Herdecke GmbH

SCHNEIDER, Th.; SCHOLZ, K. [1998]:

Kosteneinsparungen in der kommunalen Abwasserentsorgung durch Schmutzfrachtberechnung und Gesamtemissionsbetrachtungen am Beispiel des AZV Oberer Neckar, Korrespondenz Abwasser, 45, Heft 7

SCHOLZ, K. [1992]:

Stochastische Formulierung hydrologischer Speichermodelle - Zeitschrift für Stadtentwässerung und Gewässerschutz, Heft 20, S. 3-24, SuG-Verlagsgesellschaft, Hannover

SCHOLZ, K. [1995]:

Stochastische Simulation urbanhydrologischer Prozesse - Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz Nr. 10, SuG-Verlagsgesellschaft, Hannover

SCHOLZ, K. [1997], a):

Ein Vorschlag zur Berücksichtigung von Flächenabkoppelungen bei der Dimensionierung von Mischwasserentlastungsanlagen, GWF Wasser Abwasser Nr. 10, Oldenbourg-Verlag, München 1997

SCHOLZ, K. [1997], b):

Das Langzeitsimulationsmodell Kosim für Schmutzfrachtberechnung und Regenwasserbewirtschaftung, Wasser Luft Boden Nr. 6, Vereinigte Fachverlage, Mainz 1997

SCHOLZ, K. [1997], c):

Rekursive Abflußkonzentrationsberechnung - Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz Nr. 38, SuG-Verlagsgesellschaft, Hannover

SCHWEER, F. und WEYAND, M. [1994]:

Dezentrale Mischwasserbehandlung - Fällung / Flockung / Filtration. Schlußbericht zum BMFT-Forschungsvorhaben 02 WA 9007/8. Institut für Siedlungswasserwirtschaft, RWTH Aachen

SIEKER, F. [1989]:

Sammelwerk "Hydrologie der Stadtentwässerung", in: Zeitschrift für Stadtentwässerung und Gewässerschutz, SuG-Verlagsgesellschaft, Hannover

SIEKER, F. ; KHELIL, A. ; SEMKE, M. [1981]:

Quantifizierung der Unsicherheiten bei der Abflußberechnung aus städtischen Entwässerungssystemen, Schlußbericht zum DFG-Forschungsvorhaben DFG SI 242/7-2, Institut für Wasserwirtschaft, Univ. Hannover, 1991

STRATHMANN, G.; SCHOLZ, K. [1999]:

Die Regenwassernutzung, Ein Teil der Regenwasserbewirtschaftung, Wasser Abwasser Praxis 6/99, Nr 12, Vieweg Verlagsges., Wiesbaden 1999

VERWORN, H.-R.; KENTER, G. [1993]:

Abflußbildungsansätze für die Niederschlag-Abfluß-Modellierung, Zeitschrift für Stadtentwässerung und Gewässerschutz, Heft 24, S. 3-50, SuG-Verlagsgesellschaft, Hannover

ZECH, H. [1994]:

Erfahrungen mit dem Bodenfilterbecken Waldangelloch. Zeitschrift für Stadtentwässerung und Gewässerschutz, Heft 27, S. 3-9, SuG-Verlagsgesellschaft, Hannover