

# **Von intermittierender zu kontinuierlicher Wasserverteilung in Entwicklungsländern**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für

Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften  
des Karlsruher Instituts für Technologie

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Philipp Klingel  
aus Bietigheim-Bissingen

Tag der mündlichen Prüfung: 23. Juni 2010

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Franz Nestmann  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Gerd Förch

Karlsruhe 2010



# Kurzfassung

Das Leitungsnetz eines Trinkwasserverteilungssystems ist entsprechend seiner technischen Konzeption kontinuierlich unter Druck mit Wasser vollgefüllt zu betreiben. In Entwicklungsländern ist der intermittierende Betrieb von Wasserverteilungssystemen jedoch gängige Praxis. Die Systeme wurden für eine kontinuierliche Betriebsweise konzipiert und werden jetzt auf Grund zahlreicher, komplex verknüpfter Faktoren intermittierend betrieben. Das Verteilungsnetz oder verschiedene Bereiche des Netzes werden dabei für eine begrenzte Zeit mit Wasser beschickt. Die Verbraucher speichern Wasser für die Zeiten ohne Rohrnetzabgabe in privaten Behältern zwischen. Das Leitungsnetz wird mitunter vollständig entleert und im nächsten Versorgungsintervall wieder gefüllt.

Mit diesem unsachgemäßen Betrieb sind negative Auswirkungen verbunden, die letztlich die Erfüllung der grundlegenden Aufgaben einer Wasserverteilung, nämlich die Bereitstellung von ausreichend Wasser mit einwandfreier Qualität an alle angeschlossenen Verbraucher, verhindern. Demzufolge ist die kontinuierliche Betriebsweise entsprechend konzipierter Systeme notwendige Voraussetzung für eine ökonomisch, ökologisch und versorgungstechnisch nachhaltige Wasserverteilung.

Gegenstand dieser Arbeit ist die Entwicklung von Konzepten und Werkzeugen zur Verbesserung bestehender, ursprünglich für eine kontinuierliche Versorgung ausgelegter und jetzt intermittierend betriebener Wasserverteilungssysteme in Entwicklungsländern. Zunächst werden dazu charakteristische Mängel der Wasserverteilung in Entwicklungsländern analysiert. Die Mängelanalyse stellt die notwendige Grundlage der Entwicklung möglicher Lösungsansätze dar.

Als Lösungsansatz wird ein Konzept zur Überführung intermittierend betriebener Wasserverteilungssysteme hin zu einer kontinuierlichen Betriebsweise beschrieben. Das Konzept sieht eine Umstrukturierung des Verteilungsnetzes sowie die sukzessive Einführung einer kontinuierlichen Betriebsweise in diskreten Sektoren vor. Dabei werden sowohl Aspekte der Planung und Umsetzung als auch ökonomische, ökologische und soziale Randbedingungen berücksichtigt.

Für die Planung und Umsetzung des Konzepts wird in der Arbeit die Entwicklung eines integrierten Instruments für das Datenmanagement, die Systemanalyse und die Netzplanung beschrieben. Auf das Instrument abgestimmte Arbeitsprozesse zur erforderlichen Datenerhebung gewährleisten die nachhaltige Implementierung und Nutzung im gegebenen Kontext.

Die Ergebnisse der Arbeit wurden größtenteils im Rahmen eines Projektes der deutsch-algerischen technischen Zusammenarbeit in Béni Abbès, eine Oasenstadt in der nordwestlichen Sahara Algeriens, entwickelt und umgesetzt. In der Arbeit wird daher regelmäßig auf das Fallbeispiel Béni Abbès Bezug genommen.



# Abstract

The piping network of a water distribution system, according to its technical conception, is to be operated filled with water and under continuous pressure. However, in developing countries an intermittent operation of water distribution systems is in practice more common. The networks were designed for a continuous operation and are now operated intermittently due to several complex interlinked reasons. Here, the distribution network or different segments of it are fed with water for a limited period of time. The consumers store water in private tanks for the time without water supply from the network. The piping network is occasionally emptied completely before it is refilled during the next supply period.

Linked to this inappropriate operation are negative effects, which in the end hinder the fulfilment of the primary task of the water distribution system, namely to supply all connected consumers with sufficient water with impeccable quality. Therefore, for networks designed respectively, the continuous operation is a required precondition for a sustainable water distribution with respect to economical, ecological and supply organisational aspects.

Subject of this work is the development of concepts and tools to improve existing, intermittently operated water distribution systems in developing countries, which were originally designed for continuous operation. At first the characteristic deficiencies of water distribution in developing countries are analysed. The analysis serves as a basis for the development of possible solutions.

As one approach to a solution a concept of converting an intermittently operated water distribution system to a continuously operated one is described. This concept provides a restructuring of the distribution network as well as the successive implementation of a continuous operation in discrete segments. Here, both planning and implementation aspects as well as economical, ecological and social boundary conditions are taken into consideration.

For planning and implementing the concept, the development of an integrated tool for data management, system analysis and network planning is described in the work. Working processes for the required data acquisition, which are adjusted to the tool, assure the sustainable implementation and usage in the given context.

The results of the work are partly developed and implemented within the framework of an German-Algerian technical cooperation project in Béni Abbès, an oasis town in the northwestern Sahara of Algeria. The work therefore often refers to the case study of Béni Abbès.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung . . . . .	1
1.2	Fallbeispiel Béni Abbès . . . . .	3
1.3	Zielsetzung und Ansatz . . . . .	4
1.4	Aufbau der Arbeit . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Wasserverteilung</b>	<b>7</b>
2.1	Überblick . . . . .	7
2.2	Zentrale Wasserversorgungssysteme . . . . .	7
2.2.1	Aufgaben . . . . .	7
2.2.2	Bestandteile der Wasserversorgung . . . . .	7
2.3	Wasserverteilungssysteme . . . . .	8
2.3.1	Bestandteile von Wasserverteilungssystemen . . . . .	8
2.3.2	Rohrleitungsnetze . . . . .	9
2.3.3	Speicherbehälter . . . . .	11
2.3.4	Förderanlagen . . . . .	12
2.3.5	Armaturen . . . . .	14
2.4	Analyse und Planung von Wasserverteilungssystemen . . . . .	15
2.4.1	Systemkonzepte . . . . .	15
2.4.2	Bemessung des Rohrleitungsnetzes . . . . .	16
2.4.3	Wasserbedarf . . . . .	17
2.4.4	Wasserverluste . . . . .	21
2.5	Technischer Betrieb von Wasserverteilungssystemen . . . . .	25
2.5.1	Aufgaben . . . . .	25
2.5.2	Betriebsweise . . . . .	26
2.5.3	Instandhaltung . . . . .	26
2.5.4	Wasserverlustreduktion . . . . .	30
2.5.5	Datenhaltung in der Wasserverteilung . . . . .	34
<b>3</b>	<b>Grundlagen der Modellierung von Wasserverteilungssystemen</b>	<b>41</b>
3.1	Überblick . . . . .	41
3.2	Aufgaben hydraulischer Modelle . . . . .	41
3.3	Grundlagen der Graphentheorie . . . . .	42
3.3.1	Terminologie und Definitionen . . . . .	42
3.3.2	Darstellung des Graphen: . . . . .	44

3.4	Modellierungskonzept . . . . .	45
3.4.1	Abbildung des Wasserverteilungssystems als Digraph mit Attributen . . . . .	45
3.4.2	Datenstruktur und Datenspeicherung . . . . .	46
3.4.3	Modellierung des Leitungsnetzes . . . . .	48
3.4.4	Modellierung der Wassereinspeisungen und Wasserentnahmen . . . . .	49
3.4.5	Modellierung der Kontrollarmaturen . . . . .	50
3.4.6	Modellierung der Pumpen . . . . .	53
3.4.7	Mathematische Abbildung . . . . .	54
3.5	Modellparameter . . . . .	55
3.5.1	Einteilung der Modellparameter . . . . .	55
3.5.2	Kalibrierung des Modells . . . . .	55
3.5.3	Kalibrierungsverfahren . . . . .	56
3.6	Modellierungsprozess . . . . .	57
3.7	Hydraulische Rohrnetzberechnung . . . . .	58
3.7.1	Terminologie und Definitionen . . . . .	58
3.7.2	Grundlagen der Rohrhydraulik . . . . .	59
3.7.3	Grundlagen der Rohrnetzhydraulik . . . . .	63
3.7.4	Stationäre Rohrnetzberechnung . . . . .	65
3.7.5	Zeitabhängige Rohrnetzberechnung . . . . .	67
3.7.6	Rohrnetzrechnungsprogramme . . . . .	68
<b>4</b>	<b>Für Entwicklungsländer charakteristische Mängel der Wasserverteilung</b>	<b>69</b>
4.1	Zielsetzung und Überblick . . . . .	69
4.2	Die Wasserverteilung des Fallbeispiels Béni Abbès . . . . .	70
4.2.1	Geographische Einordnung . . . . .	70
4.2.2	Demographie . . . . .	72
4.2.3	Wasserdargebot und Wasserqualität . . . . .	72
4.2.4	Wasserverteilungssystem . . . . .	73
4.2.5	Zuständigkeiten . . . . .	76
4.2.6	Technischer Betrieb und Systemplanung . . . . .	76
4.3	Mängel in der Wasserverteilung des Fallbeispiels Béni Abbès . . . . .	78
4.3.1	Überblick . . . . .	78
4.3.2	Wasserressourcen . . . . .	78
4.3.3	Systemkonzept . . . . .	79
4.3.4	Technischer Betrieb . . . . .	79
4.3.5	Planung . . . . .	82
4.3.6	Infrastruktur . . . . .	83
4.3.7	Zuständigkeiten und Organisation . . . . .	85
4.3.8	Auswirkungen für die Verbraucher . . . . .	85
4.4	Mängel und ihre Zusammenhänge . . . . .	86
4.4.1	Definition des Begriffs Mangel . . . . .	86
4.4.2	Ursache und Wirkung . . . . .	86
4.4.3	Zuordnung . . . . .	87

4.4.4	Darstellungsansatz . . . . .	87
4.5	Relevante Mängel . . . . .	88
4.5.1	Abgrenzung . . . . .	88
4.5.2	Mängel in der Datenhaltung . . . . .	89
4.5.3	Mängel im Systemkonzept und der Netzplanung . . . . .	91
4.5.4	Mängel in der Betriebsweise und Versorgung . . . . .	95
<b>5</b>	<b>Einführung einer kontinuierlichen Betriebsweise</b>	<b>99</b>
5.1	Zielsetzung und Überblick . . . . .	99
5.2	Ansatz . . . . .	101
5.2.1	Aufgabenstellung . . . . .	101
5.2.2	Theoretische Machbarkeit . . . . .	101
5.2.3	Bekannt Ansätze . . . . .	106
5.2.4	Konzept zur Einführung einer kontinuierlichen Betriebsweise . . . . .	107
5.3	Datenhaltung und hydraulische Modellierung . . . . .	110
5.3.1	Werkzeuge . . . . .	110
5.3.2	Prozessorientierte Erhebung der Systemdaten . . . . .	110
5.3.3	Aufbau der Datenhaltung in Béni Abbès . . . . .	111
5.4	Pilotversuche . . . . .	112
5.4.1	Zweck der Pilotversuche . . . . .	112
5.4.2	Charakteristik des Pilotsektors . . . . .	112
5.4.3	Pilotversuche in Béni Abbès . . . . .	113
5.5	Planung der Umstrukturierung . . . . .	115
5.5.1	Systemkonzept . . . . .	115
5.5.2	Ausführung des Systemkonzepts . . . . .	116
5.5.3	Vorteile des Systemkonzepts . . . . .	120
5.5.4	Planung der Umstrukturierung in Béni Abbès . . . . .	121
5.6	Sensibilisierung und Partizipation . . . . .	127
5.6.1	Notwendigkeit . . . . .	127
5.6.2	Sensibilisierung und Partizipation in Béni Abbès . . . . .	128
5.7	Umsetzung der Umstrukturierung . . . . .	129
5.7.1	Ganzheitliche und prozessorientierte Umsetzung . . . . .	129
5.7.2	Umsetzung der Umstrukturierung in Béni Abbès . . . . .	129
5.8	Umstellung der Betriebsweise . . . . .	130
5.8.1	Sukzessive Vorgehensweise . . . . .	130
5.8.2	Monitoring und Überwachung . . . . .	131
5.8.3	Instandhaltung und Wasserverlustreduktion . . . . .	132
5.8.4	Anpassung der Kapazitäten des Versorgungsnetzes . . . . .	133
5.9	Finanzielle Aspekte der kontinuierlichen Betriebsweise . . . . .	134
<b>6</b>	<b>Integriertes Datenhaltungs-, Analyse- und Planungsinstrument</b>	<b>137</b>
6.1	Zielsetzung und Überblick . . . . .	137
6.2	Programmarchitektur . . . . .	138

6.3	Das Geoinformationssystem ArcGIS . . . . .	140
6.3.1	Die Produktfamilie ArcGIS . . . . .	140
6.3.2	Das Objektmodell <i>ArcObjects</i> . . . . .	141
6.3.3	Datenkonzept . . . . .	142
6.3.4	Das Datenbankformat <i>geodatabase</i> . . . . .	145
6.3.5	<i>ArcGIS Desktop</i> und die Applikationen <i>ArcCatalog</i> und <i>ArcMap</i>	145
6.4	Das hydraulische Modell KANET . . . . .	148
6.4.1	Überblick . . . . .	148
6.4.2	Umsetzung des Modellierungskonzepts und der Daten- bankstruktur . . . . .	149
6.4.3	Graphenmodell . . . . .	152
6.4.4	Berechnung des hydraulischen Gleichgewichts . . . . .	153
6.4.5	Berechnung kostenoptimaler Netze . . . . .	155
6.5	Integration von ArcGIS und KANET . . . . .	156
6.5.1	Überblick . . . . .	156
6.5.2	Erweiterte Datenstruktur und Datenspeicherung . . . . .	156
6.5.3	Management der Systemdaten . . . . .	158
6.6	Integration des hydraulischen Modells EPANET . . . . .	158
6.7	Werkzeuge zur Datenaufbereitung . . . . .	160
6.7.1	Überblick . . . . .	160
6.7.2	Import von Punktmengen als Knoten . . . . .	160
6.7.3	Erstellung des Netzgraphen . . . . .	160
6.7.4	Zuordnung von Wasserbedarfswerten . . . . .	162
6.8	Funktionalität und Anwendung . . . . .	167
6.8.1	Benutzeroberfläche . . . . .	167
6.8.2	Werkzeuge . . . . .	168
6.8.3	Datenhaltung im Netzkataster . . . . .	168
6.8.4	Datenaufbereitung und Modellierung . . . . .	170
6.8.5	Analyse und Planung . . . . .	171
6.8.6	Anwendung in Béni Abbès und Übertragbarkeit . . . . .	172
<b>7</b>	<b>Standardisierte Arbeitsprozesse zur Datenhaltung und Modellierung</b>	<b>175</b>
7.1	Zielsetzung und Überblick . . . . .	175
7.2	Aufbau und Aktualisierung einer Systemdatenbasis . . . . .	176
7.2.1	Konzept . . . . .	176
7.2.2	Verantwortlichkeiten . . . . .	177
7.2.3	Prozessablauf zum Aufbau der Systemdatenbasis . . . . .	178
7.2.4	Prozessablauf zur Aktualisierung der Systemdatenbasis . . . . .	185
7.3	Aufbau und Aktualisierung eines Schadensregisters . . . . .	185
7.3.1	Konzept . . . . .	185
7.3.2	Verantwortlichkeiten . . . . .	186
7.3.3	Prozessablauf . . . . .	187
7.3.4	Schadenstatistik . . . . .	192

7.4	Umsetzung in Béni Abbès . . . . .	194
7.4.1	Verantwortlichkeiten . . . . .	194
7.4.2	Aufbau und Aktualisierung einer Datenbasis . . . . .	195
7.4.3	Aufbau und Aktualisierung eines Schadensregisters . . . . .	195
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>197</b>
8.1	Zusammenfassung . . . . .	197
8.2	Ausblick . . . . .	199



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Wasserverteilungssystem mit Systemelementen . . . . .	9
2.2	Verästeltes Netz ( <i>links</i> ) und vermaschtes Netz ( <i>rechts</i> ) . . . . .	11
2.3	Instandhaltung und Grundmaßnahmen . . . . .	27
3.1	Beispiel eines zusammenhängenden Digraphen . . . . .	43
3.2	Beispielhafter Digraph $D$ . . . . .	44
3.3	Abbildung eines Wasserverteilungsnetzes als Digraph (schematisch) . . . . .	46
3.4	Beispiel eines erweiterten Digraphen . . . . .	54
4.1	Übersichtskarte von Algerien (www.lexilogos.com; nachbearbeitet) . . . . .	71
4.2	Panorama von Béni Abbès (A. Stache) . . . . .	71
4.3	Übersichtsplan des Wasserverteilungssystems von Béni Abbès . . . . .	74
4.4	Auf dem Dach ( <i>links</i> ) und ebenerdig ( <i>rechts</i> ) angeordnete Hausbehälter (J. Deuerlein) . . . . .	75
4.5	Leckagen und deren unsachgemäße Reparatur . . . . .	81
4.6	Konsistenzprüfung der vorhandenen Leitungsnetzdaten . . . . .	82
4.7	Leitungen des Wasserverteilungssystems (linkes Bild: C. Laures) . . . . .	83
4.8	Schieber und Schieberkammern des Wasserverteilungssystems (rechtes Bild: C. Laures) . . . . .	84
4.9	Pumpen des Wasserverteilungssystems . . . . .	84
4.10	Schematische Darstellung der Wirkungsketten von Mängeln . . . . .	88
4.11	Wirkungsketten der Mängel in der Datenhaltung . . . . .	92
4.12	Wirkungsketten der Mängel im Systemkonzept und der Netzplanung . . . . .	94
4.13	Wirkungsketten der Mängel in der Betriebs- und Versorgungsweise . . . . .	98
5.1	Schematische Darstellung des Konzepts . . . . .	109
5.2	Pilotsektor . . . . .	114
5.3	Schematische Darstellung des Systemkonzepts . . . . .	116
5.4	Schema des bestehenden Verteilungssystems . . . . .	122
5.5	Schema des umstrukturierten Verteilungssystems . . . . .	122
5.6	Das Verteilungsnetz mit den geplanten Druckzonen und Sektoren . . . . .	124
5.7	Schema der Druckzonen und Sektoren des umstrukturierten Versorgungsnetzes . . . . .	125
5.8	Maßnahmen zur Umstrukturierung des Wasserverteilungssystems . . . . .	127
5.9	Anordnung der Hauswasserzähler zur Messung der Rohrnetzabgabe $Q_A$ und des Wasserverbrauchs $Q$ . . . . .	133

6.1	Programmarchitektur . . . . .	140
6.2	Das Konzept der features, feature classes und feature datasets . . . . .	144
6.3	Benutzeroberfläche von <i>ArcCatalog</i> . . . . .	146
6.4	Benutzeroberfläche von <i>ArcMap</i> . . . . .	147
6.5	Ausschnitt aus der Datenbankstruktur von KANET . . . . .	150
6.6	Beispielhafter erweiterter Graph $E$ . . . . .	154
6.7	Blockgraph der Hauptkomponente $E_{HK}$ des Graphen $E$ bei geschlossenem Strang $S_{13}$ . . . . .	154
6.8	Ausschnitt aus der Datenbankstruktur des integrierten Instruments . . . . .	159
6.9	Topologisch unzulängliche ( <i>oben</i> ) und korrekte ( <i>unten</i> ) Rohdaten eines Netzgraphen . . . . .	161
6.10	Voronoi-Diagramm ohne ( <i>links</i> ) und unter ( <i>rechts</i> ) Berücksichtigung von Grenzen . . . . .	163
6.11	Lösungsansatz zur Ermittlung der Voronoi-Diagramme unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen . . . . .	166
6.12	<i>ArcMap</i> -Oberfläche mit Wasserverteilungssystem-Fachschale . . . . .	168
6.13	<i>Editierdialog</i> sowie <i>Informationsdialog</i> der Stränge und Knoten . . . . .	170
6.14	Visualisierung der Knoten, Gebäudeobjekte sowie der mit der Applikation ermittelten Knoteneinzugsgebiete (Voronoi-Diagramm) . . . . .	171
6.15	<i>Ergebnisdialog</i> (Druck am Knoten) einer Simulationsrechnung . . . . .	172
7.1	Akteure des Arbeitsprozesses . . . . .	178
7.2	Ablaufdiagramm des Arbeitsprozesses zum Aufbau eines Netzkatasters . . . . .	179
7.3	Auszug aus dem Netzkataster mit definierten Erhebungspunkten . . . . .	181
7.4	Beispielhafte Darstellung der Örtlichkeit eines Erhebungspunktes . . . . .	183
7.5	Formular für die Datenerhebung . . . . .	183
7.6	<i>Informationsdialog</i> ( <i>links</i> ) und <i>Erhebungspunktdialog</i> ( <i>rechts</i> ) . . . . .	184
7.7	Ablaufdiagramm des Arbeitsprozesses des Schadensregisters . . . . .	188
7.8	Erfassungsformular für Schäden am Leitungsnetz und deren Reparatur . . . . .	189
7.9	Strangbezogene Dialoge zur Eingabe und Analyse von Schäden . . . . .	192
7.10	Dialog und Textdatei der Schadenstatistik . . . . .	193
7.11	Akteure der Datenhaltung in Béni Abbès . . . . .	194

# Tabellenverzeichnis

1.1	Anteil der intermittierend betriebenen Wasserverteilungssysteme ausgewählter Regionen . . . . .	2
1.2	Gegenüberstellung des ungeplanten und geplanten intermittierenden Betriebs sowie des kontinuierlichen Betriebs (- negativ, + positiv) . . .	3
2.1	Grundbauarten von Armaturen . . . . .	15
3.1	Beispielhafte Stränge-Tabelle der ersten Strukturebene . . . . .	47
3.2	Beispielhafte Knoten-Tabelle der ersten Strukturebene . . . . .	47
3.3	Beispielhafte Attribut-Tabelle der zweiten Strukturebene . . . . .	47
3.4	Stränge-Tabelle mit Definition der Topologie des Beispielgraphen aus Abbildung 3.3 . . . . .	48
3.5	Knoten-Tabelle mit Definition der räumlichen Lage des Beispielgraphen aus Abbildung 3.3 . . . . .	48
3.6	Typisierung wichtiger Kontrollarmaturen . . . . .	53
4.1	Prognose des Bevölkerungswachstums in Béni Abbès . . . . .	72
4.2	Nutzbares Wasserdargebot in Béni Abbès . . . . .	73
4.3	Über das öffentliche Netz versorgte häusliche Abnehmer . . . . .	75
4.4	Materialien, Durchmesser und Längen der Leitungen des Wasserverteilungssystems . . . . .	75
5.1	Ermittlung des theoretischen Reduktionspotentials der realen Wasserverluste $ILL$ . . . . .	105
5.2	Ermittlung des theoretisch möglichen mittleren einwohnerbezogenen Tagesbedarfs $q_{dm}$ . . . . .	105
5.3	Theoretisch möglicher mittlerer einwohnerbezogener Tagesbedarf $q_{dm}$ bei $Q_N = 24,0 - 29,0$ l/s . . . . .	105
5.4	Zusammenfassung der Ergebnisse der Pilotversuche . . . . .	115
5.5	Mittlere statische Versorgungsdrücke in den Druckzonen . . . . .	123
5.6	Maßnahmen zur Umstrukturierung des Wasserverteilungssystems . . .	126
6.1	Die ArcGIS Geometrieobjekte ( <i>features</i> ) . . . . .	143
6.2	Algorithmen für die Netzoptimierung . . . . .	156
6.3	Die wichtigsten Werkzeuge der Fachschale . . . . .	169



# Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
Abb.	Abbildung
ADE	Algérienne Des Eaux
ADB	Asian Development Bank
allg.	allgemein/allgemeinen
AHT	AHT Group AG, Essen
APC	Assemblée Populaire Communale
AZ	Asbestzement (Rohrleitungswerkstoff)
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CAD	Computer Aided Design
CHV oder CV	Rückschlagklappe (engl.: <i>check valve</i> )
COM	Microsoft Component Object Model
D.A.E.P.	Direction de l'Alimentation en Eau Potable
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DGM	digitales Geländemodell
d.h.	das heißt
DHW	Direction de l'Hydraulique de la Wilaya
DLL	Dynamic Link Libraries
DN	Nenndurchmesser
DMA	District Meter Area
druckktrl.	druckkontrollierend
DVGW	Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V.
evtl.	eventuell
FCV	Durchflusskontrollschieber (engl.: <i>flow control valve</i> )
flussktrl.	flusskontrollierend
GA	Genetischer Algorithmus
GG	Grauguss (Rohrleitungswerkstoff)
GGG	Duktilguss (Rohrleitungswerkstoff)
GIS	Geoinformationssystem
GI-Systeme	Geoinformationssysteme
ggf.	gegebenenfalls

GPS	Global Positioning System
GTZ	Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Eschborn
i.A.	im Allgemeinen
IWA	International Water Association
IWG	Institut für Wasser und Gewässerentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie
IWRM	Integriertes Wasserressourcenmanagement
Kap.	Kapitel
LP	Lineares Programm/Lineare Programmierung
MRE	Ministère de Ressources en Eau, République Algérienne Démocratique et Populaire
o.g.	oben genannte/genannten
PBV	Druckunterbrecher (engl.: <i>pressure breaking valve</i> )
PDV	Druckabhängiger Schieber (engl.: <i>pressure depending valve</i> )
PE	Polyethylen (Rohleitungswerkstoff)
PRV	Druckminderer (engl.: <i>pressure reducing valve</i> )
PSV	Druckunterstützer (engl.: <i>pressure sustaining valve</i> )
PVC	Polyvinylchlorid (Rohleitungswerkstoff)
s.	siehe
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
s.o.	siehe oben
St	Stahl (Rohleitungswerkstoff)
Tab.	Tabelle
TCV	Drosselschieber (engl.: <i>throttle control valve</i> )
TDV	Zeitabhängiger Schieber (engl.: <i>time depending valve</i> )
TIN	Trianguläres irreguläres Netzwerk
u.a.	unter anderem/anderen
UN	Vereinte Nationen (engl.: <i>United Nations</i> )
usw.	und so weiter
u.U.	unter Umständen
vgl.	vergleiche
vorgeg.	vorgegeben
WHO	Weltgesundheitsorganisation (engl.: <i>World Health Organization</i> )
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil

# Symbolverzeichnis

Für die Einheiten gelten die physikalischen Grundgrößen Länge  $L$ , Masse  $M$  und Zeit  $T$ .

Symbol	Einheit	Bedeutung
$A$	$[L^2]$	Fläche
$\mathbf{A}_G$	$[-]$	Inzidenzmatrix des Graphen $G$
$\mathbf{A}_P$	$[-]$	Inzidenzmatrix der Knoten mit bekannten Potentialhöhen
$Ad$	$[-]$	Adjazenzabbildung
$B$	$[-]$	Baum
$CARL$	$[L^3/T]$	Momentane reale Wasserverluste
$\mathbf{C}_G$	$[-]$	Schleifenmatrix des Graphen $G$
$D$	$[-]$	Digraph
$D$	$[L]$	Durchmesser/Rohrinnendurchmesser
$e$	$[-]$	Exponent des allg. Widerstandsgesetzes
$E$	$[E]$	Einwohner/Personen/Bevölkerung
$f$	$[-]$	Lastfaktor
$f()$	$[-]$	Funktion
$g$	$[L/T^2]$	Erdbeschleunigung
$G$	$[-]$	Graph
$\mathbf{h}$	$[-]$	Vektor mit den Druckhöhenverlusten
$h$	$[L]$	Energiehöhenverlust/Druckhöhenverlust
$\mathbf{H}$	$[-]$	Vektor mit den Potentialhöhen
$H$	$[L]$	Potentialhöhe/Druckhöhe/Förderhöhe
$\mathbf{H}_P$	$[-]$	Vektor der Knoten mit bekannten Potentialhöhen
$k$	$[L]$	Rauheit
$K$	$[-]$	Knotenmenge/Knoten
$L$	$[L]$	Länge
$M$	$[-]$	Masche/Schleife
$n$	$[T^{-1}]$	Drehzahl
$n_n$	$[T^{-1}]$	Nenndrehzahl
$p$	$[ML/T^2/L^2]$	Druck/Förderdruck
$P$	$[-]$	Pfad
$P$	$[ML/T^2/L^2]$	Druck

$P_n$	$[ML^2/T^3]$	Förderleistung
$P_e$	$[ML^2/T^3]$	Leistungsbedarf
$\mathbf{q}$	$[-]$	Vektor mit den Durchflüssen
$q$	$[L^3/T]$	Durchfluss/Volumenstrom
$\mathbf{Q}$	$[-]$	Vektor mit den Bedarfswerten
$Q$	$[L^3/T]$	Durchfluss/Volumenstrom
$R$	$[-]$	Koeffizient des allg. Widerstandsgesetzes
$Re$	$[-]$	Reynoldszahl
$S$	$[-]$	Strangmenge/Strang
$U_{ARL}$	$[L^3/T]$	Unvermeidbare reale Wasserverluste
$v$	$[L/T]$	Geschwindigkeit
$V$	$[L^3]$	Volumen
$W$	$[-]$	Weg
$\eta_p$	$[-]$	Pumpenwirkungsgrad
$\lambda$	$[-]$	Reibungsbeiwert
$\nu$	$[L^2/T]$	kinematische Viskosität
$\rho$	$[M/L^3]$	Dichte
$\zeta$	$[-]$	Druckhöhenverlustbeiwert

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Wasser ist als Lebensmittel für den Menschen unersetzlich und stellt außerdem die Grundlage jeder ökonomischen Entwicklung dar. Die Vereinten Nationen (UN) sehen daher das Recht des Menschen auf Wasser als unumgänglich (United Nations, 2003). Gleichwohl hatten im Jahr 2000 über eine Milliarde Menschen keinen Zugang zu genügend Trinkwasser (United Nations, 2002). Die United Nations (2000) formulierten daher im gleichen Jahr auf dem Millenniumsgipfel in New York das Ziel, den Anteil der Weltbevölkerung ohne sanitäre Grundversorgung und ohne Zugang zu ausreichend Wasser mit einwandfreier Qualität bis zum Jahr 2015 zu halbieren.

Über die Hälfte der Weltbevölkerung lebt aktuell in städtischen Gebieten. Die Bevölkerung in den städtischen Gebieten der Entwicklungsländer, vor allem in Afrika und Asien, stellt dabei den größten Anteil dar (United Nations, 2008b,a). In den Entwicklungsländern werden die Bevölkerung und der städtische Bevölkerungsanteil nach Prognosen der United Nations (2008b) noch weiter stetig zunehmen. Meist wird eine Versorgung der städtischen Bevölkerung mit Brauch- und Trinkwasser über zentrale Wasserverteilungssysteme angestrebt. In Afrika waren im Jahr 2000 ca. 64 %, in Asien ca. 84 % der urbanen Bevölkerung auf zentrale Wasserverteilungssysteme angewiesen (WHO und UNICEF, 2000).

Während in den entwickelten Ländern die an Verteilungsnetze angeschlossene Bevölkerung weitestgehend mit ausreichend Wasser adäquater Qualität versorgt werden kann, ist die zentrale Wasserverteilung in den Entwicklungsländern trotz großer internationaler Anstrengungen nach wie vor meist versorgungstechnisch, ökologisch und ökonomisch mangelhaft. Ein Mangel von zentraler Bedeutung ist die intermittierende Betriebsweise und Versorgung. Ca. ein Drittel der Wasserverteilungssysteme in Afrika, über die Hälfte der Systeme in Asien und fast zwei Drittel der Systeme in Lateinamerika versorgen ihre Verbraucher nicht kontinuierlich (WHO und UNICEF, 2000; Lee und Schwab, 2005). In Südostasien und Indien wird der Anteil der Wasserverteilungssysteme, die intermittierend betrieben werden, sogar auf 90 % bzw. fast 100 % beziffert (Vairavamoorthy u. a., 2001). Tabelle 1.1 fasst die genannten Werte zusammen.

Die intermittierende Versorgung ist normalerweise ein Resultat äußerer Zwänge und keine geplante Versorgungsstrategie. Die Verteilungssysteme wurden ursprünglich für eine kontinuierliche Versorgung geplant und werden jetzt auf Grund vielschichtig verknüpfter Randbedingungen intermittierend betrieben (Vairavamoorthy u. a., 2008). Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) sieht im technischen Bereich

Tabelle 1.1: Anteil der intermittierend betriebenen Wasserverteilungssysteme ausgewählter Regionen

<b>Region</b>	<b>Intermittierend betriebene Systeme</b>	<b>Quelle</b>
Afrika	ca. 30 %	WHO und UNICEF (2000)
Asien	ca. 50 %	WHO und UNICEF (2000)
Lateinamerika	ca. 60 %	Lee und Schwab (2005)
Südostasien	ca. 90 %	Vairavamoorthy u. a. (2001)
Indien	ca. 100 %	Vairavamoorthy u. a. (2001)

hauptsächlich die unzulängliche Erhebung und Verwaltung von Betriebs- und Instandhaltungsdaten sowie die unsachgemäße Systemkonzeption und -planung als Ursachen (WHO, 2003).

Die periodische Befüllung und Entleerung eines Rohrleitungsnetzes hat u.a. negative Auswirkungen auf die Infrastruktur (Druckstöße sowie Unter- und Überschreiten von Druckgrenzwerten), die Wasserqualität (Stagnation sowie Schmutzeintrag bei Unterdrücken) und die Wasserverlustmengen. Demzufolge kann ein ursprünglich für eine kontinuierliche Versorgung ausgelegtes Verteilungssystem nicht nachhaltig intermittierend betrieben und die originäre Aufgabe einer Wasserversorgung, nämlich die Bereitstellung von ausreichend Wasser adäquater Qualität zu jeder Zeit an alle Verbraucher, nicht erfüllt werden. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Entwicklungsländer vor der Aufgabe stehen, mangelhafte, ursprünglich für eine kontinuierliche Versorgung ausgelegte und jetzt intermittierend betriebene Wasserverteilungssysteme zu ertüchtigen.

Grundsätzlich sind zwei Ansätze zur Lösung der Problematik der ungeplanten intermittierenden Betriebsweise denkbar. Entweder der intermittierende Betrieb wird geplant vollzogen und die Systeme werden auf die entsprechenden Lastfälle ausgelegt oder eine kontinuierliche Betriebsweise wird eingeführt. Tabelle 1.2 vergleicht anhand ausgewählter Aspekte des technischen Betriebs der Wasserverteilung die ungeplante intermittierende Betriebsweise mit der geplanten intermittierenden und der kontinuierlichen Betriebsweise. Durch die Auslegung des Systems auf die intermittierende Betriebsweise können verschiedene negative Folgen, wie z.B. nicht versorgte Netzbereiche, vermieden werden. Es bleiben jedoch gravierende Probleme bestehen, wie z.B. die Beeinträchtigung der Wasserqualität bei der Verteilung. Sofern die Machbarkeit gegeben ist, stellt daher der optimierte intermittierende Betrieb keine nachhaltige Alternative zur kontinuierlichen Betriebsweise dar.

Obwohl der Handlungsbedarf zur Verbesserung der Wasserversorgungssituation in den Entwicklungsländern, z.B. von den United Nations (2007), erkannt ist, steht die Problematik nach wie vor nicht im Fokus der aktuellen Forschung. Die Asian Development Bank (ADB) und die International Water Association (IWA) unterstreichen daher in einer Zusammenfassung den Forschungsbedarf im Bereich der Wasserver-

Tabelle 1.2: Gegenüberstellung des ungeplanten und geplanten intermittierenden Betriebs sowie des kontinuierlichen Betriebs (- negativ, + positiv)

<b>Aspekte des technischen Betriebs der Wasserverteilung</b>	<b>ungeplant intermittierend</b>	<b>geplant intermittierend</b>	<b>kontinuierlich</b>
Limitierung Rohrnetzeinspeisung	+	+	-
System für Lastfälle ausgelegt	-	+	+
Gerechte Wasserverteilung	-	+	+
Erhaltung der Wasserqualität	-	-	+
Versorgungszeiten	-	-	+
Auswirkungen Netzlebensdauer	-	-	+
Wassermengenbilanzierung	-	-	+
Verbrauchsmessung	-	-	+
Wasserverlustreduktion	-	-	+
Löschwasserbereitstellung	-	-	+
Kosten auf Verbraucherseite	-	-	+
Kosten für Neubau Leitungsnetz	+	-	+

sorgung in Entwicklungsländern unter Berücksichtigung sozialer, ökonomischer und ökologischer Aspekte (McIntosh, 2003). Das von verschiedenen Ländern Europas sowie Japan, Kanada, Australien, der Weltbank und der UN geförderte Water and Sanitation Program sieht dabei insbesondere Forschungsbedarf bei der Überführung von intermittierend betriebenen Systemen hin zu einer kontinuierlichen Betriebsweise (Myers, 2003).

## 1.2 Fallbeispiel Béni Abbès

Das Wasserverteilungssystem von Béni Abbès, eine in der nordwestlichen Sahara Algeriens gelegene Oasenstadt, weist die für Entwicklungsländer charakteristischen Mängel auf. Trotz eines ausreichenden Wasserdargebots herrscht durch unsachgemäße Verteilung und den damit verbundenen großen Wasserverlusten Wasserknappheit. Die ca. 14.000 Einwohner der Stadt werden nur intermittierend versorgt und sind dadurch gezwungen, Wasser in privaten Hausbehältern zwischenzuspeichern. Auf Grund der Betriebsweise kann keine gerechte Verteilung des verfügbaren Wassers erreicht werden. Außerdem genügt das Wasser beim Verbraucher durch Verunreinigungen im Leitungsnetz und in den Hausbehältern nicht den Qualitätsanforderungen an Trinkwasser.

Die Situation in Béni Abbès steht stellvertretend für die Situation der Wasserversorgung in ganz Algerien. Seit der Unabhängigkeit des Landes 1962 wurden die bestehenden Wasserverteilungssysteme nicht nach den anerkannten Regeln der Technik ausgebaut, betrieben und instandgehalten (Mansouri, 2008). Demzufolge ist die Infrastruktur heute in einem desolaten Zustand und die Wasserverteilung in allen

Bereichen mangelhaft (Schmitz, 2000). Zur Lösung der Wasserkrise ist der Staat Algerien sowohl auf die internationale technische Zusammenarbeit als auch auf privatwirtschaftliche Partner angewiesen. Während für die technische Zusammenarbeit der Wissenstransfer im Vordergrund steht, liefert die Privatwirtschaft hauptsächlich Technik und tritt als Betreiber auf. So ist Algerien heute unter den Ländern Nordafrikas und des Nahen und Mittleren Ostens (MENA-Region) der viertgrößte Importeur von Wassertechnik (Kalhöfer, 2006; BFAI, 2007).

Im Rahmen der deutsch-algerischen technischen Zusammenarbeit wird von der Deutschen Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, finanziert durch das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ), und dem algerischen Ministère des Ressources en Eau (MRE) seit 2003 das Projekt *Integriertes Wasserressourcenmanagement für Oasen (Gestion intégrée de l'eau en oasis)*<sup>1</sup> durchgeführt. Ziel des Kooperationsprojekts ist die Entwicklung eines angepassten Wasserbewirtschaftungskonzepts für Oasen am Beispiel Béni Abbès sowie die Übertragung des Konzepts auf weitere Oasen im Wadi<sup>2</sup> Saoura. Seit 2004 ist das Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie im Auftrag der GTZ am Projekt beteiligt, um hauptsächlich Fragestellungen der Wasserverteilung zu bearbeiten.

### 1.3 Zielsetzung und Ansatz

Gegenstand dieser Arbeit ist die Entwicklung eines übertragbaren Konzepts zur Überführung intermittierend betriebener Wasserverteilungssysteme hin zu einer kontinuierlichen Betriebsweise sowie die Entwicklung von Werkzeugen zur Planung und Umsetzung des Konzepts.

Dazu werden zunächst die für Entwicklungsländer charakteristischen Mängel in der Wasserverteilung untersucht und typisiert. Die Analyse der Abhängigkeiten, Ursachen und Wirkungen der charakteristischen Mängel stellt die notwendige Grundlage für die Erarbeitung der Lösungen dar.

Das Konzept sieht eine Umstrukturierung des Verteilungsnetzes sowie die sukzessive Einführung einer kontinuierlichen Betriebsweise in diskreten Sektoren vor. Dabei werden sowohl Aspekte der Planung und Umsetzung als auch ökonomische, ökologische und soziale Randbedingungen berücksichtigt.

Für die Planung und Umsetzung des Konzepts sind eine verlässliche Datengrundlage sowie Analyse- und Planungswerkzeuge erforderlich. In einem weiteren Teil der Arbeit wird daher die Entwicklung eines integrierten Instruments für das Datenmanagement, die Systemanalyse und die Netzplanung behandelt. Auf das Instrument abgestimmte Arbeitsprozesse zur erforderlichen Datenerhebung gewährleisten die nachhaltige Implementierung und Nutzung im gegebenen Kontext.

---

<sup>1</sup>Das Projekt wird im Folgenden kurz Kooperationsprojekt genannt.

<sup>2</sup>Das arabische Wort Wadi bezeichnet einen nur zeitweise wasserführenden Flusslauf in einem Trockental einer Wüste.

Die Ergebnisse der Arbeit wurden zunächst als konkrete Lösungen für das Wasserverteilungssystem in Béni Abbès erarbeitet und anschließend verallgemeinert. Dementsprechend wird in dieser Arbeit regelmäßig Bezug auf das Fallbeispiel Béni Abbès genommen.

Zusammenfassend soll diese Arbeit mit folgenden Lösungsansätzen zur Bewältigung der Problematik der Wasserverteilung in Entwicklungsländern im Allgemeinen und in Algerien im Speziellen beitragen:

- Analyse und Klassifizierung der für Entwicklungsländer charakteristischen Mängel in der Wasserverteilung
- Entwicklung eines übertragbaren Konzepts zur Einführung einer adäquaten Netzstruktur und einer kontinuierlichen Versorgung
- Entwicklung eines integrierten Instruments zur Datenhaltung, Systemanalyse und Systemplanung
- Entwicklung von standardisierten Arbeitsprozessen zur Datenerhebung und Aktualisierung des integrierten Instruments

## 1.4 Aufbau der Arbeit

Entsprechend der Zielsetzung gliedert sich diese Arbeit in drei Hauptteile. Nach den Grundlagen der Wasserverteilung und Modellierung werden zunächst im ersten Teil die für diese Arbeit relevanten Mängel in der Wasserverteilung analysiert. Der zweite Teil beschreibt das entwickelte Konzept zur Umstrukturierung und Einführung einer kontinuierlichen Wasserversorgung. Im dritten Teil werden das integrierte Instrument und die verknüpften Arbeitsprozesse dargestellt. Daraus ergibt sich folgender Aufbau:

Im nachfolgenden zweiten Kapitel werden zunächst die für das Verständnis dieser Arbeit relevanten Grundlagen der Wasserverteilung zusammengefasst. Dabei wird der aktuelle Stand der Technik beschrieben, der den Soll-Zustand jeder Verbesserungsmaßnahme darstellt. Zuerst wird die Wasserverteilung innerhalb der Wasserversorgung abgegrenzt (s. Kap. 2.2) und die Komponenten eines Wasserverteilungssystems und deren Aufgaben, auch im Hinblick auf deren numerische Modellierung (s. Kap. 3 und Kap. 6), umrissen (s. Kap. 2.3). Im Weiteren sind die für die Diskussion typischer Mängel (s. Kap. 4) sowie entsprechender Lösungsansätze (s. Kap. 5 und 7) wichtigen Aspekte der Analyse und Planung (s. Kap. 2.4) sowie des technischen Betriebs (s. Kap. 2.5) dargestellt.

Im dritten Kapitel werden bezüglich der Entwicklung des integrierten Datenmanagement-, Analyse- und Planungsinstruments die Grundlagen der numerischen Modellierung von Wasserverteilungsnetzen zur hydraulischen Systemanalyse beschrieben. Nach der Definition und Aufgabenbeschreibung (s. Kap. 3.2) werden zunächst die notwendigen Grundlagen der Graphentheorie als Basis der Modellierung gegeben (s. Kap. 3.3). Das Konzept der Modellierung ist im anschließenden Kapitel 3.4 zusammengefasst. Kapitel 3.6 umreißt den Prozess des Modellaufbaus. Abschließend wird auf die Simulation des hydraulischen Systemzustands als zentrale

## 1 Einleitung

Anwendung der numerischen Modellierung von Wasserverteilungsnetzen eingegangen (s. Kap. 3.7).

Das vierte Kapitel befasst sich mit den für Entwicklungsländer typischen Mängeln in der Wasserverteilung. Entsprechend des in Kapitel 4.1 dargestellten Ansatzes werden die Wasserverteilung des Fallbeispiels Béni Abbès (s. Kap. 4.2) und deren Mängelanalyse behandelt (s. Kap. 4.3). Aufbauend auf der Mängelanalyse und einer Literaturrecherche werden die Zusammenhänge von Mängeln allgemein beleuchtet (s. Kap. 4.4) und die für diese Arbeit relevanten Mängel in der Datenhaltung, im Systemkonzept und der Netzplanung sowie in der Betriebsweise ausführlich diskutiert (s. Kap. 4.5).

Der konzeptionelle Ansatz zur Überführung einer intermittierenden Versorgung hin zu einer kontinuierlichen Versorgung ist Inhalt des fünften Kapitels. In der Zielsetzung wird der Ansatz auf bestehende Systeme, die intuitiv und intermittierend betrieben werden, begrenzt und die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Betriebsweise im gegebenen Fall herausgearbeitet (s. Kap. 5.1). Der Ansatz wird im darauf folgenden Kapitel 5.2 hergeleitet und umrissen. Dabei werden die Aufgabenstellung, die Machbarkeit und bekannte Ansätze diskutiert. Entsprechend der Arbeitsschritte des prozessorientierten Ansatzes wird in den nächsten Kapiteln detailliert auf den Aufbau einer Datenhaltung und eines hydraulischen Modells (s. Kap. 5.3), auf Pilotversuche (s. Kap. 5.4), auf die Umstrukturierung des bestehenden Verteilungsnetzes (s. Kap. 5.5) und schließlich auf die Umstellung der Betriebsweise (s. Kap. 5.8) eingegangen. Abschließend werden Aspekte der Kosten einer kontinuierlichen Versorgung diskutiert (s. Kap. 5.9).

Das sechste Kapitel beschreibt das auf die Anforderungen in Entwicklungsländern angepasste integrierte Datenmanagement-, Analyse- und Planungsinstrument. Nach der Zielsetzung (s. Kap. 6.1) werden zunächst die Programmarchitektur (s. Kap. 6.2) sowie die relevanten Aspekte der Basiskomponenten des Instruments, das Geoinformationssystem ArcGIS (s. Kap. 6.3) sowie das hydraulische Modell KANET (s. Kap. 6.4), dargestellt. Die Integration der genannten Komponenten sowie des hydraulischen Modells EPANET werden in den darauf folgenden Kapiteln 6.5 und 6.6 behandelt. Kapitel 6.7 beschreibt neu entwickelte Applikationen zur Datenaufbereitung und Modellierung. Das letzte Kapitel fasst die Funktionalität der Werkzeuge, die Benutzeroberfläche und deren Anwendung zusammen (s. Kap. 6.8).

Die auf das im sechsten Kapitel beschriebene Werkzeug abgestimmten standardisierten Arbeitsprozesse zum Aufbau und zur Pflege einer Systemdatenbasis (s. Kap. 7.2) und eines Schadensregisters (s. Kap. 7.3) sind Thema des siebten Kapitels. Die Prozesse wurden für das Fallbeispiel Béni Abbès entwickelt und sind hier verallgemeinert dargestellt. Die Umsetzung in Béni Abbès wird in Kapitel 7.4 zusammengefasst.

Abschließend werden in Kapitel 8 die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf die künftigen Forschungs- und Entwicklungsaufgaben gegeben.

# 2 Grundlagen der Wasserverteilung

## 2.1 Überblick

Dieses Kapitel fasst die für diese Arbeit notwendigen Grundlagen der Trinkwasserverteilung zusammen. Dabei wird der Stand der Technik beschrieben, der für die in dieser Arbeit beschriebenen Konzepte und Werkzeuge zur Verbesserung Mängel aufweisender Wasserverteilungen den Soll-Zustand, also die Zielsetzung, darstellt (s. Kap. 5, 6 und 7). Eine ausführliche Betrachtungen charakteristischer Probleme in der Wasserverteilung, insbesondere in Entwicklungsländern, findet sich in Kapitel 4.

Zunächst werden dazu grundlegende Begriffe und Bestandteile der Trinkwasserversorgung erläutert sowie die Abgrenzung der Wasserverteilung innerhalb der Wasserversorgung definiert (s. Kap. 2.2). Die Bestandteile der Wasserverteilung sowie ihre Funktionen sind in Kapitel 2.3 beschrieben. In den folgenden Kapiteln 2.4 und 2.5 sind die für diese Arbeit relevanten Aspekte der Analyse und Planung sowie des technischen Betriebs von Wasserverteilungssystemen dargestellt.

## 2.2 Zentrale Wasserversorgungssysteme

### 2.2.1 Aufgaben

Ein Trinkwasserversorgungssystem hat die Aufgabe, Trinkwasser einwandfreier Qualität jederzeit in ausreichender Menge und bei ausreichendem Druck an jeder Stelle des zu versorgenden Gebiets bereit zu stellen. Sind mehrere Wasserverbraucher an dasselbe Wasserversorgungssystem angeschlossen, spricht man von einer zentralen Wasserversorgung (Karger u. a., 2005).

Die Trinkwasserqualität muss bestimmten Anforderungen genügen, die meist in Gesetzen und Verordnungen festgehalten sind. In Deutschland ist dies die Verordnung über die Qualität von Trinkwasser für den menschlichen Gebrauch (Dilly und Welsch, 2003). Die zu verteilende Menge ergibt sich aus dem häuslichen Bedarf an Trinkwasser und dem industriellen Bedarf an Brauchwasser. Das Wasser muss unter dem Druck verteilt werden, der für die Bereitstellung des Wassers erforderlich ist.

### 2.2.2 Bestandteile der Wasserversorgung

Eine zentrales Wasserversorgungssystem besteht meist aus den Komponenten Wassergewinnung und -aufbereitung, Wasserförderung, Wasserspeicherung und Wasserverteilung (Mutschmann und Stimmelmayer, 2007; Karger u. a., 2005; DVGW, 2004).

**Wassergewinnung:** Bei Wasservorkommen unterscheidet man Quellwasser, Grundwasser und Oberflächenwasser. Fassungen und Entnahmbauwerke wie Quelfassungen, Brunnen oder Talsperren dienen der Gewinnung des so genannten Rohwassers.

**Wasseraufbereitung:** Die Wasseraufbereitung dient der Verbesserung der Wasserqualität. Meist wird das gewonnene Wasser zentral in einem Wasserwerk aufbereitet. Es kann aber auch eine dezentrale Aufbereitung beim Verbraucher effizienter sein. Bei der Aufbereitung kommen in Abhängigkeit der Qualität des Rohwassers und den Anforderungen an die Wasserqualität verschiedene physikalische (z.B. Sieben, Filtern, Sedimentation), chemische (z.B. Fällung, Oxidation, Neutralisation, Ionenaustausch) und biologische Verfahren (z.B. Denitrifikation, Ammoniumentfernung in Trockenfiltern) zum Einsatz.

**Wasserrförderung:** Rohwasser muss von der Wasserfassung zur Wasseraufbereitung, Reinwasser muss von der Wasseraufbereitung zu Speicherbehältern oder direkt über das Verteilungsnetz zum Verbraucher gefördert werden. Höhenunterschiede werden dabei durch Förderanlagen, die eine Druckerhöhung erzeugen, überwunden.

**Wasserspeicherung:** Die Speicherung von Trinkwasser in Versorgungsbehältern dient der Abdeckung von Verbrauchsspitzen und Stillstandszeiten der Wasserrförderung, der Bereitstellung von Löschwasserreserven und der Stabilisierung des Versorgungsdrucks. Speicherbehälter können als Durchlaufbehälter über Zubringerleitungen oder als Gegenbehälter über das Verteilungsnetz befüllt werden.

**Wasserverteilung:** Die Wasserverteilung hat die Aufgabe Trinkwasser von der Wassergewinnung oder Wasseraufbereitung zum Verbraucher zu transportieren. Die Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. DVGW (2004) definiert das Wasserverteilungssystem als den Teil eines Wasserversorgungssystems, der nach der Wasseraufbereitung oder nach der Wassergewinnung, sofern keine Aufbereitung vorhanden ist, beginnt und an der Übergabestelle zum Verbraucher endet. Die Bestandteile von Wasserverteilungssystemen sind im nächsten Kapitel näher beschrieben.

## 2.3 Wasserverteilungssysteme

### 2.3.1 Bestandteile von Wasserverteilungssystemen

Bestandteile eines Wasserverteilungssystems sind das Rohrleitungsnetz (s. Kap 2.3.2), die Behälter (s. Kap 2.3.3), die Förderanlagen (s. Kap 2.3.4), die Armaturen (s. Kap 2.3.5) sowie alle weiteren Systemelemente zum Zweck der Verteilung von Wasser an den Verbraucher. Abbildung 2.1 zeigt schematisch die Bestandteile eines Wasserverteilungssystems. Für die Berechnung der Fließ- und Druckzustände von Wasserverteilungsnetzen sind dabei allein die hydraulischen Eigenschaften der

Bestandteile relevant (s. Kap. 3.7). Die Anordnung der Systemelemente stellt das Konzept des Wasserverteilungsnetzes dar. Die wichtigsten Systemkonzepte sind in Kapitel 2.4.1 aufgeführt.

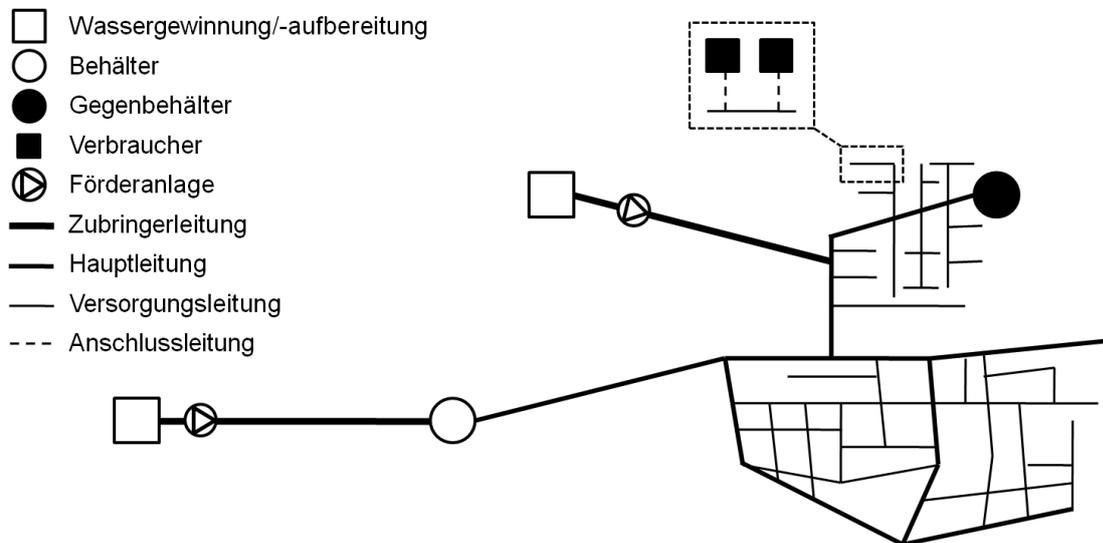


Abbildung 2.1: Wasserverteilungssystem mit Systemelementen

## 2.3.2 Rohrleitungsnetze

### 2.3.2.1 Bestandteile von Rohrleitungsnetzen

Die Bestandteile des Rohrleitungsnetzes können entsprechend ihrer Aufgaben in Zubringer-, Haupt-, Verteilungs- und Anschlussleitungen unterteilt werden. Über Zubringerleitungen wird Wasser von der Wassergewinnung oder Wasseraufbereitung zu den Speicherbehältern oder zum Versorgungsgebiet transportiert. Im Netz des Versorgungsgebiets wird das Wasser über Hauptleitungen, die üblicherweise keine Verbindung zum Verbraucher haben, verteilt. Versorgungsleitungen verbinden die Hauptleitungen mit den Anschlussleitungen des Verbrauchers. Zubringerleitungen bilden das Zubringernetz, Haupt-, Versorgungs- und Anschlussleitungen das Versorgungsnetz. Ein Rohrleitungsnetz mit seinen Bestandteilen ist schematisch in Abbildung 2.1 dargestellt.

### 2.3.2.2 Rohrleitungen

**Durchmesser:** Die DVGW (2004) unterscheidet zwischen Außendurchmesser (Outside Diameter, *OD*), Innendurchmesser (Internal Diameter, *ID*) und Nennweite (*DN*). Der Außendurchmesser *OD* ist der mittlere Außendurchmesser des Rohrschafts. Analog ist der Innendurchmesser *ID* der mittlere Innendurchmesser des Rohrschafts. Die Nennweite *DN* ist eine alphanumerische Bezeichnung der Größe

einer Rohrleitung. Die Bezeichnung besteht aus den Buchstaben DN und einer ganzen Zahl, die annähernd dem tatsächlichen Außendurchmesser *OD* in Millimeter entspricht. Die Zahl stellt keinen messbaren Wert dar und dient nur Referenzzwecken (DIN, 1995b; DVGW, 2004).

**Werkstoffe:** Für Rohrleitungen kommen verschiedene Werkstoffe zum Einsatz. Gebräuchlich sind Leitungen aus Grauguss (*GG*) oder Duktilguss (*GGG*), aus Stahl (*St*) und aus Kunststoffen wie Polyvinylchlorid (*PVC*) oder Polyethylen (*PE*) (Mutschmann und Stimmelmayer, 2007). Druckleitungen aus Asbestzement (*AZ*) dürfen seit 1994 in Deutschland weiter betrieben, jedoch nicht mehr eingebaut, ersetzt oder repariert werden. Die Wahl des Werkstoffs hängt maßgeblich von der Festigkeit gegenüber innerer und äußerer Belastung, den Kosten sowie der Korrosionsbeständigkeit ab (Mutschmann und Stimmelmayer, 2007). In Entwicklungsländern ist die Verfügbarkeit eines Werkstoffes mitentscheidend.

**Drücke und Druckstufen:** Die DVGW (2004) definiert für Bauteile eines Rohrleitungsnetzes den zulässigen Bauteilbetriebsdruck (pression de fonctionnement admissible, *PFA*) und den höchsten zulässigen Bauteilbetriebsdruck (pression maximale admissible, *PMA*). Dabei ist der zulässige Bauteilbetriebsdruck *PFA* der höchste hydrostatische Druck, dem eine Leitung im Dauerbetrieb standhält. Der höchste zulässige Bauteilbetriebsdruck *PMA* ist der höchste zeitweise auftretende Druck inkl. Druckstoß, dem eine Leitung standhält.

### 2.3.2.3 Formen

**Verästelte Netze:** Verästelte Netze bestehen aus sich verzweigenden Leitungssträngen, die keine weiteren Verbindungen haben (DIN, 1983). In Verästelungsnetzen erreicht das Wasser den Verbraucher über genau einen Leitungspfad. Bei einer Unterbrechung an nur einem Punkt im Verästelungsnetz sind alle in Fließrichtung nachfolgenden Netzelemente nicht versorgt. Verästelungsnetze sind transparent und vereinfachen wesentlich ihre Bemessung, die Kalibrierung eines hydraulischen Modells des Netzes sowie die Verlust- und Mengenermittlung. Meist werden Fernwasserversorgungen und Zubringerleitungen verästelt angelegt. Abbildung 2.2 zeigt ein Beispiel eines verästelten Netzes.

**Vermaschte Netze:** In einem vermaschten Netz kann jeder Punkt im Leitungsnetz aus mindestens zwei Richtungen versorgt werden. Vermaschte Netze werden auch als Ringnetze bezeichnet (DIN, 1983). Gegenüber einem Verästelungsnetz ist die Versorgungssicherheit höher. Außerdem kann im vermaschten Netz ein guter Druckausgleich erreicht werden. Jedoch ist die Berechnung der Drücke und Flüsse in einem vermaschten Netz verhältnismäßig aufwändig. Fließrichtungen sind nicht direkt erkennbar. Verlust- und Mengenermittlungen erfordert einen guten Kenntnisstand des Systems. Die Kalibrierung des hydraulischen Modells eines vermaschten Netzes ist

komplex. Meist werden Verteilungsnetze vermascht angelegt. Abbildung 2.2 zeigt ein Beispiel eines vermaschten Netzes.

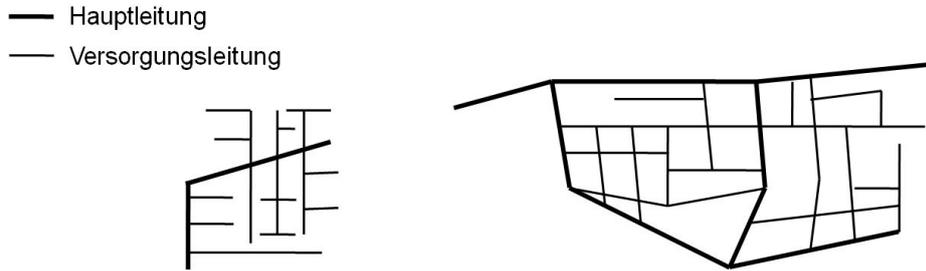


Abbildung 2.2: Verästeltes Netz (*links*) und vermaschtes Netz (*rechts*)

### 2.3.3 Speicherbehälter

#### 2.3.3.1 Aufgaben

Trinkwasserbehälter haben die Aufgabe, Wasser für die Versorgung eines Gebietes zu speichern (DVGW, 2005a). Dabei gleichen die Behälter über ihr Speichervolumen die Unterschiede zwischen Zulauf in den Behälter und Einspeisung in das Versorgungsgebiet aus. Das Potential des Füllstandes im Behälter dient der Aufrechterhaltung des Drucks im Verteilungsnetz. Außerdem werden in Trinkwasserbehältern Betriebs- und Löschwasserreserven vorgehalten.

#### 2.3.3.2 Unterscheidung nach Konstruktion

Bzgl. Konstruktion und Aufgabe im Wasserversorgungssystem werden Hochbehälter, Wasserturm und Tiefbehälter unterschieden (DVGW, 2005a, 2004).

**Hochbehälter:** Das gespeicherte Wasservolumen ist niveaugleich mit dem Gelände. Das Potential des gespeicherten Wassers dient der gravitären Einspeisung in das Versorgungsnetz. Der Hochbehälter auf einem natürlichen Geländehochpunkt ist meist die wirtschaftlichste Lösung bzgl. Wasserspeicherung und Druckeinspeisung.

**Wasserturm:** Das gespeicherte Wasservolumen ist durch ein Bauwerk über Geländeniveau gehoben. Das Potential des gespeicherten Wassers dient der gravitären Einspeisung in das Versorgungsnetz. Können keine natürlichen Geländehochpunkte genutzt werden, kommen Wassertürme zum Einsatz.

**Tiefbehälter:** Der Tiefbehälter entspricht dem Hochbehälter mit der Ausnahme, dass der Versorgungsdruck auf Grund der Lage durch Druckerhöhungsanlagen und nicht durch Gravität erreicht wird.

### 2.3.3.3 Unterscheidung nach Betriebsweise

Die Anordnung eines Behälters im Wasserversorgungssystem sowie die Zuordnung von Druckerhöhungsanlagen bedingen deren Betriebsweise (DVGW, 2004). Es wird daher zwischen Durchlauf-, Gegen-, Zwischen- und Zentralbehälter unterschieden.

**Durchlaufbehälter:** Ein Durchlaufbehälter liegt zwischen Zubringersystem und Versorgungsgebiet. Das im gesamten, dem Behälter zugeordneten Versorgungsgebiet konsumierte Wasser fließt durch den Behälter. Vorteile des Durchlaufbehälters sind hauptsächlich die eindeutigen Fließrichtungen, die gute Wassererneuerung auf Grund der großen Fluktuation sowie die hydraulische Trennung des Zubringersystems und des Verteilungsnetzes. Dadurch ist die Behälterbefüllung unabhängig vom Versorgungsdruck. Die Bedarfsschwankungen im Versorgungsgebiet werden durch das Behältervolumen ausgeglichen. Die Förderung kann optimal ausgelegt werden.

**Gegenbehälter:** Ein Gegenbehälter wird über das Netz des Versorgungsgebiets gespeist, d.h. nur das nicht konsumierte Wasser erreicht den Behälter. Ein Gegenbehälter ermöglicht eine relativ konstante Förderung in das Versorgungsgebiet. In Zeiten geringen Bedarfs wird der Behälter gefüllt. In Zeiten größeren Bedarfs deckt das im Gegenbehälter gespeicherte Wasser die Verbrauchsspitzen. Durch die zweiseitige Einspeisung in das Versorgungsgebiet wird eine hohe Versorgungssicherheit erreicht. Allerdings wird Stagnation begünstigt und die Fließrichtungen wechseln.

**Zwischenbehälter:** Zwischenbehälter dienen nicht der Einspeisung in ein Versorgungsnetz. Meist werden Zwischenbehälter im Zubringersystem in Verbindung mit Druckerhöhungsanlagen zur Wasserförderung eingesetzt.

**Zentralbehälter:** Ist ein Durchlauf- oder Gegenbehälter im Versorgungsnetz angeordnet, wird dieser auch als Zentralbehälter bezeichnet.

### 2.3.4 Förderanlagen

#### 2.3.4.1 Unterscheidung bzgl. Anordnung und Aufgabe

Förderanlagen dienen zur Überwindung von Höhenunterschieden, zur Drucksteigerung und zur Vergrößerung des Förderstroms beim Wassertransport. Die DVGW (1981) unterscheidet bzgl. ihrer Anordnung im System und damit bzgl. ihrer Aufgabe vier Arten von Förderanlagen.

**Förderung in Systeme mit Speicherbehälter:** Förderanlagen sind im Zubringernetz angeordnet, das von den Bedarfsschwankungen im Verteilungsnetz durch Speicherbehälter abgekoppelt ist. Die Bedarfsschwankungen werden durch das Speichervolumen ausgeglichen. Diese Anordnung ermöglicht einen gleichmäßigen Betrieb bei nahezu konstanter Förderhöhe.

**Förderung in Systeme ohne Speicherbehälter:** Förderanlagen sind im Verteilungsnetz angeordnet und gewährleisten die Versorgung eines Gebiets mit ausreichendem Druck. Die Verteilungsnetze sind durch Bedarfsschwankungen gekennzeichnet. Die Förderung muss daher zu jeder Zeit gleich dem Wasserverbrauch sein. Die DVGW (2006c) bezeichnet derart angeordnete Förderanlagen als Druckerhöhungsanlagen.

**Förderung in Systeme mit Druckbehälter:** Bei einer Förderung in Systeme ohne Speicherbehälter ermöglichen auf der Ausgangsseite der Pumpe angeordnete Druckbehälter einen kurzzeitigen Ausgleich zwischen Zuflussmenge und Bedarfsmenge.

**Förderung in Fallleitungen:** Zur Überwindung der Reibungsverluste bei langen Zubringerleitungen kann eine Druckerhöhung mit Förderanlagen ökonomisch günstiger sein, als eine Rohrleitung mit größerer Nennweiten.

### 2.3.4.2 Anlagenkomponenten

Eine Förderanlage besteht in der Regel aus den Komponenten Pumpen, Rohrleitungen für die Systemanschlüsse der Pumpen, Armaturen für die Steuerung und Regelung sowie für die Wartung der Pumpen, Antriebsmotoren, ggf. Frequenzumrichter für die Drehzahlveränderung, ggf. Entnahmekammern sowie Mess-, Steuer- und Regeleinheiten. Die Anlagen sind üblicherweise in eigenen Gebäuden untergebracht. Im Folgenden wird näher auf die für die Rohrnetzberechnung relevante Anlagenkomponente Pumpe eingegangen.

### 2.3.4.3 Kreiselpumpen

In der Förderung werden überwiegend Kreiselpumpen eingesetzt (DVGW, 1981). Daher werden im Weiteren, vor allem für die Rohrnetzberechnung, wichtige Aspekte der Kreiselpumpen dargestellt. Für weiterführende Informationen wird auf die Fachliteratur, z.B. Bohl (2004) oder Mutschmann und Stimmelmayer (2007), verwiesen.

**Arbeitsprinzip:** In Kreiselpumpen wird Energie durch Strömungsumlenkung übertragen. In den sich drehenden Laufradschaufeln der Kreiselpumpe wird Wasser beschleunigt. Die Geschwindigkeit des Wassers wird durch Umlenkung und Querschnittsvergrößerung im Spiralgehäuse weitgehend in Druck umgewandelt (Mutschmann und Stimmelmayer, 2007).

**Förderstrom:** Der Förderstrom  $Q$  ist der durch die Kreiselpumpe strömende Durchfluss.

**Förderhöhe und Förderdruck:** Die Förderhöhe  $H$  entspricht dem Quotient aus Förderdruck  $p$ , der Dichte des geförderten Fluids  $\rho$  und der Erdbeschleunigung  $g$  und ist die von der Pumpe erwirkte Druckhöhe. Die Förderhöhe setzt sich zusammen aus dem Potentialunterschied der Saug- und Druckseite und der Druckhöhenverluste im System. Die Differenz der Geschwindigkeitshöhen ist in der Regel vernachlässigbar.

**Pumpenkennlinie, Nenndrehzahl und Drehzahl:** Die Förderhöhe hängt vom Förderstrom ab. Die Pumpenkennlinie gibt für die konstante Nenndrehzahl  $n_n$  den Zusammenhang zwischen Förderhöhe und Förderstrom an. Die Pumpenkennlinie kann für weitere Drehzahlen  $n$  über die Affinitätsgesetze umgerechnet werden (Bohl, 2004):

$$\frac{n_n}{n} = \frac{Q_n}{Q} \quad (2.1)$$

$$\frac{n_n}{n} = \left( \frac{H_n}{H} \right)^2 \quad (2.2)$$

**Betriebspunkt:** Bei Überlagerung der Systemkennlinie mit der Pumpenkennlinie ergibt der Schnittpunkt der Funktionen den Betriebspunkt mit der sich einstellenden Fördermenge und Förderhöhe.

**Förderleistung, Leistungsbedarf und Wirkungsgrad:** Die Förderleistung  $P_n$  ist die von der Pumpe erbrachte Leistung zur Druckerhöhung. Der Leistungsbedarf  $P_e$  ist die für die Erbringung der Förderleistung benötigte Leistung. Der Pumpenwirkungsgrad  $\eta_p$  gibt das Verhältnis von Förderleistung zu Leistungsbedarf im jeweiligen Betriebspunkt an (Lang und Detert, 2007). Für jede Pumpenkennlinie kann eine Leistungsbedarfslinie und eine Wirkungsgradlinie angegeben werden.

### 2.3.5 Armaturen

#### 2.3.5.1 Bauarten

Die DIN (1995a) unterscheidet die in der Wasserversorgung eingesetzten Armaturen nach der Bauart. Die Grundbauarten sind in Tabelle 2.1 genannt.

#### 2.3.5.2 Aufgaben

Armaturen werden in der Wasserversorgung für verschiedene Aufgaben eingesetzt. Dabei können Armaturen der gleichen Bauart durchaus für mehrere Aufgaben eingesetzt werden. Im Folgenden werden die wichtigsten Einsatzgebiete von Armaturen umrissen. Für eine detaillierte Darstellung der baulichen Ausführungen und Funktionsweisen wird auf die Literatur verwiesen, z.B. Wagner (2008).

Tabelle 2.1: Grundbauarten von Armaturen

Grundbauart	Arbeitsweise	Stömungsrichtung
Schieber	Geradlinige Bewegung des Abschlusskörpers	Quer zur Abschlussbewegung
Ventil	Geradlinige Bewegung des Abschlusskörpers	In Richtung der Abschlussbewegung
Hahn	Drehung des Abschlusskörpers	Durch den Abschlusskörper
Klappe	Drehung des Abschlusskörpers	Um den Abschlusskörper
Membranarmatur	Deformation eines flexiblen Bauteils	Verschiedene Ausführungen möglich

**Absperrung:** Schieber, Klappen und Hähne werden in Rohrleitungen zur Absperrung von Leitungsabschnitten eingesetzt. Die Schaltstellung der Absperrarmaturen ist entweder geschlossen oder vollständig geöffnet (DIN, 1995a).

**Regelung:** Regelarmaturen wirken über einen lokalen Druckhöhenverlust auf die Fließ- und Druckzustände ein. Dabei kann die Schaltstellung zwischen geschlossen und vollständig geöffnet sein. Regelgröße ist entweder der Druck oder der Durchfluss. Zur Regelung werden hauptsächlich Ventile, z.B. Ringkolbenventile, und Membranarmaturen aber auch Schieber verwendet.

**Rückflussverhinderung:** Rückflussverhindernde Armaturen lassen einen Durchfluss nur in eine Richtung zu und sind meist als Klappen (z.B. Rückschlagklappen) ausgeführt. Es finden aber auch Ventile, z.B. Kugelrückschlagventile, und Membranarmaturen Verwendung.

**Be- und Entlüftung:** Zur Be- und Entlüftung von Rohrleitungen werden Ventile, z.B. Doppelkammerventile mit Kugeln, eingesetzt.

**Löschwasserbereitstellung:** Hydranten sind eine Sonderform der Armaturen. Sie stellen Entnahmestellen für Löschwasser dar, die ober- oder unterirdisch angeordnet sein können.

## 2.4 Analyse und Planung von Wasserverteilungssystemen

### 2.4.1 Systemkonzepte

Die Anordnung der Behälter, der Förder- bzw. Druckerhöhungsanlagen sowie der Zubringerleitungen und Verteilungsnetze stellen das Grundkonzept eines Wasser-

verteilungssystems dar. Unabhängige Teile eines Wasserverteilungssystems können dabei durchaus entsprechend unterschiedlicher Konzepte angelegt sein. Einige wichtige Konzepte sind im Folgenden beschrieben. Dabei wird von einer Betriebsweise ausgegangen, die den gültigen anerkannten Regeln der Technik<sup>1</sup> entsprechen (s. Kap. 2.5.2).

**Direkte Förderung in das Verteilungsnetz:** Zwischen Zubringerleitung und dem Verteilungsnetz des Versorgungsgebietes ist kein Durchlaufbehälter angeordnet. Das Wasser wird über die Zubringerleitung mittels Druckerhöhung oder Gravitation direkt in das Verteilungsnetz eingespeist. Soll konstant in das Versorgungsgebiet gefördert werden, kann für den Ausgleich der Bedarfsschwankungen ein Gegenbehälter genutzt werden. Außerdem sind für den Ausgleich der Bedarfsschwankungen verschiedene Regelungstechniken oder der Einsatz eines Windkessels möglich.

**Trennung des Zubringersystems vom Verteilungsnetz:** Die Anordnung eines Durchlaufbehälters zwischen der Zubringerleitung und dem Verteilungsnetz trennt das Drucknetz hydraulisch. Der Durchlaufbehälter speist mit der Schwerkraft des Wassers in das Verteilungsnetz ein und gleicht über das vorgehaltene Volumen die Bedarfsschwankungen im Versorgungsgebiet aus. Bei entsprechender Dimensionierung des Behälters ermöglicht dieses Konzept einen von den Bedarfsschwankungen im Versorgungsgebiet unabhängigen Betrieb der Behälterbefüllung.

**Druckzonen:** Druckzonen sind vom übrigen Verteilungsnetz hydraulisch getrennte Versorgungsgebiete, die über ein Zubringersystem versorgt werden. Meist werden Druckzonen entsprechend der topographischen Gegebenheiten und der möglichen Zubringersysteme angelegt.

### 2.4.2 Bemessung des Rohrleitungsnetzes

Maßgebende Parameter der Bemessung eines Rohrleitungsnetzes sind der Planungshorizont, die Durchflussmengen, die zulässigen Fließgeschwindigkeiten sowie die minimalen und maximalen Druckhöhen.

**Planungshorizont:** Rohrleitungsnetze werden in der Regel für einen relativ langen Zeitraum von ca. 50 Jahren ausgelegt. Um Änderungen des Wasserbedarfs und Unsicherheiten in dessen Schätzung sowie der räumlichen Entwicklung Rechnung zu tragen, ist es zweckmäßig bei der Auslegung von Rohrleitungsnetzen Erweiterungs- und Ausbaukonzepte zu berücksichtigen.

---

<sup>1</sup>In Deutschland sind die anerkannten Regeln der Technik durch die Normen des Deutschen Instituts für Normung e.V. (DIN) und durch die Arbeitsblätter des DVGW festgelegt.

**Durchflussmengen:** Die maßgebenden Durchflussmengen ergeben sich aus dem Wasserbedarf bei bestimmten Betriebszuständen (s. auch Kap. 2.4.3). Bei der Bemessung wird außerdem die Funktion der Leitung berücksichtigt. Nach DVGW (2004) werden Hausanschlussleitungen für den Spitzendurchfluss in 10 Sekunden, Haupt- und Versorgungsleitungen für den Spitzendurchfluss in einer Stunde bemessen. Zubringerleitungen werden unter der Berücksichtigung des Systemkonzepts und der damit zusammenhängenden Betriebsweise für den Spitzendurchfluss in einer Stunde ausgelegt.

**Fließgeschwindigkeiten:** Die Fließgeschwindigkeiten im Rohrleitungsnetz sind hinsichtlich Stagnation und Wirtschaftlichkeit (Druckverluste), hohe Geschwindigkeitsänderungen hinsichtlich dynamischer Druckänderungen von Bedeutung. Die DVGW (2004) gibt für die Bemessung Richtwerte.

**Drücke:** Nach DVGW (2004) und DIN (1983) werden der Systembetriebsdruck (Design Pressure,  $DP$ ), der höchste Systembetriebsdruck (Maximum Design Pressure,  $MDP$ ), der Betriebsdruck (Operating Pressure,  $OP$ ) und der Versorgungsdruck (Service Pressure,  $SP$ ) voneinander abgegrenzt. Der Systembetriebsdruck  $DP$  ist der höchste festgelegte Betriebsdruck ohne Berücksichtigung von Druckstößen. Der Systembetriebsdruck  $DP$  sollte ca. 2,00 bar unter dem höchsten Systembetriebsdruck  $MDP$  liegen, um eine genügend große Reserve zur Kompensation von Druckstößen zur Verfügung zu haben. Der höchste Systembetriebsdruck  $MDP$  ist der höchste festgelegte Betriebsdruck unter Berücksichtigung von Druckstößen. Der  $MDP$  wird als  $MDP_a$  bezeichnet, wenn der Druckstoßwert angenommen und als  $MDA_c$ , wenn der Druckstoßwert berechnet wird. Verteilungsnetze sind mindestens für einen  $MDP$  von ca. 10,00 bar auszulegen. Der Betriebsdruck  $OP$  ist der Druck an einer bestimmten Stelle im System zu einem bestimmten Zeitpunkt. Der Versorgungsdruck  $SP$  ist der Druck an der Übergabestelle zum Verbraucher bei Nulldurchfluss. Der erforderliche Versorgungsdruck  $SP$  soll in Abhängigkeit der überwiegenden Geschoszahl der Bebauung 2,00 bar bis 4,00 bar nicht unterschreiten und 6,00 bar nicht überschreiten.

### 2.4.3 Wasserbedarf

#### 2.4.3.1 Terminologie und Definitionen

**Wasserbedarf:** Nach DIN (1983) ist der Wasserbedarf  $Q$  ein Planungswert für die in einer bestimmten Zeitspanne benötigte Wassermenge, die ein Wasserversorgungssystem unter Einhaltung der Versorgungskriterien liefern muss. Dabei wird zwischen Trinkwasserbedarf, Betriebswasserbedarf, Haushaltswasserbedarf, Löschwasserbedarf, Bewässerungsbedarf usw. unterschieden.

Die DVGW (2007) definiert bzgl. des Wasserbedarfs weitere Begriffe. Der jährliche Wasserbedarf  $Q_a$  [ $m^3/a$ ] bezeichnet die gesamte in einem Jahr benötigte Wassermenge. Der mittlere Tagesbedarf  $Q_{dm}$  [ $m^3/d$ ] bezeichnet den durchschnittlichen Tagesbedarf in einem Betrachtungszeitraum. Der mittlere Tagesbedarf ergibt sich aus der

Anzahl der Einwohner  $E$  und dem mittleren einwohnerbezogenen Tagesverbrauch  $q_{dm}$  [ $l/d/E$ ] oder dem jährlichen Wasserbedarf.

$$Q_{dm} = \frac{q_{dm} \cdot E}{1000} = \frac{Q_a}{365} \quad (2.3)$$

Der maximale Tagesbedarf  $Q_{dmax}$  [ $m^3/d$ ] bezeichnet den höchsten Tagesbedarf in einem Betrachtungszeitraum. Der Tageszeit abhängige Stundenbedarf  $Q(h)$  [ $m^3/h$ ] bezeichnet den Bedarf zur Stunde  $h$  an einem bestimmten Tag. Der mittlere Stundenbedarf  $Q_{hm}$  [ $m^3/h$ ] bezeichnet den durchschnittlichen Stundenbedarf am Tage des mittleren Wasserbedarfs.

$$Q_{hm} = \frac{Q_{dm}}{24} \quad (2.4)$$

Der maximale Stundenbedarf  $Q_{hmax}$  [ $m^3/h$ ] bezeichnet den höchsten Stundenbedarf am Tag des höchsten Wasserbedarfs. Der maximale Stundenbedarf ergibt sich aus der Anzahl der Einwohner  $E$  und dem maximalen einwohnerbezogenen Stundenverbrauch  $q_{hmax}$  [ $l/d/E$ ].

$$Q_{hmax} = \frac{q_{hmax} \cdot E}{1000} \quad (2.5)$$

Der maximale Stundenbedarf am Durchschnittstag  $Q_{hmax, dm}$  [ $m^3/h$ ] bezeichnet den höchsten Stundenbedarf am Tage mit durchschnittlichem Wasserbedarf. Aus dem Quotienten von maximalem Stunden- und Tagesbedarf wird der maximale Stundenprozentwert  $st_{max}$  [%] gebildet.

$$st_{max} = \frac{Q_{hmax}}{Q_{dmax}} \cdot 100 \quad (2.6)$$

Statt der Einheiten Kubikmeter pro Jahr, Tag oder Stunde [ $m^3/a, d$  o.  $h$ ] wird auch die Einheit Liter pro Sekunde [ $l/s$ ] verwendet.

**Wasserverbrauch:** In Abgrenzung zum Wasserbedarf als prognostiziertem Planungswert ist der Wasserverbrauch die tatsächlich konsumierte Wassermenge.

**Wasserdargebot:** Das Wasserdargebot ist die in einer bestimmten Zeiteinheit für die Wasserversorgung nutzbare Wassermenge (Mutschmann und Stimmelmayer, 2007).

**Bezugszeit und Spitzendurchfluss:** Die Bezugszeit  $t_B$  [ $s, min, h$  o.  $d$ ] ist gleichbedeutend mit der Zeitspanne, in der eine bestimmte Wassermenge für die Wasserversorgung benötigt wird. Für die Bemessung eines Wasserverteilungssystems ist der sich daraus ergebende Spitzendurchfluss  $Q_S$  [ $m^3/h$  o.  $l/s$ ] maßgebend (s. Kap. 2.4.2). Bei gegebener benötigter Wassermenge ergibt sich der Spitzendurchfluss aus der für die Bemessung gewählten Bezugszeit. Die Bezugszeit ist daher für die Bemessung die entscheidende Größe (DVGW, 2007).

**Lastfaktoren:** Die DVGW (2007) definiert allgemein als dimensionslosen Skalierungsfaktor für den Stundenbedarf den Tageszeit abhängigen Lastfaktor  $f(h)$  als den Quotient aus Tageszeit abhängigem Stundenbedarf  $Q(h)$  und mittlerem Stundenbedarf  $Q_{hm}$ .

$$f(h) = \frac{Q(h)}{Q_{hm}} \quad (2.7)$$

Analog ist der Tagesspitzenfaktor  $f_d$  als Quotient aus dem maximalen Tagesbedarf  $Q_{dmax}$  und dem mittleren Tagesbedarf  $Q_{dm}$ , und der Stundenspitzenfaktor  $f_h$  als Quotient aus dem maximalen Stundenbedarf  $Q_{hmax}$  und dem mittleren Stundenbedarf  $Q_{hm}$  definiert.

$$f_d = \frac{Q_{dmax}}{Q_{dm}} \quad (2.8)$$

$$f_h = \frac{Q_{hmax}}{Q_{hm}} \quad (2.9)$$

### 2.4.3.2 Wasserbedarfsschwankungen

Der Bedarf an Trinkwasser schwankt zeitlich. Bezogen auf die Zeiteinheiten Jahr, Monat, Tag und Stunde lassen sich bestimmte Charakteristika der Bedarfsschwankungen erkennen. Während die Menge der Wasserabgabe hauptsächlich von den Faktoren Dargebot, Qualität, Preis und Wasserverluste abhängt, werden zeitliche Bedarfscharakteristika - auch Bedarfsganglinien genannt - wesentlich durch folgende Einflussfaktoren bedingt (Karger u. a., 2005; Mutschmann und Stimmelmayer, 2007):

- Klima
- Kultur und Religion
- Wirtschaftliche und gesellschaftliche Struktur des Versorgungsgebiets
- Größe des Versorgungsgebiets
- Besondere Ereignisse

Die Schwankungen des Wasserbedarfs pro Jahr hängen unter anderem von den klimatischen Bedingungen ab. In trockenen Jahren werden durchaus größere Mengen Wasser konsumiert. Faktoren wie die Veränderung der Gesellschaftsstruktur, Anzahl der Einwohner usw. dominieren jedoch die auf ein Versorgungsgebiet bezogenen Schwankungen. Allerdings lassen sich Wasserabgaben bei veränderter Struktur des Versorgungsgebiets nicht mehr im eigentlichen Sinne vergleichen und daraus Schwankungen ableiten.

Von größerer Bedeutung für die Planung und den Betrieb eines Wasserversorgungssystems sind die Schwankungen des Wasserbedarfs pro Monat. Diese Schwankungen sind hauptsächlich auf das Klima (Winter/Sommer, Regenzeit/Trockenzeit usw.) zurückzuführen. Auch kulturelle oder religiöse Hintergründe sowie besondere

Ereignisse wie Großveranstaltungen können von Bedeutung sein. So ist z.B. in muslimisch geprägten Ländern das Verbraucherverhalten während des Ramadans vom Verhalten während der übrigen Monaten verschieden.

Die wesentlichen Faktoren für die Schwankung des Tagesverbrauchs sind die Größe und Struktur des Versorgungsgebiets. Der Tagesspitzenfaktor  $f_d$  ist umso größer, je kleiner das Versorgungsgebiet ist. Geringere industrielle und gewerbliche Anteile am Wasserverbrauch wirken sich auf den Tagesspitzenfaktor verringernd aus. Weitere dominante Einflüsse sind die Temperatur und der Wochentag. Bzgl. des Wochentags wirken sich hauptsächlich arbeitsfreie Tage aus. Der Unterschied zwischen geringerem Verbrauch an arbeitsfreien Tagen und größerem Verbrauch an Werktagen ist um so deutlicher, je größer das Versorgungsgebiet und der gewerbliche und industrielle Anteil am Verbrauch sind.

Die stündlichen Schwankungen des Wasserbedarfs sind erheblich und werden hauptsächlich durch die Größe und Struktur des Versorgungsgebiets beeinflusst. Je größer das Gebiet und je größer der gewerbliche und industrielle Anteil am Verbrauch, desto kleiner die Schwankungen des Stundenspitzenfaktors  $f_h$ . An arbeitsfreien Tagen ist die Charakteristik der Schwankungen nahezu gleich, jedoch ist die Schwankungsbreite geringer. Typische Tagesganglinien weisen Verbrauchsspitzen zur Aufstehzeit und zur Mittagszeit sowie eine weniger ausgeprägte Spitze zur Abendzeit auf (Karger u. a., 2005).

### 2.4.3.3 Wasserbedarfsermittlung

Der Wasserbedarf als Planungsgröße stellt die zukünftig über das Verteilungssystem bereit zu stellende Wassermenge und Entnahmecharakteristik dar. Die Abschätzung des zukünftigen Wasserbedarfs wird zweckmäßig auf eine Ermittlung des aktuellen Wasserbedarfs und der aktuellen Bedarfscharakteristik basiert. Über Ablesungen an fest installierten Zählern im Zubringersystem oder an Versorgungsbehältern kann die aktuelle Einspeisemenge in ein Versorgungsgebiet ermittelt werden. Über Zählerablesungen oder temporäre Durchflussmessungen im Wasserverteilungssystem kann die Rohrnetzeinspeisung in ein bestimmtes hydraulisch abgeschlossenes Versorgungsgebiet (Sektor) ermittelt werden. Verbrauchsabrechnungen und Zählerablesungen beim Abnehmer geben Aufschluss über die tatsächliche Wasserabgabe  $Q_A$ .

Die Abschätzung des zukünftigen Bedarfs erfolgt üblicherweise über pauschal angenommene Bedarfswerte für Verbrauchergruppen, die auf ein bestimmtes Szenario projiziert werden. Hierfür werden spezifische Basiswerte aus der Literatur für Verbrauchergruppen mit Faktoren für die jeweils relevanten Stunden- und Tageswerte skaliert. In die Faktoren gehen die in Kapitel 2.4.3.2 beschriebenen Einflüsse ein. Die DVGW (2007) gibt den Faktor in Abhängigkeit der Größe des Versorgungsgebiets an. Für Versorgungsgebiete mit über 1000 Einwohnern  $E$  gelten für den Tagesspitzenfaktor  $f_d$  und den Stundenspitzenfaktor  $f_h$ :

$$f_d = 3,90 \cdot E^{-0,0752} \quad (2.10)$$

$$f_h = 18,10 \cdot E^{-0,1682} \quad (2.11)$$

Weiter werden Basiswerte für die Ermittlung des Wasserbedarfs von Gewerbe und Industrie, Hotels, Krankenhäusern usw. sowie typische Bedarfsganglinien von Versorgungsgebieten verschiedener Größe angegeben.

### 2.4.3.4 Wasserverschwendung

Wasserverschwendung findet beim privaten Abnehmer, bei öffentlichen Abnehmern und an öffentlichen Zapfstellen statt (Niemeyer u. a., 1994). Die Wasserverschwendung ist daher im Sinne der in Kapitel 2.4.4 gegebenen Definition von Wasserverlusten in der Wasserbilanz nicht den Wasserverlusten, sondern dem Wasserbedarf zuzuordnen. Weitere Betrachtungen hierzu finden sich in Kapitel 2.4.4.1.

Bei privaten Verbrauchern wird Wasser hauptsächlich durch undichte Armaturen und Leitungen und durch offen gelassene Absperrhähne verschwendet. Die häufig intermittierende Versorgung in Entwicklungsländern kann eine zusätzliche Verschwendung bei den privaten Abnehmern verursachen (s. Kap. 4). Intermittierende Versorgung macht eine häusliche Speicherung des Wassers notwendig. Die privaten Speicherbehälter werden vom Verbraucher oft zu Zeiten der Beschickung entleert, um Raum für frisches Wasser zu schaffen. Außerdem sind diese Anlagen meist nicht gegen Überlaufen gesichert und schlecht gewartet.

Bei öffentlichen Verbrauchern steht der eigentliche Verbraucher meist nicht direkt in der Verantwortung. Die entstehenden Gebühren für den Wasserverbrauch werden nicht von ihm getragen. Dadurch kann das Bewusstsein für den sparsamen Umgang mit Wasser eingeschränkt sein. Zudem fördern fehlende Zähler oder Gebührenfreiheit die Wasserverschwendung.

Bei öffentlich zugänglichen Zapfstellen kann ebenfalls die Verantwortung des eigentlichen Verbrauchers fehlen. Undichte Armaturen, falsche Bedienung und teilweise mutwillige Zerstörungen können ursächlich für Wasserverluste und Wasserverschwendung sein. Die intermittierende Versorgung der Zapfstelle kann ebenfalls zur Wasserverschwendung führen. Zu Zeiten, in denen keine Beschickung stattfindet, werden u.U. Absperrhähne nicht geschlossen oder Behälter zur Befüllung bereit gestellt, die dann bei Beschickung überlaufen können.

## 2.4.4 Wasserverluste

### 2.4.4.1 Mengenbetrachtung

Bei einer Bilanzierung der Wassermengen  $Q$  in einem Wasserverteilungsnetz wird üblicherweise die Einheit Kubikmeter pro Jahr [ $m^3/a$ ] verwendet. Der Anteil der gesamten in ein Rohrnetz eingespeisten Wassermenge (Rohrnetzeinspeisung)  $Q_N$ , der tatsächlich den Verbraucher erreicht, wird als Rohrnetzabgabe  $Q_A$  bezeichnet. Die Differenz zwischen der Rohrnetzeinspeisung  $Q_N$  und der Rohrnetzabgabe  $Q_A$  stellt die Wasserverluste  $Q_V$  in einem Wasserverteilungssystem dar (DVGW, 2003).

$$Q_N = Q_A + Q_V \quad (2.12)$$

Es wird zwischen der in Rechnung gestellten Rohrnetzabgabe  $Q_{AI}$  und der nicht in Rechnung gestellten Rohrnetzabgabe  $Q_{AN}$  für z.B. Löschwasser und Leitungsspülungen unterschieden. Für eine Wassermengenbilanz ist die Abgrenzung von gemessener und nicht gemessener Rohrnetzabgabe relevant. Bei den Wasserverlusten  $Q_V$  werden die scheinbaren Wasserverluste  $Q_{VS}$  und die realen Wasserverluste  $Q_{VR}$  unterschieden. Die scheinbaren Wasserverluste beinhalten Zählerabweichungen oder Fehler bei der Ablesung von Zählern, Schleichverluste und Wasserdiebstahl. Zu den realen Wasserverlusten werden Verluste gezählt, die in Zubringerleitungen, an Behältern, in Haupt- und Versorgungsleitungen sowie in Anschlussleitungen bis zum Hauswasserzähler entstehen.

$$Q_A = Q_{AI} + Q_{AN} \quad (2.13)$$

$$Q_V = Q_{VS} + Q_{VR} \quad (2.14)$$

Die dem Kunden in Rechnung gestellte Wasserabgabe  $Q_{IR}$  entspricht der gemessenen und der nicht gemessenen in Rechnung gestellten Rohrnetzabgabe  $Q_{AI}$ . Die nicht in Rechnung gestellte Wasserabgabe  $Q_{NR}$  setzt sich aus den Wasserverlusten  $Q_V$  und der nicht in Rechnung gestellten Rohrnetzabgabe  $Q_{AN}$  zusammen.

$$Q_N = Q_{IR} + Q_{NR} \quad (2.15)$$

$$Q_{IR} = Q_{AI} \quad (2.16)$$

$$Q_{NR} = Q_{AN} + Q_V \quad (2.17)$$

Im internationalen Sprachgebrauch wird die nicht in Rechnung gestellte Wasserabgabe  $Q_{NR}$  meist als *non-revenue water (NRW)* bezeichnet (IWA, 2000).

### 2.4.4.2 Abgrenzung von Wasserverlusten und Wasserverschwendung

Wasserverschwendung kann nicht direkt als Wasserverlust definiert werden. Allerdings ist eine klare Abgrenzung schwierig. Meist wird unter der Wasserverschwendung der nicht sinnvolle und exzessive Verbrauch von Wasser verstanden (Niemeyer u. a., 1994). Eine eindeutige und international gebräuchliche Definition gibt es allerdings nicht. Aus ökonomischer und hydraulischer Sicht wird bei der Erstellung einer Wassermengenbilanz die verschwendete Menge meist als Teil der konsumierten Menge betrachtet. Für die Analyse einer bestehenden Wasserversorgung kann es aber wichtig sein, die verschwendete Wassermenge gesondert zu betrachten. Aus ökologischer und versorgungstechnischer Sicht ist die verschwendete Menge dann sinnigerweise den Wasserverlusten zuzuordnen.

### 2.4.4.3 Hydraulik von Leckagen

Die Hydraulik einer Leckage in einer Druckleitung wird üblicherweise wie die Hydraulik einer Blende beschrieben (van Zyl und Clayton, 2007). Es wird davon ausgegangen, dass die potentielle Energie in Form von Druck vollständig in kinetische

Energie umgewandelt wird. Für den Durchfluss bei gegebener Druckdifferenz gilt folgender Zusammenhang (Zoebl und Kruschik, 1978):

$$q = A \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_o} \quad (2.18)$$

Der Durchfluss  $q$  entspricht dabei dem realen Wasserverlust  $q_{VR}$  der Leckage.  $A$  ist die Fläche der Öffnung und  $\sqrt{2 \cdot g \cdot h_o}$  die Austrittsgeschwindigkeit mit dem Ortsfaktor  $g$  und der Druckdifferenz an der Blende  $h_o$ . Der Koeffizient  $\mu$  beschreibt die Öffnung, die Kontraktion und die Reibungserscheinungen im Austrittsquerschnitt.  $A \cdot \mu$  ist somit der tatsächlich wirksame Querschnitt der Öffnung.

Gleichung 2.18 kann allgemeiner wie folgt ausgedrückt werden (van Zyl und Clayton, 2007):

$$q = c \cdot h^\alpha \quad (2.19)$$

Dabei ist  $c$  der Leckagekoeffizient,  $\alpha$  der Leckageexponent,  $q$  der Durchfluss und  $h$  die Druckdifferenz. Bei anstehendem Atmosphärendruck und hohen Reynoldszahlen ist der Exponent gleich 0,50. Für Düsen oder Sprinkler (Emitter) gilt daher  $q = c \cdot \sqrt{h}$  oder in der gebräuchlichen Schreibweise nach DIN (1997):

$$Q = k \cdot \sqrt{H} \quad (2.20)$$

In Gleichung 2.18 ist die austretende Wassermenge  $q$  durch den an der Öffnung auftretenden Druckverlust  $h_o$  bestimmt. Normalerweise sind Rohrleitungen jedoch unterirdisch verlegt. Walski u. a. (2004, 2006) berücksichtigen die bei der Durchströmung des anstehenden Bodens auftretenden Druckverluste  $h_b$  und definieren die *orifice/soil number* ( $OS$ ).  $OS$  ist das Verhältnis der Druckverluste  $h_o$  und  $h_b$  und beschreibt die Dominanz der in der Öffnung und im anstehenden Boden auftretenden Druckverluste. Weiter stellen Walski u. a. (2006) fest, dass in den meisten realen Fällen  $h_o$  dominiert ( $OS > 4$ ) und Gleichung 2.18 gilt.

Weiter spielt das Material der Rohrleitung und die Art des Lecks (runde Löcher, längliche Risse, durch Korrosion entstandene Löcher usw.) eine Rolle. Höhere Drücke können außerdem zu einer Aufweitung der Öffnung führen. Greyvenstein und van Zyl (2007) sowie van Zyl und Clayton (2007) geben experimentell ermittelte Werte für den Exponenten  $\alpha$  in Abhängigkeit des Materials, des anstehenden Bodens und des Wasserverbrauchs an.

#### 2.4.4.4 Gesellschaftliche Bedingungen

Neben den technischen Randbedingungen, die im folgenden Kapitel detaillierter dargestellt sind, wird die Höhe der Wasserverluste (und Wasserverschwendung) von legislativen, soziologischen und traditionellen, ökonomischen und administrativen Randbedingungen beeinflusst (Niemeyer u. a., 1994).

**Gesetzliche Bedingungen:** Häufig unzureichende gesetzliche Bestimmungen in Entwicklungsländern führen zu überhöhtem, oft unkontrolliertem Verbrauch mit Auswirkungen auf das technische System, den Wasserhaushalt und im Endeffekt auf die Höhe der Wasserverluste und Wasserverschwendung.

**Soziologische Bedingungen:** Die Akzeptanz des Trinkwassersystems durch die Verbraucher ist notwendige Voraussetzung für eine nachhaltige Wasserversorgung. Dazu gehören ein Verantwortungsbewusstsein gegenüber dem technischen System, ein angepasstes Konsumverhalten, die Bereitschaft für die erbrachten Leistungen zu bezahlen und der sparsame Umgang mit der Ressource Wasser.

**Traditionelle Bedingungen:** In Entwicklungsländern wird die mit einer Verbesserung der Versorgungssituation zusammenhängende Leistung oft nicht erkannt. Die Verbraucher sind daher nicht bereit für die Leistung zu bezahlen und das Versorgungssystem in seiner Funktionsweise zu akzeptieren. Illegale Anschlüsse und ökonomische Defizite führen letztendlich zu hohen Wasserverlusten. Mangelndes Wissen um die Sensibilität des technischen Systems verstärkt das Problem.

**Ökonomische und administrative Bedingungen:** Ein wirtschaftliches Arbeiten des Betreibers eines Wasserversorgungssystems ist notwendige Voraussetzung für eine nachhaltige und sichere Wasserversorgung. Wird in Entwicklungsländern unter Berücksichtigung der Zuwendungen von Staat oder Geldgebern nicht zumindest eine für den Betrieb kostendeckende Tarifbildung angestrebt, ist eine Wartung und Instandhaltung nicht möglich. Desolate Infrastruktur und hohe Wasserverluste sind die Folge. Für einen nachhaltigen Betrieb sind des Weiteren gut ausgebildetes Personal mit einer angepassten Vergütung sowie eine gut organisierte Verwaltung auf lokaler, regionaler und nationaler Ebene notwendig.

### 2.4.4.5 Technische Bedingungen

**Reale Wasserverluste:** Reale Wasserverluste entstehen bei der Wassergewinnung und -aufbereitung, dem Rohwassertransport, im Wasserverteilungssystem sowie beim Verbraucher. Ursachen für reale Wasserverluste im Wasserverteilungssystem sind meist Schäden am Leitungsnetz (Rohrbrüche, Lochbildung, undichte Anlagenteile). Diese Schäden haben im Wesentlichen folgende direkte Ursachen (IWA, 2000; Niemeyer u. a., 1994):

- Verlege- und Materialfehler
- Alterung
- mechanische Einwirkungen wie Bodenaustrocknung und Frost
- Korrosion

Indirekte Ursachen für Schäden, sind die Folgen von Mängeln in der Planung und im Betrieb (s. Kap. 4):

- mangelhafte Planung
- mangelhafter Betrieb

Die Wasserverlustmenge wird wesentlich durch folgende Faktoren beeinflusst (Niemeyer u. a., 1994):

- Werkstoff, Korrosionsschutz, Verlegetiefe und Bettung des Rohres
- anstehender Boden
- Länge und mittlerer Durchmesser des Rohrnetzes
- Anschlussdichte
- Dichte der Armaturen
- Betriebsweise und Versorgungsdruck

**Scheinbare Wasserverluste:** Scheinbare Wasserverluste im Wasserverteilungssystem haben im Wesentlichen folgende Ursachen (Niemeyer u. a., 1994):

- Messfehler (Zählerträgheit, -ungenauigkeit und -defekt, Schleichverluste, Ablesefehler)
- Fehler in der Gleichzeitigkeit der Ablesungen
- Fehler bei der Schätzung nicht gemessener Abgaben
- Nicht gemessene Abgaben (Löschwasser, Spülwasser, Reinigungswasser, Bewässerung usw.)
- Illegale Entnahme

## 2.5 Technischer Betrieb von Wasserverteilungssystemen

### 2.5.1 Aufgaben

Unter dem Begriff des technischen Betriebs wird in dieser Arbeit zunächst analog zur Auffassung der DVGW (2006b) das Bedienen, Steuern und Regeln sowie das Beobachten, Überwachen, Kontrollieren und Dokumentieren im Rahmen der Betriebsführung der technischen Anlagen zur Wasserverteilung verstanden. In Abweichung zur DVGW ist die Instandhaltung als Teil der operativen Ebene in dieser Arbeit ebenfalls dem technischen Betrieb zugeordnet. Wirtschaftliche und organisatorische Aspekte fallen nicht in die hier getroffene Begriffsbestimmung.

Wasserverteilungssysteme sind derart zu betreiben, dass die in Kapitel 2.2.1 genannten Aufgaben der Wasserversorgung erfüllt werden. Um diese Ziele nachhaltig zu gewährleisten sind die anerkannten Regeln der Technik sowie die geltenden Rechtsvorschriften einzuhalten. Störungen bei der Bereitstellung von Wasser sind zu minimieren und der Zustand der technischen Anlagen ist nach dem Prinzip der Nachhaltigkeit zu erhalten.

Aus den genannten Anforderungen ergeben sich folgende grundlegende Aufgaben:

- Die technischen Anlagen eines Wasserverteilungsnetzes sind entsprechend ihrer Konzeption und der anerkannten Regeln der Technik zu betreiben.
- Die Anlagen und das Betreiben der Anlagen sind zu überwachen.
- Die Funktionsfähigkeit der Anlagen ist zu erhalten.
- Wasserverluste sind zu minimieren.
- Relevante Informationen über die Anlagen und deren Betrieb sind zu dokumentieren und regelmäßig zu aktualisieren.

Auf Aspekte der Betriebsweise, der Instandhaltung, der Wasserverlustreduktion und der Datenhaltung wird wegen ihrer Bedeutung für die Thematik dieser Arbeit in den folgenden Kapiteln näher eingegangen.

### 2.5.2 Betriebsweise

Gemäß seiner technischen Konzeption ist das Rohrleitungsnetz ständig unter Druck zu betreiben, d.h. die Rohrleitungen sind ständig mit Wasser voll gefüllt zu halten. Aus Sicht des Abnehmers besteht eine kontinuierliche Versorgung. Die Systemkomponenten müssen derart ausgelegt sein, dass zu jeder Zeit der Transport der erforderlichen Wassermenge, die sich in der Menge, der Zeit und der Lokalität aus dem Wasserverbrauch (auch Löschwasser) ergibt, gewährleistet ist. Dabei sind Grenzen bzgl. des Leitungsdrucks, der Fließgeschwindigkeiten und der Aufenthaltszeiten des Wassers einzuhalten (s. Kap. 2.4.2).

Die Druck- und Fließgeschwindigkeitsgrenzen richten sich nach Kriterien der Materialfestigkeit und Wirtschaftlichkeit sowie der Wasserentnahme beim Verbraucher (notwendiger Versorgungsdruck). Auch um die Qualität des eingespeisten Wassers während des Transports nicht negativ zu beeinflussen, sind bestimmte Leitungsdrücke nicht zu unterschreiten sowie bestimmte Aufenthaltszeiten nicht zu überschreiten.

Werden zentrale, für eine kontinuierliche Versorgung konzipierte Wasserverteilungssysteme nicht entsprechend ihrer Konzeption betrieben, können die Anforderungen an die bereitzustellende Wassermenge und Wasserqualität sowie an den Versorgungsdruck nicht erfüllt werden. Abweichende, vor allem in Entwicklungsländern praktizierte Betriebsweisen werden in den Kapiteln 4 und 5 diskutiert. Die damit verbundenen Probleme sind insbesondere in Kapitel 4.5.4 dargestellt.

### 2.5.3 Instandhaltung

#### 2.5.3.1 Terminologie und Definitionen

**Instandhaltung:** Unter Instandhaltung wird die Kombination aller technischer, administrativer und betriebswirtschaftlicher Maßnahmen zur Erhaltung der Funktionsfähigkeit eines Wasserversorgungssystems oder die Rückführung in einen funktionsfähigen Zustand verstanden (DIN, 2003). Gemäß DIN (2003) werden dabei die vier Grundmaßnahmen Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung voneinander abgegrenzt. Die DVGW (2006b) fasst die Grundmaßnahmen Instandsetzung

und Verbesserung zusammen und gliedert diese in Rehabilitation und nicht planbare Reparatur. Die Rehabilitation umfasst die Reinigung, Sanierung, Erneuerung und planbare Reparatur (s. Abb. 2.3). Analog werden Instandsetzung und Verbesserung von Roscher (2000) zusammengefasst und in planbare (Rehabilitation) und nicht planbare Maßnahmen (Reparatur) unterteilt.

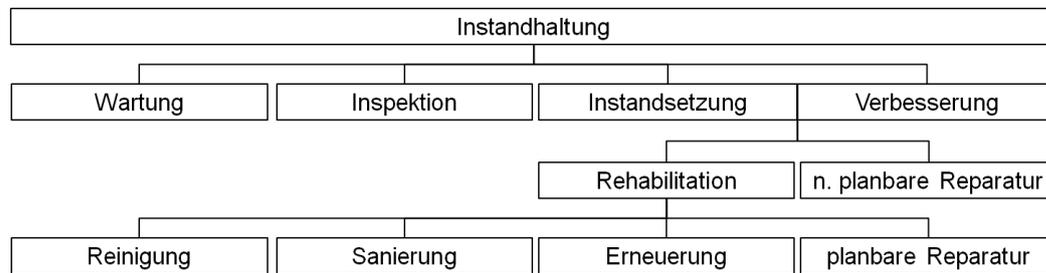


Abbildung 2.3: Instandhaltung und Grundmaßnahmen

**Wartung:** Roscher (2000) beschreibt die Wartung als die Bewahrung des Sollzustands. Laut DIN (2003) fasst die Wartung die Maßnahmen zur Verzögerung der Abnutzung der Systemelemente zusammen.

**Inspektion:** Roscher (2000) beschreibt die Inspektion als die Beurteilung des Ist-Zustands. Laut DIN (2003) umfasst die Inspektion alle Maßnahmen zur Analyse des Ist-Zustands der Systemelemente einschließlich der Ursachen möglicher Abnutzung und Beschreibung der Konsequenzen für die Aufgaben des Versorgungssystems.

**Instandsetzung:** Roscher (2000) beschreibt die Instandsetzung als die Wiederherstellung des Sollzustands. Die Wiederherstellung umfasst bei der DVGW (2006b) und Roscher (2000) auch Verbesserungsmaßnahmen. Die DIN (2003) versteht unter der Instandsetzung Maßnahmen zur Wiederherstellung des funktionsfähigen Zustands mit Ausnahme von Verbesserungen. Verbesserungsmaßnahmen werden als eigenständige Grundmaßnahme betrachtet.

**Verbesserung:** Laut DIN (2003) wird die Kombination aller technischen, administrativen und betriebswirtschaftlichen Maßnahmen zur Verbesserung der Funktionsfähigkeit des Systems als Verbesserung bezeichnet. Die DVGW (2006b) fasst die Maßnahmen der Verbesserung und Instandsetzung zusammen.

**Reparatur (nicht planbare Maßnahmen):** Unter der Reparatur werden einzelne Maßnahmen zur Behebung von Schäden verstanden (DVGW, 1997). Reparaturmaßnahmen sind naturgemäß nicht planbar.

**Rehabilitation (planbare Maßnahmen):** Die Rehabilitation umfasst alle Maßnahmen zur Erhaltung der Funktionsfähigkeit bestehender Systeme. Die DVGW (1997) zählt auch Maßnahmen zur Verbesserung der Funktionsfähigkeit bestehender Systeme zur Rehabilitation. Die Rehabilitation schließt alle Methoden der Reinigung, Sanierung und Erneuerung ein (DVGW, 1997, 2006b). Unter der Reinigung wird das Entfernen von Ablagerungen, Inkrustationen und Auskleidungen mittels mechanischer (z.B. Kratzen) und hydraulischer (z.B. Spülen) Verfahren verstanden. Unter der Sanierung wird die Ertüchtigung einer vorhandenen Rohrleitung durch Auskleidungs- und Reliningverfahren verstanden. Unter der Erneuerung wird der Ersatz einer bestehenden Rohrleitung durch eine neue Rohrleitung verstanden. Dabei kommen grabenlose oder offene Verlegungsverfahren zum Einsatz.

**Rehabilitation im internationalen Sprachgebrauch:** Der Begriff Rehabilitation wird im internationalen Sprachgebrauch und hier besonders im Kontext der Entwicklungszusammenarbeit oft als Überbegriff für die Ertüchtigung eines Mängel aufweisenden Wasserversorgungssystems verstanden. Dabei werden Maßnahmen, die die Netzstruktur und die Systemkonzeption betreffend, auch der Rehabilitation zugeordnet. In dieser Arbeit wird der Begriff gemäß der o.g. Definition verwendet.

### 2.5.3.2 Aufgaben der Instandhaltung

Bei der Wasserversorgung sind eine störungsminimierte und nachhaltige Wasserlieferung anzustreben. Dabei sind die geltenden Rechtsvorschriften und die anerkannten Regeln der Technik einzuhalten. Für die Erfüllung dieser Aufgaben ist die Instandhaltung von großer Bedeutung und hat folgende wesentliche Ziele (DVGW, 2006b):

- Garantie einer adäquaten Wasserqualität
- Minimierung der Wasserverluste
- Garantie des notwendigen Versorgungsdrucks
- Minimierung der Versorgungsunterbrechungen
- Minimierung der Rohrschäden
- Beseitigung von Schäden und Mängeln
- Erhaltung der Substanz und Optimierung der Nutzungsdauer
- Umweltverträglichkeit der Maßnahmen
- Optimierung der Instandhaltungskosten

### 2.5.3.3 Wartung und Inspektion

Um den Anforderungen gerecht zu werden, müssen Wasserversorgungssysteme regelmäßig inspiziert und gewartet werden. Der funktionsfähige Zustand und die Wasserqualität sind zu prüfen und zu erhalten. Hierzu ist die regelmäßige Ermittlung und Beurteilung des aktuellen Zustandes des Systems notwendig. Des Weiteren ist es von entscheidender Bedeutung, die Ergebnisse der Inspektion und die Wartungsarbeiten zu dokumentieren. Diese Daten bilden die Basis für die Planung und Durchführung

der Rehabilitation. Hinsichtlich der Wasserqualität sind Rohrleitungsnetze zur Vorbeugung von Eintrübungen und zur Minimierung der Verkeimungsgefahr regelmäßig zu spülen. Das Spülen wird der Wartung zugeordnet.

### 2.5.3.4 Rehabilitation

Die Rehabilitation hat die Aufgabe, den funktionsfähigen Zustand eines Wasserversorgungssystems zu erhalten oder ggf. wiederherzustellen. Ziel der Rehabilitation ist neben der grundsätzlichen Anforderung, die technische und hygienische Versorgungssicherheit zu gewährleisten, die Minimierung der für die Sicherstellung notwendigen Rehabilitationskosten. Die Rehabilitation wird in die Komponenten Rehabilitationsstrategie, Rehabilitationsplanung und Rehabilitationsmaßnahmen untergliedert (DVGW, 2006b):

**Rehabilitationsstrategie:** Die Rehabilitationsstrategie stellt den langfristigen Sanierungs- und Erneuerungsbedarf dar. Dieser Bedarf wird in der Rehabilitationsrate ausgedrückt. Die Rehabilitationsrate basiert auf der Nutzungs- oder Restnutzungsdauer der Systemelemente sowie dem erforderlichen Finanzbedarf. Die Nutzungsdauer der Systemelemente ist maßgeblich von der Schadensrate beeinflusst. Überschreitet die tatsächliche die zulässige Schadensrate, ist das Ende der Nutzungsdauer erreicht. Es resultiert Handlungsbedarf.

**Rehabilitationsplanung:** Die langfristige Rehabilitationsstrategie wird in der mittelfristigen Rehabilitationsplanung umgesetzt. Dabei werden für einen Planungszeitraum die Art und der Umfang der Baumaßnahmen (Rehabilitationsmaßnahmen) geplant und in einem nach Prioritäten geordneten Rehabilitationsprogramm (Maßnahmenplan) zusammengefasst.

**Rehabilitationsmaßnahmen:** Die eigentliche Umsetzung der Rehabilitation erfolgt durch den planmäßigen und kontinuierlichen Einsatz der Methoden Reinigung, Sanierung, Erneuerung sowie durch die geplante Reparatur. Laut DVGW (1997) müssen dabei technische Kriterien (Einhaltung des Mindestdrucks, der Qualitätsgrenzwerte, der Richtwerte für Wasserverluste und der zulässigen Schadensrate sowie Berücksichtigung der Rohrwerkstoffe und des Netzzustands), ökonomische Kriterien (Kosten der Maßnahmen, Ersatzteilhaltung und Wasserverluste sowie Berücksichtigung des Versorgerimages) sowie externe Einflüsse (Fremdbaumaßnahmen, mögliche Folgemaßnahmen) berücksichtigt werden.

Grundvoraussetzung der Rehabilitation und insbesondere der Aufstellung einer Rehabilitationsstrategie ist die Erfassung und Dokumentation des bestehenden Versorgungssystems, der Mängel (aus der Inspektion) sowie der Instandhaltung und des Betriebs (Cornell und Dunphy, 2005; Hammerer, 2000). Des Weiteren ist eine Analyse des hydraulischen Zustands (Fluss- und Druckverteilung) hilfreich (DVGW,

2006b). Für die Dokumentation des bestehenden Systems werden Netzkataster geführt. Die Erfassung und Dokumentation von Schäden sowie des Führens einer Schadenstatistik kommt in der Rehabilitation eine besondere Bedeutung zu. Aus der Schadenstatistik lassen sich die tatsächlichen Schadensraten ableiten. Diese sind wichtigster Entscheidungsparameter bei der Aufstellung einer Rehabilitationsstrategie und -planung. Auf dieser Datenbasis können Trends abgeleitet, technische und wirtschaftliche Kennzahlen gebildet und Zusammenhänge erkannt sowie Zusammenhangskomponenten gebildet werden (DVGW, 2006b). Weiter sind eine langfristige Rehabilitationsstrategie sowie eine regelmäßige und geplante Durchführung notwendig. Die Strategie muss mit der langfristigen Netzplanung (Ausbauplanung) abgestimmt sein (DVGW, 1997).

Für das Aufstellen einer Rehabilitationsstrategie und das Planen der Maßnahmen finden heutzutage mathematische Modelle Verwendung. Mischner und Roscher (2006) vergleichen am Markt verfügbare Vergleichs- und Bewertungsmodelle für Rohrleitungssysteme. Ahrens (2007, 2004) beschreibt ein Modell (OPTNET) für die softwaregestützte Zustandsbewertung als Basis für die Ermittlung einer optimalen Rehabilitationsstrategie. Möglichkeiten der eigentlichen Erhebung der Zustandsdaten (Eingangsdaten des Modells) werden von Sorge (2007) gezeigt. Eine spezielle Softwarelösung für die Datenerhebung bei der Inspektion von Armaturen und Hydranten behandeln Waerder u. a. (2003). Ein weiteres Modell (KANEW) zur Ermittlung einer Rehabilitationsstrategie wird von Kropp (2008) beschrieben. Gangl (2008) beschreibt ein umfangreiches Modell für die Rehabilitationsplanung. Das Modell beschreibt das Auftreten von Erst- und Folgeschäden. Außerdem werden Einflussfaktoren auf die ökonomischen Kriterien der Rehabilitationsplanung untersucht. Kim und Mays (1994) berücksichtigen in ihrem Ansatz zur optimalen Rehabilitation eines Leitungsnetzes die Kostenfunktionen der Rohrleitungserneuerung, -sanierung, und -reparatur sowie der Pumpenleistungen.

Agrawal u. a. (2007) beschreiben ein Verfahren zur kostenoptimalen Erhöhung der Versorgungssicherheit und Netzredundanzen. Selvakumar u. a. (2002) sowie Clark u. a. (2002) beschreiben Modelle zur Ermittlung der Kosten der Rehabilitationsmaßnahmen. Hoch und Fischer (2007) und Hartung (2007) thematisieren die Ermittlung der Kosten verschiedener Baumaßnahmen und Bauverfahren als Eingangsdaten für die Modelle. Eine vereinfachte, kostengünstige Softwarelösung zur Dokumentation und Verwaltung von Schadensdaten sowie zur Analyse dieser Daten zeigt Kluge (2006). Des Weiteren finden sich in der Literatur zahlreiche Anwendungsbeispiele, z.B. von Hoch und Fischer (2004), Kreska (2004) und Ehrensberger (2003).

### 2.5.4 Wasserverlustreduktion

#### 2.5.4.1 Motivation

Wasserverluste gefährden die notwendige Grundversorgung über ein Wasserversorgungssystem einerseits durch die Limitierung des den Verbraucher erreichenden Wassers. Andererseits sind Wasserverluste durch die notwendigen größeren Systemkapa-

zitäten und die unentgeltlich aufbereitete und geförderte Wassermenge mit einem wirtschaftlichen Schaden verbunden, der eine dauerhafte und nachhaltige Versorgung negativ beeinträchtigt. Die im System verlorene Wassermenge muss meist über eine entsprechende Entnahme von Rohwasser ausgeglichen werden. Die damit verbundenen ökologischen Belastungen gefährden wiederum eine nachhaltige Wasserversorgung. In Entwicklungsländern wird auf eine begrenzte Wasserressource mitunter mit einer intermittierenden Versorgung reagiert, die erhebliche Probleme mit sich bringt und zu einer Gefährdung der Wasserversorgung führen kann (s. Kap 4). Außerdem ist eine funktionierende Wasserversorgung die Grundlage jeder wirtschaftlichen Entwicklung. Eine mangelhafte Versorgung führt meist direkt zu einem ökonomischen Schaden (Niemeyer u. a., 1994). Wasserverluste sind daher aus ökologischen, ökonomischen und versorgungstechnischen Gründen zu bekämpfen (DVGW, 2003). Nichtsdestotrotz sind Wasserverluste in Wasserverteilungssystemen bis zu einem gewissen Grad nicht zu vermeiden (Thornton u. a., 2008).

### 2.5.4.2 Verlustmengenmittlung

Farley und Liemberger (2005) empfehlen in ihrer allgemeinen Vorgehensweise zur Reduktion von Wasserverlusten zunächst eine Analyse der momentan auftretenden Wasserverluste. Die Quantität und Lokalität (in welchem Systemteil) sowie die Ursachen der Wasserverluste müssen als Basis für die Planung und Durchführung von Maßnahmen zur Wasserverlustreduktion ermittelt werden. Die Ermittlung der Wasserverlustmenge und die örtliche Eingrenzung der Leckagen über Mengenmessungen werden meist in Kombination durchgeführt. Für die Überwachung und Leckagekontrolle mittels Mengenmessung hat sich die Einteilung des Versorgungsnetzes in diskrete Sektoren als sehr effizient erwiesen (Howard und Bartram, 2005; Farley und Liemberger, 2005; Ulanicki u. a., 2008). Die, ggf. temporäre, Schaffung kleinerer Sektoren erlaubt ein besseres dauerhaftes oder temporäres Monitoring und systematisches Eingrenzen auftretender Wasserverluste. Im internationalen Sprachgebrauch wird ein diskreter Netzbereich District Meter Area (DMA) genannt (s. z.B. Farley (2001)). Im Folgenden sind die zwei prinzipiellen Methoden der Mengenermittlung sowie die Ortung von Leckagen kurz beschrieben.

**Wassermengenbilanz:** Das Ziel einer Wassermengenbilanz ist in der Regel die Ermittlung der realen Wasserverluste  $Q_{VR}$  in einem Rohrnetz. Sie wird meist basierend auf vorhandenen Zählerablesungen erstellt (DVGW, 2003). Dabei werden die realen Wasserverluste  $Q_{VR}$  über die gemessene Rohrnetzeinspeisung  $Q_N$  und die gemessene in Rechnung gestellte Rohrnetzabgabe  $Q_{AI}$  ermittelt. Die nicht in Rechnung gestellte Rohrnetzabgabe  $Q_{AN}$  und die scheinbaren Wasserverluste  $Q_{VS}$  müssen in den meisten Fällen abgeschätzt werden.

**Zuflussmessungen:** Über Zuflussmessungen können Wasserverluste kurzfristig ermittelt werden. Zu Zeiten des minimalen Verbrauchs wird die minimale Zuflussmenge  $Q_{min}$  gemessen. Mit der geschätzten oder bekannten Restverbrauchsmenge  $Q_{Verbr}$

können die momentanen realen Wasserverluste  $Q_{VRm}$  ermittelt werden.

$$Q_{VRm} = Q_{min} - Q_{Verbr} \quad (2.21)$$

Dabei wird zwischen der kontinuierlichen und der momentanen Zuflussmessung unterschieden. Bei der kontinuierlichen Zuflussmessung wird der Zufluss in größere Netzteile über fest installierte Messgeräte erfasst. Durch den Vergleich mit Erfahrungswerten (Überlagerung der Ganglinien) können Fehlmengen erkannt werden. Bei bekanntem Nachtverbrauch können die Wasserverluste ermittelt werden. Bei der momentanen Zuflussmessung wird über einen kürzeren Zeitraum mittels mobiler Durchflussmessgeräte der Zufluss zu einem kleineren, ggf. temporär hydraulisch abgeschlossenen Netzsektor gemessen. Bei Ermittlung des Nachtverbrauchs wird der Restverbrauch im Netzteil meist abgeschätzt. Bei der Ermittlung des Nullverbrauchs wird davon ausgegangen, dass im Versorgungsgebiet unter Berücksichtigung des Dauerverbrauchs kurzzeitig kein Verbrauch stattfindet. Hierzu kommen meist nur kleine Versorgungsgebiete oder hydraulisch getrennte Sektoren in Frage. Meyer und Wehr (1998) sowie Weimer (1999) beschreiben detaillierte Verfahren zur Nacht- und Nullverbrauchsmessung und deren Bewertung. Das Streubreitenverfahren zieht zur Bewertung der Nacht- oder Nullverbrauchsmessung eine statistisch basierte Funktion heran (Hoch, 1987).

### 2.5.4.3 Methoden der Wasserverlustreduktion

Für die Reduktion realer Wasserverluste hat sich die Kombination vier grundlegender Methoden als effektiv erwiesen (Thornton u. a., 2008; Kölbl, 2008; Farley, 2001):

- Aktive Leckagekontrolle und Leckageortung
- Geschwindigkeit und Qualität der Leckagereparatur
- Druckmanagement
- Instandhaltung

Unter einer Leckageortung versteht man das Lokalisieren der Stellen des eigentlichen Wasseraustritts. Die Leckageortung kann zweckmäßig in Verbindung mit einer Ermittlung der Wasserverluste über Zuflussmessungen durchgeführt werden. Über die Zuflussmessung wird der zu untersuchende Bereich eingegrenzt. Die eigentlichen Stellen des Wasseraustritts werden anschließend lokalisiert. Hierbei wird zwischen der Vorortung und der eigentlichen Lokalisierung unterschieden. Für eine erste Vorortung stehen u.a. akustische Methoden, Korrelationsmessverfahren, Zufluss- und Druckmessungen sowie die Temperaturdifferenzenmethode zur Verfügung (Mutschmann und Stimmelmayer, 2007). Die eigentliche Leckage wird meist über Abhorch- oder Korrelationsmessverfahren ermittelt (DVGW, 2003).

Die Zeitdauer vom Auftreten einer Leckage bis zu deren Reparatur entscheidet neben dem Durchfluss durch die Leckage über die Wasserverlustmenge. Eine Minimierung der Laufzeit bis zur Reparatur minimiert die Wasserverlustmenge. Die Qualität der ausgeführten Reparatur ist für die Dauerhaftigkeit und damit für die

Wahrscheinlichkeit eines möglichen neuen Schadensfalls an der gleichen Stelle entscheidend. Wird die Qualität verbessert, wird präventiv eine Reduktion der Wasserverluste erreicht. Die Verbesserung der Geschwindigkeit und Qualität der Reparatur wird meist über eine Optimierung der Arbeitsprozesse erreicht. Verfügbares Personal, Ausbildung des Personals, Ausrüstung sowie Verfügbarkeit und Qualität des Materials sind dabei wichtige Faktoren.

Verteilungsnetze sind meist auf den Spitzenbedarf ausgelegt. D.h. in Stunden geringeren Bedarfs sind die Leitungsnetze de facto überdimensioniert, was in einem Versorgungsdruck resultiert, der größer als der minimal notwendige Versorgungsdruck ist (s. Kap. 2.4.2). Da die Austrittsmenge an einer Leckage u.a. vom anstehenden Druck abhängig ist (s. Kap 2.4.4.3), minimiert eine geplante dynamische Reduktion des Netzdrucks auf den Mindestversorgungsdruck die Wasserverlustmenge (Knobloch u. a., 2010; Ulanicki u. a., 2008; Vairavamoorthy und Lumbers, 1998). Über das an den Bedarf angepasste Druckmanagement wird zudem das Auftreten neuer Leckagen reduziert. Walski u. a. (2004) beschreiben diesen Einfluss des Versorgungsdrucks auf die Verlustmenge und die Rate auftretender Leckagen. Das Druckmanagement wird üblicherweise in unabhängigen Netzsektoren (DMAs) umgesetzt.

Die Instandhaltung ist ebenfalls als präventive Maßnahme zu den Methoden der Wasserverlustreduktion zu zählen. Die Instandhaltung ist in Kapitel 2.5.3 ausführlich beschrieben.

Aus den Hauptursachen der scheinbaren Wasserverluste (s. Kap. 2.4.4.5) ergeben sich die Angriffspunkte für deren Reduktion (Thornton u. a., 2008):

- Reduktion der Zählerungenauigkeiten
- Reduktion des Wasserdiebstahls
- Reduktion der Zählerablesefehler
- Reduktion der Datenhandhabungsfehler

Zusammen mit der Ermittlung der Wasserverluste und deren Beurteilung über Indikatoren werden die Methoden zur Reduktion realer und scheinbarer Wasserverluste sinnvollerweise in einer Strategie umgesetzt (Thornton u. a., 2008; DVGW, 2003; Farley, 2001; IWA, 2000; Weimer, 1999). Die Wahl der Methodenkombination hängt hauptsächlich von der Systemcharakteristik, der Größe der einzelnen Wasserverlustkomponenten und der Kosten-Nutzen-Beziehung im jeweiligen Fall ab. Niemeyer u. a. (1994) gehen in ihrem umfangreichen Werk zur Thematik ausführlich auf momentane Maßnahmen und langfristige Strategien ein. Dabei beleuchten sie administrative und technische Maßnahmen, Verfahren der Leckageortung sowie Analyse- und Entscheidungsprozesse als Maßnahmen zur Verlustreduktion. Weiter werden die administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen im laufenden Betrieb und bei der Netzerneuerung/Netzerweiterung im Kontext einer andauernden Aufgabe erörtert.

### 2.5.4.4 Potential der Reduktion realer Wasserverluste

Häufig werden die realen Wasserverluste in Prozent der Rohrnetzeinspeisung angegeben. Die prozentuale Angabe der realen Wasserverluste ist als vergleichbarer Indi-

kator verschiedener Wasserverteilungssysteme nur begrenzt aussagekräftig (DVGW, 2003). Verschiedene Einflussfaktoren wie die Leitungslänge, die Hausanschlussdichte, der Versorgungsdruck und die Netzstruktur werden nicht berücksichtigt. Die IWA empfiehlt daher als vergleichbare Angabe die Current Annual Real Losses  $CARL$  [ $l/d_V$ ] (Lambert, 2003; Kölbl, 2008):

$$CARL = \frac{Q_{VR} \cdot 1000}{N_{VT}} \quad (2.22)$$

Um eine intermittierende Betriebsweise zu berücksichtigen, werden die jährlichen realen Wasserverluste  $Q_{VR}$  [ $m^3/a$ ] dabei auf die Anzahl der Versorgungstage im Jahr  $N_{VT}$  [ $d_V/a$ ] bezogen.

Reale Wasserverluste können nicht vollständig vermieden werden (Thornton u. a., 2008). Die systembezogenen nicht vermeidbaren realen Wasserverluste (Unavoidable Annual Real Losses)  $UARL$  [ $l/d$ ] können nach dem empirischen Ansatz von Lambert u. a. (2000) ermittelt werden:

$$UARL = (18 \cdot L_N + 0,8 \cdot N_{HA} + 25 \cdot L_{HA}) \cdot OP_m \quad (2.23)$$

Dabei werden neben der Anzahl der Hausanschlüsse  $N_{HA}$  [–] die Einflüsse der Verteilungsnetzlänge  $L_N$  [ $km$ ] und der Gesamtlänge der Hausanschlussleitungen  $L_{HA}$  [ $km$ ] sowie der durchschnittliche Betriebsdruck  $OP_m$  [ $m$ ] berücksichtigt.

Unter der Annahme, dass keine technischen und wirtschaftlichen Einschränkungen bestehen, können die realen Wasserverluste auf den theoretischen Wert der nicht vermeidbaren realen Wasserverluste reduziert werden. Das als Infrastructure Leakage Index  $ILI$  [–] bezeichnete Verhältnis zwischen  $CARL$  und  $UARL$  gibt demnach das Potential der systembezogenen, theoretisch möglichen Reduktion realer Wasserverluste an (IWA, 2000):

$$ILI = \frac{CARL}{UARL} \quad (2.24)$$

Allerdings ist die Reduktion von Wasserverlusten mit finanziellem Aufwand verbunden. Aus wirtschaftlicher Sicht ist die Reduktion der Wasserverluste daher bis zu dem so genannten Economic Level of Leakage  $ELL$  sinnvoll. Der  $ELL$  gibt den Punkt an, an dem der finanzielle Aufwand für die Wasserverlustreduktion den finanziellen Einsparungen durch die geringeren Verluste entspricht (Lambert u. a., 2000). Für die Ermittlung der Einsparungen durch die Reduktion realer Wasserverluste sind die Produktionskosten anzusetzen. Wird die Betrachtung nicht auf die realen Wasserverluste beschränkt, ist für die scheinbaren Wasserverluste als tatsächlich konsumierte Wassermenge der Verkaufspreis anzusetzen.

## 2.5.5 Datenhaltung in der Wasserverteilung

### 2.5.5.1 Aufgaben der Datenhaltung

Wasserverteilungssysteme unterliegen einer starken, an technische und sozioökonomische Rahmenbedingungen gebundenen Dynamik (Roscher, 2000, 2008). Für die

Analyse und Planung von Wasserverteilungssystemen sowie für die Betriebsführung, die Instandhaltung und die Wasserverlustreduktion sind daher genaue und aktuelle Systemkenntnisse unabdingbare Voraussetzung (Musil, 2009). In der DIN (2000) wird deshalb die Aufzeichnung relevanter Informationen und deren regelmäßige Aktualisierung gefordert.

Die Aufgaben einer Datenhaltung sind zunächst die Erfassung und möglichst aktuelle Abbildung aller Elemente eines Verteilungssystems. Die Dokumentation des Versorgungssystems wird in so genannten Netzkatastern umgesetzt. Neben den Systemdaten sind geographische, politische und soziale Daten des systemumfassenden Gebiets für die Analyse und Planung von Interesse. Dies sind insbesondere Informationen zu Topographie, Landnutzung, politischen Grenzen, Bevölkerungsverteilung und Infrastruktur. Sowohl die Netzkataster als auch Daten mit räumlichem Bezug werden heute üblicherweise digital in Geoinformationssystemen (GI-Systemen) geführt. Diese Systeme werden auch Netzinformationssysteme genannt.

Kundendaten werden üblicherweise in speziellen Datenbanken verwaltet. Für die Analyse und Planung sowie für den technischen Betrieb werden hauptsächlich Wasserverbrauch der Kunden sowie der räumliche Bezug des Verbrauchs benötigt.

Zur Steuerung und Regelung der technischen Anlagen sowie zur Kontrolle der Betriebsführung werden so genannte Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) Systeme eingesetzt. Der hydraulische Systemzustand (Durchflüsse, Drücke, Wasserspiegel) wird gemessen, in Echt-Zeit zu einer zentralen Leitwarte übermittelt und dort gespeichert. Die Daten können zur Systemanalyse, Planung und Betriebsunterstützung genutzt werden.

Für die Instandhaltung ist neben der Aufzeichnung der Systemelemente die Dokumentation auftretender Schäden und deren Charakteristika eine wichtige Grundlage (Roscher, 2008; Hammerer, 2000). Diese Daten werden meist in Schadensdatenbanken verwaltet und über Schadenstatistiken ausgewertet. Schadensdatenbanken werden auch Schadensregister genannt,

Neben den im Netzkataster verwalteten Systemdaten können Kundendaten, hydraulische Daten und Schadensdaten über einen Objekt- oder Raumbezug in ein Geoinformationssystem (GIS) eingebunden werden. GI-Systeme stellen damit die Basis einer möglichen Datenintegration dar, wie sie in Kapitel 6 thematisiert wird (Klingel, 2007; Berner und Riegler, 2003). System-, Raum-, Betriebs- und Verbrauchsdaten sind zudem Eingangsparameter der Rohrnetzberechnung (s. Kap. 3.7).

Im Folgenden wird im Hinblick auf das in Kapitel 6 dargestellte integrierte Datenmanagement-, Analyse- und Planungsinstrument sowie die in Kapitel 7 beschriebene Schadensdokumentation auf einige Aspekte der GI-Systeme, Netzkataster und Schadens Erfassung eingegangen.

### 2.5.5.2 Geoinformationssysteme

Unter GI-Systemen wird die rechnergestützte Verwaltung und Verarbeitung raumbezogener Daten verstanden. GI-Systeme bestehen aus den vier Komponenten Hardware, Software, Geodaten sowie Datenverwaltungs- und Datenverarbeitungsfunktionen.

Oft wird unter dem Begriff GIS aber auch alleine die Software mit Anwendungsfunktionalitäten verstanden. GI-Systeme zeichnen sich vor allem durch die Möglichkeiten zur Verknüpfung und Analyse von Geodaten über ihren Raumbezug aus und unterscheiden sich dadurch von rein darstellerischen Werkzeugen, wie z.B. Computer Aided Design (CAD) Softwareprogrammen. Als raumbezogene Daten (Geodaten) werden in einem Bezugssystem lokalisierbare Informationen bezeichnet. Die raumbezogenen Daten umfassen dabei die Rauminformation an sich sowie verknüpfte Sachdaten (Attribute). Grundlegend können räumlich abgrenzbare Objekte (Entitäten), wie z.B. Leitungen oder Wasserbehälter, und kontinuierliche Informationen, wie z.B. Flächennutzungen oder Bevölkerungsverteilungen, unterschieden werden. Entitäten und kontinuierlichen Felder der realen Welt können unterschiedlich abgebildet und dementsprechend als verschiedene Datentypen gespeichert werden.

**Vektordaten:** Vektordaten sind Punkt-, Linien- oder Flächenobjekte mit einem Raumbezug und verknüpften Sachdaten (Attribute). Der Raumbezug ist über Koordinaten im jeweiligen Bezugssystem definiert. Eine Linie (Polylinie) kann aus mehreren geradlinigen Segmenten mit den entsprechenden Stützstellen, den Zwischenpunkten (Vertices), bestehen. Flächen (Polygone) sind im Wesentlichen geschlossene Linienzüge.

**Rasterdaten:** Rasterdaten bilden flächenhafte Elemente ab. Dabei wird die abzubildende Fläche gleichmäßig in ein aus quadratischen Einheiten (Rasterzellen) gleicher Größe (Auflösung) bestehendes Raster (Gitter) unterteilt. Jedes Raster besitzt einen Ursprung, über dessen Koordinaten im Bezugssystem sowie die vorgegebene Größe der Rasterzellen die Lage und Größe des Rasters definiert ist. Die Lage der Rasterzellen sind rasterintern ähnlich den Elementen einer Matrix über Zeilen- und Spaltenzugehörigkeit definiert. Jeder Rasterzelle kann ein Wert zugewiesen werden, der letztendlich die abzubildende Fläche im Bereich der Rasterfläche beschreibt.

**Sachdaten:** Sachdaten sind grundsätzlich mit raumbezogenen Daten verknüpft und können demnach als zu den oben genannten Datentypen zugehörig betrachtet werden, obwohl sie eigentlich einen eigenen Datentyp darstellen. Sachdaten sind meist in Datensätzen organisiert, die in relationalen Datenbanken gespeichert werden. Die Datensätze sind über eindeutige Bezeichnungen (ID) mit den Objekten der Geodaten verknüpft und dadurch im GIS verfügbar.

**Trianguläre irreguläre Netzwerke:** Ein aus Vektoren aufgebauter Datentyp ist das trianguläre irreguläre Netzwerk (TIN). Dieser Datentyp ist vollständig aus Dreiecksobjekten aufgebaut, deren räumliche Orientierungen dreidimensionale Oberflächen repräsentieren (Geoinformatik GmbH, 2005). Ein spezielles TIN stellt die Delaunay-Triangulation dar, deren Dreiecksnetz aus einer Punktmenge gebildet wird. Dabei enthalten die Kreise, auf denen die drei Punkte eines Dreiecks liegen, keine anderen Punkte der Punktmenge.

Die Geodaten können i.A. flexibel in verschiedenen Ebenen (Layer) in Abhängigkeit ihres Raumbezugs und ihrer Attribute visualisiert werden. Softwareerweiterungen und -anpassungen gängiger GIS-Produkte für spezielle Anwendungsfälle werden Fachschalen genannt. Oft bestehen die Fachschalen aus einer Ansammlung spezieller Werkzeuge, die in einer eigenen Werkzeugleiste in die Benutzeroberfläche eines GIS integriert sind. Im Kapitel 6 wird detailliert auf das GIS ESRI ArcGIS eingegangen. Für weiterführende allgemeine Informationen zu GI-Systemen wird auf die Fachliteratur verwiesen, z.B. DeMers (2005).

### 2.5.5.3 Netzkataster und Netzinformationssysteme

Unter einem Netz- oder Leitungskataster versteht man die zeichnerische und zahlenmäßige Erfassung der Lage und der technischen Details der Elemente eines Wasserverteilungssystems. Alle Daten werden zentral gespeichert, verwaltet und aktualisiert. Früher wurden Netzkataster in Planwerken geführt. Heute werden Netzkataster digital in GI-Systemen geführt. Damit können neben den Systeminformationen weitere raumbezogene Daten, die für die Wasserverteilung von Relevanz sind, gespeichert und ausgewertet werden.

Die DVGW (1996) hat unter dem Namen GAWANIS ein Standarddatenmodell definiert. Das Datenmodell berücksichtigt die Anbindung weiterer Informationssysteme und die Verwendung der Katasterdaten für eine Rohrnetzberechnung. Für die Abbildung des Leitungsnetzes, das Gewinnung, Aufbereitung, Förderanlagen, Behälter und Verbraucher verbindet, werden folgende Prinzipien empfohlen:

- Homogene Leitungsabschnitte werden als Objekte einer eigenen Objektklasse abgebildet.
- Jedes Leitungsobjekt hat einen Anfangs- und einen Endknoten.
- Jedem Leitungsobjekt sind die gleichen Attribute (z.B. Material, DN usw.) zugewiesen.
- Hausanschlussleitungen werden als Objekte einer eigenen Objektklasse abgebildet.
- Mehrere Hausanschlussleitungsobjekte können mit einem Leitungsobjekt verknüpft sein.
- Die Verbindungen von Leitungsobjekten und Hausanschlussleitungsobjekten werden mit Anschlussknoten definiert.
- Armaturen und Formstücke werden über eigene Objektklassen definiert.

Zudem ist die Qualität der verfügbaren Daten, die letztlich über deren Nutzungsmöglichkeiten entscheidet, zu beachten. Die Herkunft und Genauigkeit der Daten ist deshalb zu vermerken (Fuchs, 2007). GAWANIS beinhaltet außerdem eine Vorschrift für die zeichnerische Darstellung, die sich an den Vorgaben des DIN (1975) und der DVGW (1998a) orientiert.

Der relativ große Aufwand zur Pflege und Aktualisierung eines analogen Netzkatasters ließ dem Kataster bisher eine eher untergeordnete Bedeutung zukommen.

Auch weil in den entwickelten Ländern eine zuverlässige Wasserverteilung auf Grund meist guter Systemkenntnisse der Wassermeister und der Einhaltung der anerkannten technischen Regeln bei Infrastrukturmaßnahmen und im Betrieb gewährleistet werden konnte. Mit der Alterung der Systeme und der damit verbundenen Aufgabe der Werterhaltung des Anlagevermögens gewann die Datenhaltung als Basis von Rehabilitationsstrategien (s. Kap 2.5.3.4) immer mehr an Bedeutung, wie z.B. die Förderung des Aufbaus von digitalen Netzkatastern in Österreich zeigt (Haberl und Ertl, 2007).

Nichtsdestotrotz ist der Aufbau eines digitalen Netzkatasters ebenfalls mit einem großen Aufwand verbunden. Die DVGW (1996) hat unter dem Namen GAWANIS neben den oben erwähnten Vorschlägen für die technische Ausführung einen Anforderungskatalog für den Aufbau eines digitalen Netzinformationssystems als Hilfsmittel für die Wasserversorger aufgestellt. Konkrete Beispiele für die Umsetzung von Leitungskatastern und deren Anwendung finden sich z.B. bei Haberl und Ertl (2007).

### 2.5.5.4 Schadenserfassung

Der Großteil eines Wasserverteilungsnetzes ist nicht direkt zugänglich. Damit ist eine spezifische Zustandsbewertung nicht oder nur beschränkt möglich. Über die Erfassung und statistische Auswertung von Schäden lassen sich deren zeitliche, örtliche und eigenschaftsspezifische Häufungen, Ursachen und Kosten ermitteln. Damit lässt sich indirekt der Zustand eines Netzes analysieren (DVGW, 1998b). Diese Analyse stellt eine unverzichtbare Grundlage für die Instandhaltung dar (s. Kap. 2.5.3). Bei Wasserversorgern mit einem recht hohen Entwicklungsstand ist eine der vornehmlichen Aufgaben heute die Rehabilitation. Schadensdaten in Verbindung mit Daten zu Material, Alter, Lage, Umgebung, Kosten usw. ermöglichen eine optimierte Schadensprognose und Rehabilitationsplanung. Demgegenüber ist bei vielen Wasserversorgern in Entwicklungsländern auf Grund eines geringen technischen Niveaus die Instandhaltung schwach ausgeprägt (s. Kap. 4). Meist wird die Rehabilitation gar nicht planerisch verfolgt sondern intuitiv ausgeführt. Das Augenmerk der Versorger liegt meist auf der Wartung und Inspektion, die dennoch oft schwach ausgeprägt sind. Durch den dadurch bedingten schlechten Zustand der Infrastruktur und die relativ großen Wasserverlusten besteht zunächst bei der Verbesserung der Wartung, Inspektion und Reparatur Handlungsbedarf. Die Schadenserfassung ermöglicht eine einfache Analyse der bestehenden Reparaturprozesse und Reaktionszeiten und bildet damit die Basis für deren Optimierung.

Gemäß DVGW (2006b) ist eine Schadenstatistik die Erfassung und Auswertung von Schäden und Schwachstellen in den Anlagen der Wasserverteilung. Entsprechend der einzelnen Arbeitsschritte Aufnahme, Charakterisierung, Speicherung und Verwaltung sowie Auswertung kann der Begriff Schadenstatistik zeitlich differenziert werden. In dieser Arbeit wird die Aufnahme, Charakterisierung, Speicherung und Verwaltung von Schäden analog zur DVGW unter dem Begriff Schadenerfassung zusammengefasst. Die statistische Auswertung der Schäden wird in Abweichung zur

DVGW als Schadenstatistik bezeichnet. Die Speicherung und Verwaltung wird in Schadensregistern umgesetzt.

Für eine aussagekräftige Schadenstatistik ist eine eindeutige Schadenserfassung notwendig (Gangl, 2008). Die DVGW (2006b, 1998b) schlägt daher eine standardisierte Aufnahme und Charakterisierung der Schäden mit Formularen vor. Folgende Charakteristika sind nach Möglichkeit zu erfassen:

- Schadensort (z.B. Objektbezeichnung im Netzkataster, Koordinaten, Straße und Hausnummer)
- Schadensstelle (z.B. Leitung, Formstück, Schieber, Hydrant)
- Schadensart (z.B. Bruch, Riss, Loch, schadhafte Dichtung)
- Schadensursache (z.B. Korrosion, Bodenbewegung, Montagefehler)
- Systemkomponentenbeschreibung (z.B. Baujahr, Nennweite, Werkstoff)

Für die Speicherung der Daten eignen sich relationale Datenbanken, die eine flexible Verknüpfung und Auswertung des Datenbestands zulassen. Außerdem können relationale Datenbanken an GI-Systeme angebunden oder in diese integriert werden. Der Objekt- und Raumbezug von Schäden legt die Umsetzung der Schadensdatenverwaltung in einem GIS nahe. Für die Konzipierung einer Datenbank gibt die DVGW (2005b) Hinweise für eine objektbezogene Anbindung an das im vorigen Kapitel erwähnte Standarddatenmodell GAWANIS.



# 3 Grundlagen der Modellierung von Wasserverteilungssystemen

## 3.1 Überblick

Dieses Kapitel beschreibt die Grundlagen der Modellierung von Wasserverteilungssystemen. Zunächst werden der Begriff des hydraulischen Modells definiert und die Aufgaben hydraulischer Modelle umrissen (s. Kap. 3.2). In Kapitel 3.3 werden die notwendigen graphentheoretischen Grundlagen für die im nachfolgenden Kapitel 3.4 beschriebene mathematische Abbildung eines realen Verteilungssystems erläutert. Die Ermittlung der notwendigen Modellparameter sowie die Beschreibung des allgemeinen Modellierungsprozesses sind Inhalte der Kapitel 3.5 und 3.6. Abschließend wird die Berechnung des hydraulischen Systemzustands beschrieben (s. Kap. 3.7). Sie ist nach wie vor die wichtigste Anwendung hydraulischer Modelle und von grundlegender Bedeutung für diese Arbeit.

## 3.2 Aufgaben hydraulischer Modelle

Unter dem Begriff des hydraulischen Modells eines Wasserverteilungssystems wird meist die Abbildung eines realen Wasserverteilungssystems als rechenfähiges Modell verstanden. Die wichtigste und verbreitetste Anwendung eines hydraulischen Modells ist die Simulation des hydraulischen Systemverhaltens (s. Kap. 3.7.1). Daher wird der Begriff des hydraulischen Modells oft synonym zum Begriff des hydraulischen Simulationsmodells verstanden und verwendet. Zur Simulation ist auch die Berechnung der Ausbreitung und Durchmischung reaktiver und nicht reaktiver Substanzen im Leitungsnetz zu zählen (s. z.B. Beilke und Wiegleb (2002)). Es existieren jedoch weitere wichtige Anwendungen, die bezüglich der Modellierung und der Berechnungsansätze von der Simulation abzugrenzen sind. Genannt seien hier beispielhaft die Ermittlung kostenoptimaler Verteilungsnetze und die Ermittlung optimaler Steuerstrategien. Verbreitet werden auch Simulationsalgorithmen zur Lösung weiterführender Aufgaben verwendet. Dabei fließt die Berechnung des hydraulischen Systemzustands als Parameter in die Lösung der eigentlichen Aufgabe ein. So werden z.B. mit Hilfe Genetischer Algorithmen Optimierungsaufgaben gelöst. In der Literatur finden sich zahlreiche theoretische Betrachtungen und Anwendungsbeispiele. Stellvertretend wird auf Simpson u. a. (1994) sowie Simpson (2000) für die Ermittlung eines kostenoptimalen Leitungsnetzes und auf Paschke u. a. (2001) für die Ermittlung optimaler Steuerstrategien verwiesen. Für die Modellierung von

Wasserverteilungssystemen existieren zahlreiche Computerprogramme, die meist eine graphische Benutzeroberfläche für die Datenein- und ausgabe, eine Struktur zur Datenspeicherung sowie den eigentlichen Rechenkern mit den Berechnungsalgorithmen umfassen.

## 3.3 Grundlagen der Graphentheorie

### 3.3.1 Terminologie und Definitionen

Grundlegend für die Modellierung von Wasserverteilungssystemen ist deren Abbildung als ein aus der Graphentheorie bekanntes Knoten-Stränge-Modell. Im Folgenden sind die für die Modellierung notwendigen Begriffe und Definitionen der Graphentheorie zusammengefasst. Für weiterführende Definitionen wird auf die entsprechende Fachliteratur, z.B. Nägler und Stopp (1996), verwiesen.

**Endlich gerichteter Graph:** Ein Graph  $G = [K, S, Ad]$  besteht aus den zwei Mengen  $K = \{K_1, K_2, \dots, K_n\}$  und  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$  sowie der Adjazenzabbildung  $Ad: S \rightarrow K \times K$  des Graphen. Die Elemente der Menge  $K$  heißen Knoten, die Elemente der Menge  $S$  heißen Stränge. Der Graph  $G$  heißt endlich gerichteter Graph, wenn die Mengen  $K$  und  $S$  endliche Mengen sind und die Abbildung  $Ad$  jedem Element aus  $S$  eindeutig ein geordnetes Paar von Elementen aus  $K$  zuordnet. D.h. die Adjazenzabbildung  $Ad(S) = [K_A, K_E]$  ordnet dem Strang  $S$  die Knoten  $K_A$  und  $K_E$  zu. Der Knoten  $K_A$  wird dabei Anfangsknoten und der Knoten  $K_E$  Endknoten des Stranges  $S$  genannt. Ein gerichteter Graph wird auch als Digraph (von *directed graph*) bezeichnet. Werden die Stränge durch ungeordnete Knotenpaare definiert, wird der Graph ungerichteter Graph genannt. Abbildung 3.1 zeigt einen endlich gerichteten Graphen.

**Schlichter gerichteter Graph:** Ist auf ein geordnetes Knotenpaar höchstens ein Strang abgebildet, ist also die Abbildung  $Ad$  umgekehrt eindeutig, wird der gerichtete Graph als schlicht bezeichnet. Er enthält weder Schlingen noch parallele Stränge (s. Abb. 3.1).

**Zusammenhängender Graph und Komponenten:** Ein Graph  $G$  wird zusammenhängend genannt, wenn für alle Knotenpaare  $[K_o, K_p]$  des Graphen  $G$  eine Verbindung von Knoten  $K_o$  zu Knoten  $K_p$  existiert (s. Abb. 3.1). Ein nicht zusammenhängender Graph besteht aus zusammenhängenden Komponenten.

**Weg und Pfad:** Ein Weg  $W_p$  stellt eine endliche Menge durch Stränge verbundener Knoten eines Graphen  $G$  dar. Enthält der Weg keinen Strang mehrfach, wird er einfacher Weg genannt. Ein unverzweigter Weg wird Pfad  $P_p$  genannt. Der in Abbildung 3.1 gezeigte Digraph enthält z.B. den Weg  $W_1 = \{K_1, S_2, K_2, S_3, K_4, S_6, K_{10}, S_{13}, K_{11}\}$  und den Pfad  $P_1 = \{K_6, S_9, K_7, S_{10}, K_8\}$ .

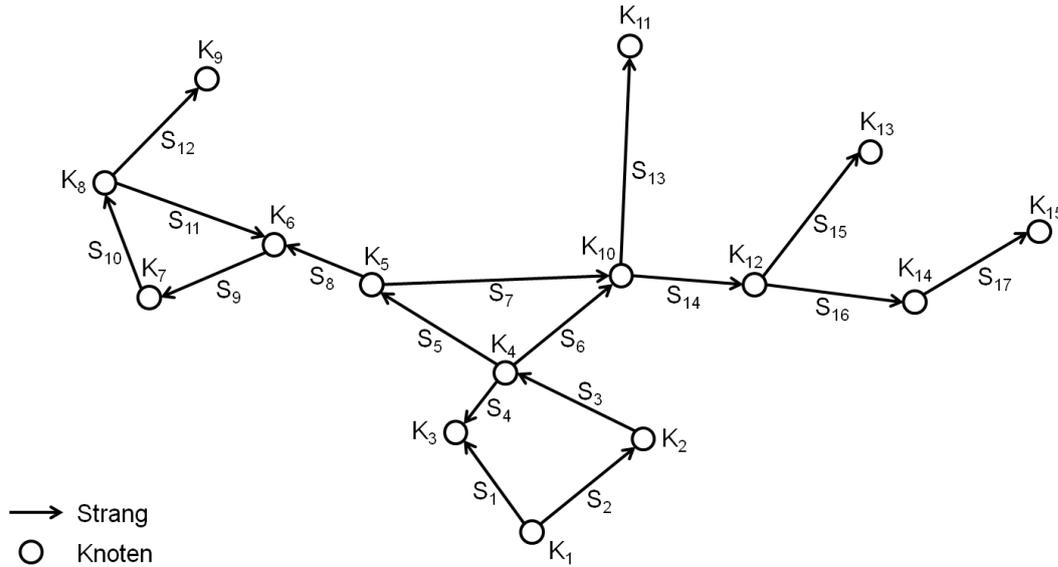


Abbildung 3.1: Beispiel eines zusammenhängenden Digraphen

**Schleife oder Masche:** Eine Schleife oder Masche  $M_p$  ist ein Weg, der am gleichen Knoten beginnt und endet. Ein Graph mit  $n$  Knoten und  $m$  Strängen beinhaltet die Menge  $M$  mit  $l = m - n + 1$  Maschen. Der in Abbildung 3.1 gezeigte Digraph enthält die drei Maschen  $M_1 = \{K_1, S_1, K_3, S_4, K_4, S_3, K_2, S_2, K_1\}$ ,  $M_2 = \{K_4, S_5, K_5, S_7, K_{10}, S_6, K_4\}$  und  $M_3 = \{K_6, S_9, K_7, S_{10}, K_8, S_{11}, K_6\}$ .

**Baum und Wald:** Ein zusammenhängender, schlichter Graph ohne Maschen heißt Baum  $B_p$ . Ein Baum mit  $n$  Knoten besitzt genau  $m = n - 1$  Stränge. Im Falle eines gerichteten Graphen wird der Baum als Wurzelbaum bezeichnet, sofern ein Knoten des Baumes als so genannter Wurzelknoten hervorgehoben ist. Ein nicht zusammenhängender, schlichter Graph ohne Maschen heißt Wald. D.h. alle Wurzelbäume eines Digraphen bilden den Wald des Digraphen. Ein Wald mit  $n$  Knoten und  $m$  Strängen besteht aus  $b = n - m$  Bäumen. Der in Abbildung 3.1 gezeigte Digraph beinhaltet die Bäume  $B_1 = \{K_8, S_{12}, K_9\}$  und  $B_2 = \{K_{10}, S_{13}, K_{11}, S_{14}, K_{12}, S_{15}, K_{13}, S_{16}, K_{14}, S_{17}, K_{15}\}$ . Der Knoten  $K_8$  stellt die Wurzel des Baumes  $B_1$  dar, der Knoten  $K_{10}$  die des Baumes  $B_2$ .

**Brücke und Artikulationsknoten:** Brücken werden diejenigen Stränge eines Graphen genannt, bei deren Entfernung der Graph zerfallen würde. Die Entfernung einer Brücke hat demnach eine Erhöhung der Anzahl der Komponenten des Graphen zur Folge. Analog werden Knoten mit gleicher Eigenschaft als Artikulationsknoten bezeichnet. Der Strang  $S_8$  stellt eine Brücke des in Abbildung 3.1 gezeigten Graphen dar. Beispiele für Artikulationsknoten des Graphen sind die Knoten  $K_5$  und  $K_{10}$ .

**Gitter:** Das Gitter stellt die Bestandteile eines Digraphen ohne die Knoten und Stränge seiner Wurzelbäume, ausgenommen der Wurzelknoten, dar. Das Gitter eines Digraphen besteht daher ausschließlich aus Maschen sowie aus Brücken, die die Maschen verbinden. Das Gitter des in Abbildung 3.1 dargestellten Graphen wird aus den Maschen  $M_1$ ,  $M_2$  und  $M_3$  sowie der Brücke  $S_8$  gebildet.

**Spannbaum und Sehne** Ein Spannbaum ist ein Teilgraph eines Graphen mit Maschen. Der Teilgraph ist ein Baum und enthält alle Knoten des Graphen. Die nicht zum Spannbaum gehörenden, die Maschen bildenden Stränge werden als Sehnen bezeichnet.

### 3.3.2 Darstellung des Graphen:

Im Folgenden wird eine für die Modellierung von Wasserverteilungssystemen zweckmäßige Darstellung eines Graphen und seiner Bestandteile beschrieben. Deuerlein (2002) gibt eine geeignete Darstellung für den Digraph  $G$ , d.h. für die Zuordnung der Knoten der Menge  $K$  zu den Strängen der Menge  $S$  durch die Adjazenzabbildung  $Ad$ , als so genannte Inzidenzmatrix  $\mathbf{A} = (a_{ji})$  an. Den Zeilen der Inzidenzmatrix  $\mathbf{A}$  sind die Stränge, den Spalten die Knoten zugeordnet. Die Matrix  $\mathbf{A}$  ist daher vom Typ  $(m, n)$ . Dabei ist  $m$  die Anzahl der Stränge und  $n$  die Anzahl der Knoten. Für die Koeffizienten  $(a_{ji})$  mit  $j \in S$  und  $i \in K$  der Inzidenzmatrix  $\mathbf{A}$  gilt:

$$\mathbf{A} = (a_{ji}) = \begin{cases} -1 & \text{Knoten } i \text{ ist Anfangsknoten des Stranges } j \\ +1 & \text{Knoten } i \text{ ist Endknoten des Stranges } j \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.1)$$

Für Bäume ist die Inzidenzmatrix quadratisch und daher invertierbar. Im Gegensatz zu Deuerlein bezeichnen Nägler und Stopp (1996) die transponierte Darstellung der Matrix  $\mathbf{A}$  als Inzidenzmatrix. Gleichung 3.2 zeigt die Inzidenzmatrix  $\mathbf{A}_D$  des in Abbildung 3.2 dargestellten Digraphen  $D$ .

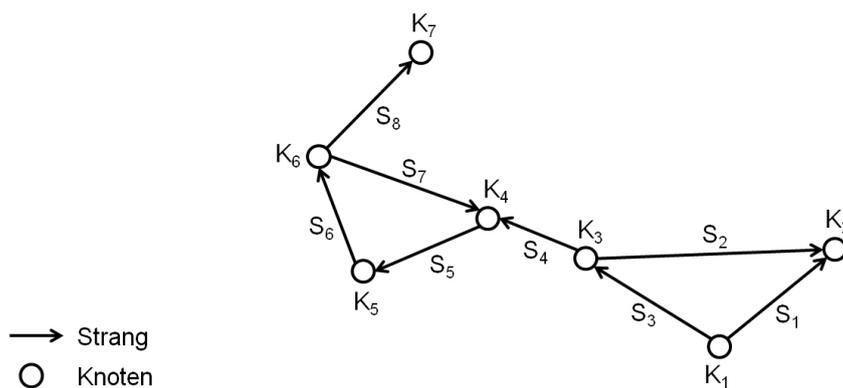


Abbildung 3.2: Beispielhafter Digraph  $D$

$$\mathbf{A}_D = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Deuerlein (2002) führt für die mathematische Abbildung der Maschen eines Graphen  $G$  die Schleifenmatrix  $\mathbf{C} = (c_{ji})$  vom Typ  $(m, l)$  ein. Dabei ist  $m$  die Anzahl der Stränge,  $l = m - n + 1$  die Anzahl der Maschen und  $n$  die Anzahl der Knoten. Für alle Maschen des abgebildeten Graphen ist eine Richtung (im/gegen den Uhrzeigersinn) zu definieren. Für die Koeffizienten  $(c_{ji})$  mit  $j \in S$  und  $i \in M$  der Matrix  $\mathbf{C}$  gilt:

$$\mathbf{C} = (c_{ji}) = \begin{cases} -1 & \text{Strang } j \text{ ist in Masche } i \text{ mit entgegengesetzter Richtung} \\ +1 & \text{Strang } j \text{ ist in Masche } i \text{ mit gleicher Richtung} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.3)$$

Gleichung 3.4 zeigt die Schleifenmatrix  $\mathbf{C}_D$  des in Abbildung 3.2 dargestellten Digraphen  $D$  bei positiver Schleifenrichtung im Uhrzeigersinn ( $M_1 = \{K_1, S_3, K_3, S_2, K_2, S_1, K_1\}$  und  $M_2 = \{K_4, S_5, K_5, S_6, K_6, S_7, K_4\}$ ).

$$\mathbf{C}_D = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

## 3.4 Modellierungskonzept

### 3.4.1 Abbildung des Wasserverteilungssystems als Digraph mit Attributen

Die Topologie, d.h. der logische Zusammenhang eines Wasserverteilungssystems wird als Digraph modelliert. Der Digraph bildet das Grundgerüst des hydraulischen Modells. Die Stränge des Graphen bilden homogene Leitungsabschnitte ab. Zu einem Zeitpunkt sind die Durchflüsse in den Strängen konstant. Die Knoten des Graphen stellen Veränderungen im Verlauf einer Rohrleitung, wie z.B. Durchmesserreduktionen, Materialwechsel oder Leitungsverzweigungen dar. Des Weiteren werden Wassereinspeisungen und Wasserentnahmen sowie Behälter als Knoten modelliert. Alle

physikalischen und nicht physikalischen Eigenschaften des Wasserverteilungssystems sind den Knoten und Strängen des Graphen als Attribute zugewiesen. Bestimmte Systemelemente, wie z.B. Behälter, werden durch ihre Abbildung bzgl. ihrer Lage und Form zwingend abstrahiert, während andere Systemelemente, wie z.B. Rohrleitungen, im Modell relativ exakt wiedergegeben werden können. Die durch den Digraph  $D$  eindeutig bestimmte Topologie des Systems kann mit der Inzidenzmatrix  $\mathbf{A}_D$  des Digraphen mathematisch dargestellt werden. Die gewählte Richtung der Stränge hat dabei lediglich Auswirkungen auf das Vorzeichen der Durchflüsse. In Abbildung 3.3 ist die Abbildung eines Wasserverteilungssystems als Digraph schematisch dargestellt.

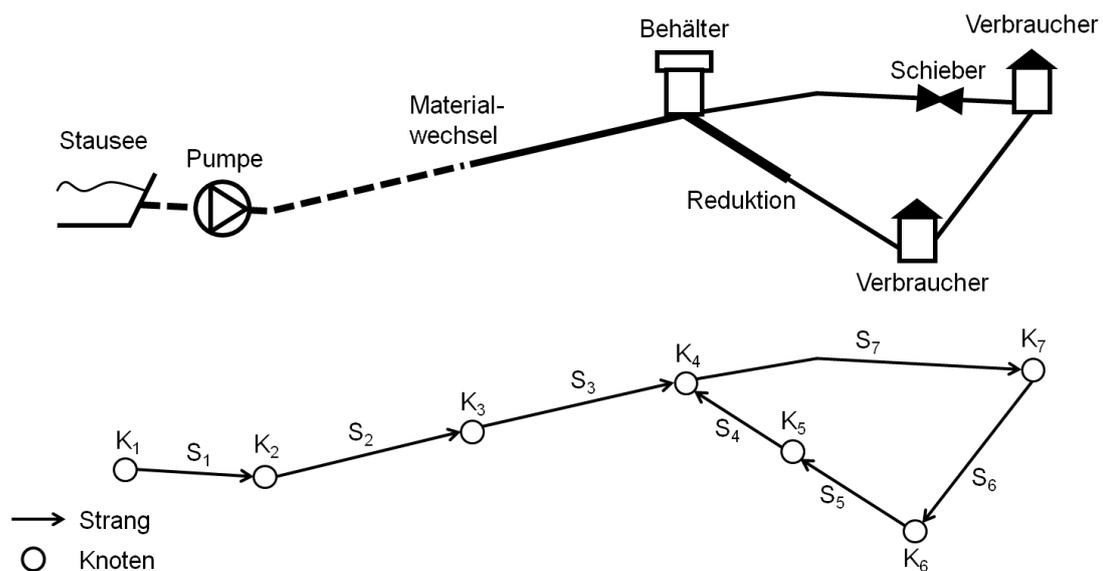


Abbildung 3.3: Abbildung eines Wasserverteilungsnetzes als Digraph (schematisch)

Das beschriebene Modellierungskonzept ist in den meisten Modellierungsprogrammen umgesetzt. Unterschiede sind lediglich in der Zuordnung bestimmter Systemeigenschaften zu den Elementen des Graphen und der Organisationsstruktur der Attribute auszumachen. Im Folgenden wird auf die Datenstruktur sowie die Modellierung der wichtigsten Systemelemente näher eingegangen.

#### 3.4.2 Datenstruktur und Datenspeicherung

Die Daten des hydraulischen Modells werden meist in Tabellen mit vorgegebenen Spalten und Zeilen verwaltet. Die Tabellen sind dabei in einer hierarchischen Struktur organisiert. Die Basis und erste Ebene dieser Struktur bilden Tabellen für die Knoten und Stränge. Jeder Strang und jeder Knoten stellt einen Tabelleneintrag dar. Den Knoten und Strängen sind die Systemeigenschaften als Attribute zugeordnet. Die Attribute können den Strängen und Knoten direkt zugeordnet werden, indem ihre Werte in der Stränge- bzw. Knoten-Tabelle in die entsprechenden Spalten

eingetragen werden. Komplexere Attribute werden in eigenen Tabellen in einer untergeordneten Ebene der Struktur definiert und über eindeutige Bezeichnungen mit den Datensätzen in den Stränge- und Knoten-Tabellen verknüpft. Attribute können wiederum selbst über Bezeichnungen mit weiterführend charakterisierenden, in einer jeweils tieferen Ebene definierten Attributen verknüpft sein. Die allgemeinen, für die Berechnungen notwendigen Parameter sind in gesonderten, nicht in die Struktur eingebundenen Tabellen definiert. Tabelle 3.1 zeigt beispielhaft eine Stränge-Tabelle mit zugeordneten Attributen. Tabelle 3.2 zeigt die entsprechende Knoten-Tabelle. Für die Attribute  $S1$  und  $K1$  verweisen Bezeichnungen ( $S1_1, S1_2, \dots$  und  $K1_1, K1_2, \dots$ ) auf Tabellen der zweiten Ebene, in der die Attribute näher spezifiziert sind. Die Tabelle des Attributs  $S1$  ist beispielhaft in Tabelle 3.3 dargestellt. Für die Attribute  $S2$  und  $K2$  sind direkt Werte angegeben ( $S2_1, S2_2, \dots$  und  $K2_1, K2_2, \dots$ ).

Tabelle 3.1: Beispielhafte Stränge-Tabelle der ersten Strukturebene

<b>Strang</b>	<b>Attribut S1</b>	<b>Attribut S2</b>	<b>...</b>
$[ID]$	$[ID]$	$[Wert]$	$\dots$
$S_1$	$S1_1$	$S2_1$	$\dots$
$S_2$	$S1_2$	$S2_2$	$\dots$
$S_3$	$S1_3$	$S2_3$	$\dots$
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$

Tabelle 3.2: Beispielhafte Knoten-Tabelle der ersten Strukturebene

<b>Knoten</b>	<b>Attribut K1</b>	<b>Attribut K2</b>	<b>...</b>
$[ID]$	$[ID]$	$[Wert]$	$\dots$
$K_1$	$K1_1$	$K2_1$	$\dots$
$K_2$	$K1_2$	$K2_2$	$\dots$
$K_3$	$K1_3$	$K2_3$	$\dots$
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$

Tabelle 3.3: Beispielhafte Attribut-Tabelle der zweiten Strukturebene

<b>Attribut S1</b>	<b>Attribut S1.1</b>	<b>Attribut S1.2</b>	<b>...</b>
$[ID]$	$[ID]$	$[Wert]$	$\dots$
$S1_1$	$S1.1_1$	$S1.2_1$	$\dots$
$S1_2$	$S1.1_2$	$S1.2_2$	$\dots$
$S1_3$	$S1.1_3$	$S1.2_3$	$\dots$
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$

In der Stränge-Tabelle ist meist die Topologie durch die Zuordnung der Anfangs- und Endknoten zu den entsprechenden Strängen definiert. Die räumliche Lage des Systems wird meist in der Knoten-Tabelle über die Zuordnung von Koordinaten und Höhen zu den Knoten definiert. Die Definition der Topologie des in Abbildung 3.3 dargestellten Systems wird beispielhaft in Tabelle 3.4 (Stränge-Tabelle) gezeigt. In Ergänzung dazu zeigt Tabelle 3.5 (Knoten-Tabelle) die Definition der räumlichen Lage des Systems.

Tabelle 3.4: Stränge-Tabelle mit Definition der Topologie des Beispielgraphen aus Abbildung 3.3

<b>Strang</b>	<b>Anfangsknoten</b>	<b>Endknoten</b>
[ID]	[ID]	[ID]
$S_1$	$K_1$	$K_2$
$S_2$	$K_2$	$K_3$
$S_3$	$K_3$	$K_4$
$S_4$	$K_5$	$K_4$
$S_5$	$K_6$	$K_5$
$S_6$	$K_7$	$K_6$
$S_7$	$K_4$	$K_7$

Tabelle 3.5: Knoten-Tabelle mit Definition der räumlichen Lage des Beispielgraphen aus Abbildung 3.3

<b>Knoten</b>	<b>X-Koord.</b>	<b>Y-Koord.</b>	<b>Höhe</b>
[ID]	[Länge]	[Länge]	[Länge]
$K_1$	$X_1$	$Y_1$	$H_1$
$K_2$	$X_2$	$Y_2$	$H_2$
$K_3$	$X_3$	$Y_3$	$H_3$
$K_4$	$X_4$	$Y_4$	$H_4$
$K_5$	$X_5$	$Y_5$	$H_5$
$K_6$	$X_6$	$Y_6$	$H_6$
$K_7$	$X_7$	$Y_7$	$H_7$

Für die Datenspeicherung haben sich relationale Datenbanken als zweckmäßig erwiesen. Es ist jedoch durchaus auch üblich die Daten in gewöhnlichen Textdateien in Form von Listen mit definierten, eine Tabellenstruktur aufweisenden Abschnitten zu speichern.

### 3.4.3 Modellierung des Leitungsnetzes

Wie im vorigen Abschnitt beschrieben, wird die Topologie eines Leitungsnetzes als Digraph abgebildet. Ein homogener Leitungsabschnitt wird dabei als Strang mo-

delliert, der einen Anfangs- und einen Endknoten besitzt. Über die Zuordnung von Koordinaten und Höhen zu den Knoten wird die räumliche Lage der Leitungsabschnitte definiert. Den Strängen sind alle wesentlichen physikalischen Eigenschaften wie Länge, Innendurchmesser und Rauheit als Attribute zugeordnet.

Die Länge muss dabei meist nicht unbedingt der Koordinatendifferenz des Anfangs- und Endknotens entsprechen. So ist es möglich, die Rauheit über eine äquivalente Rohrlänge zu modellieren oder einen Leitungsverlauf vereinfacht darzustellen. Durch die Angabe von Stranglängen ist die Zuordnung von Koordinaten zu den Knoten für die Rohrnetzberechnung unerheblich (s. Kap 3.7). Die Koordinaten dienen lediglich der Darstellung. Der nicht lineare Verlauf eines homogenen Leitungsabschnitts kann mit den so genannten Zwischenpunkten dargestellt werden (s. Abb. 3.3). Die Verwendung von Zwischenpunkten zur Darstellung des Leitungsverlaufs ermöglicht die Reduzierung der Anzahl von Modellknoten.

### 3.4.4 Modellierung der Wassereinspeisungen und Wasserentnahmen

Wassereinspeisungen und Wasserentnahmen werden auf Grund ihres punktuellen räumlichen Bezugs als Knoten modelliert. Knoten, die eine Wassereinspeisung repräsentieren, werden auch Einspeiseknoten genannt. Knoten, die eine Wasserentnahme repräsentieren, werden auch Verbrauchs- oder Bedarfsknoten genannt. Die Charakteristika der Wassereinspeisungen oder Wasserentnahmen werden den Knoten als Attribute zugeordnet. Dabei sind folgende Wassereinspeisungen oder Wasserentnahmen prinzipiell zu unterscheiden:

- Vorgegebene Einspeise- oder Entnahmemenge (Parameter) bei zu berechnender Druckhöhe (Variable)
- Vorgegebene Druckhöhe (Parameter) bei zu berechnender Einspeise- oder Entnahmemenge (Variable)
- Einspeise- oder Entnahmemenge (Variable) ist von der Druckhöhe am Knoten (Variable) abhängig

Im Folgenden ist die gängige Modellierung verschiedener Wassereinspeisungen und Wasserentnahmen für eine Rohrnetzberechnung beschrieben (s. Kap. 3.7).

**Wassereinspeisungen:** Die Wassereinspeisung aus z.B. Stauseen oder Grundwasseraquifern kann durch die Vorgabe einer ggf. zeitlich skalierten Potentialhöhe am Einspeiseknoten modelliert werden. Dabei wird von einer unendlich großen, zur Verfügung stehenden Wassermenge ausgegangen. Die Einspeisemenge ist variabel und wird berechnet. Die Einspeiseknoten werden üblicherweise als Reservoir bezeichnet.

Bei einem Behälter (auch als Tank bezeichnet) entspricht die Potentialhöhe dem aktuellen Wasserspiegel. Bei einer zeitabhängigen Rohrnetzberechnung ergibt sich der Wasserspiegel des jeweiligen Zeitschritts aus der Behälterfluktuation (s. Kap. 3.7.5). Die Behältergeometrie sowie der Wasserspiegel zu Beginn des ersten

Zeitschritts werden dabei vorgegeben. Es kann auch eine Einspeisemenge durch einen Verbrauchsknoten mit negativer Wasserentnahme am Knoten vorgegeben werden. Die Potentialhöhe ist dabei variabel. Des Weiteren ist die Vorgabe einer Durchfluss-Druck-Beziehung ähnlich einer Pumpenkennlinie für eine Einspeisung möglich.

**Wasserentnahmen:** Üblicherweise werden der häusliche und industrielle Wasserverbrauch als vorgegebene, ggf. zeitlich skalierte Entnahmemengen modelliert. Der Systemdruck ist variabel und wird berechnet. Dieses, bedarfsabhängige Rohrnetz-berechnung genannte Verfahren ist für normale Lastfälle hinreichend genau.

Für die Modellierung außergewöhnlicher Lastfälle, wie z.B. Löschwasserentnahmen oder intermittierende Betriebsweisen, die in Netzbereichen zu mangelnder Versorgung führen können, ist die Vorgabe von Entnahmemengen u.U. unzureichend. Die Vorgabe von Entnahmemengen als Parameter kann im Berechnungsergebnis zu unrealistischen Druckhöhen führen. Eine bedarfsabhängige Modellierung ist in diesen Fällen nur noch begrenzt aussagekräftig (Trifunovic und Vairavamoorthy, 2008; Ang und Jowitt, 2006). Es besteht jedoch die Möglichkeit die Druckabhängigkeit der Wasserentnahmen zu modellieren. Dabei werden die charakterisierenden Durchfluss-Druck-Beziehungen den Knoten als Attribute zugeordnet. In der Praxis ist dies jedoch schwierig umzusetzen, da i.A. diese Beziehungen nicht bekannt sind und eine entsprechende Modellkalibrierung meist sehr aufwändig ist. Eine Ausnahme stellen genormte Sprinkler dar, deren Düsencharakteristik über Versuche ermittelt werden und in der Literatur zu finden sind. Knoten, die eine druckabhängige Entnahme repräsentieren, werden auch Emitter genannt.

Speziell in Entwicklungsländern stellen reale Wasserverluste eine oft wesentliche, im Modell zu berücksichtigende Wasserentnahme dar. Wasserverlustmengen sind abhängig von den Druckverhältnissen sowie von einer Vielzahl physikalischer Randbedingungen (s. Kap. 2.4.4.3). Im hydraulischen Modell können Leckagen als druckabhängige Entnahmen berücksichtigt werden. Die Ermittlung der die Druck-Durchfluss-Beziehung beschreibenden Koeffizienten (Koeffizient  $c$  und Exponent  $\alpha$  in Gleichung 2.19) sowie der Lage der Leckage sind wie bereits oben erwähnt in der Praxis jedoch sehr schwierig. Eine gängige Vorgehensweise ist daher die Verteilung der Wasserverlustmengen proportional zum Wasserverbrauch. Dabei werden die realen Wasserverluste am Verbrauchsknoten als prozentualer Anteil der Verbrauchsmenge angesetzt. Die Druckabhängigkeit der realen Wasserverluste kann über eine angepasste zeitliche Skalierung (Verbrauchsganglinie) berücksichtigt werden.

#### 3.4.5 Modellierung der Kontrollarmaturen

Kontrollarmaturen wirken auf den Fließ- und Druckzustand im System ein. Auf Grund ihres hydraulischen Verhaltens sind sie meist den Strängen zugeordnet. Soll ein Strang ausschließlich eine Kontrollarmatur repräsentieren, wird diesem Strang die Länge der Armatur zugewiesen. In einer graphischen Darstellung wird somit die exakte Lage der Kontrollarmatur wiedergegeben. Der Strang kann aber auch gleichzeitig einen Leitungsabschnitt repräsentieren. Dabei wird die exakte Lage der

Kontrollarmatur in der Darstellung, nicht aber die exakte Hydraulik vernachlässigt. Dadurch lässt sich die Anzahl der Modellknoten reduzieren.

Kontrollarmaturen können hinsichtlich ihrer Funktionsweise untergliedert werden. Die gängigen Optionen zur Modellierung von Kontrollarmaturen entsprechend ihrer Wirkungsweise sind im Folgenden beschrieben. In Klammern werden die englischen Bezeichnungen sowie die gebräuchlichen Abkürzungen angegeben. Pumpen können zu den Kontrollarmaturen gezählt werden. Wegen ihrer besonderen Bedeutung in der Wasserverteilung und Modellierung werden sie jedoch im nächsten Kapitel gesondert behandelt.

**Rückschlagklappe (*check valve, CHV* oder *CV*):** Eine Rückschlagklappe lässt einen Durchfluss nur in eine bestimmte vorgegebene Richtung zu. Meist bestimmt die Richtung des Stranges (vom Anfangs- zum Endknoten) die mögliche Fließrichtung.

**Durchflusskontrollschieber (*flow control valve, FCV*):** Ein Durchflusskontrollschieber begrenzt über einen örtlichen, variablen Druckhöhenverlust  $h$  den Durchfluss  $Q$  im zugeordneten Strang auf einen bestimmten vorgegebenen Maximalwert  $Q_{soll}$ . Kleinere Flüsse als der Grenzfluss sind möglich. Der Durchflusskontrollschieber ist dann inaktiv. Des Weiteren kann der Schieber vollständig geschlossen sein. Es existieren demnach drei Betriebszustände:

- Inaktiv ( $Q < Q_{soll}; h = 0$ )
- Aktiv ( $Q = Q_{soll}; 0 < h < \infty$ )
- Geschlossen ( $Q = 0 = Q_{soll}; h = \infty$ )

**Drosselschieber (*throttle control valve, TCV*):** Mit einem Drosselschieber wird im zugeordneten Strang in Abhängigkeit der Geschwindigkeitshöhe  $v^2/(2 \cdot g)$  und eines vorgegebenen Verlustbeiwerts  $\zeta$  ein lokaler Druckhöhenverlust  $h = \zeta \cdot v^2/(2 \cdot g)$  erzeugt (s. auch Kap. 3.7.2.5).

**Druckminderer (*pressure reducing valve, PRV*):** Ein Druckminderer begrenzt über einen örtlichen, variablen Druckhöhenverlust  $h$  im zugeordneten Strang den Druck  $P$  am Endknoten des Strangs auf einen bestimmten vorgegebenen Maximalwert  $P_{soll}$ . Kleinere Drücke als der Grenzdruck sind möglich. Der Druckminderer ist dann inaktiv. Des Weiteren kann der Druckminderer vollständig geschlossen sein. Es existieren demnach drei Betriebszustände:

- Inaktiv ( $P < P_{soll}; h = 0$ )
- Aktiv ( $P = P_{soll}; 0 < h < \infty$ )
- Geschlossen ( $P = 0 \geq P_{soll}; h = \infty$ )

**Druckunterstützer (*pressure sustaining valve, PSV*):** Ein Druckunterstützer erhöht über einen örtlichen, variablen Druckhöhenverlust  $h$  im zugeordneten Strang den Druck  $P$  am Anfangsknoten des Strangs auf einen vorgegebenen Sollwert  $P_{soll}$ .

Der Druckunterstützer ist inaktiv, wenn der Druck am Anfangsknoten größer ist als der Solldruck. Kann der Solldruck am Anfangsknoten nicht durch einen zusätzlichen lokalen Druckhöhenverlust im Strang erreicht werden, wird der Strang geschlossen. Am Anfangsknoten herrscht der maximal mögliche Druck  $P_{max}$  vor. Es existieren demnach drei Betriebszustände:

- Inaktiv ( $P \geq P_{soll}; h = 0$ )
- Aktiv ( $P = P_{soll} \leq P_{max}; 0 < h < \infty$ )
- Geschlossen ( $P = P_{max} < P_{soll}; h = \infty$ )

**Druckabhängiger Schieber (*pressure depending valve, PDV*):** Der druckabhängige Schieber schließt den zugeordneten Strang, wenn der Druck am Kontrollknoten den vorgegebenen Grenzdruck  $P_{zu}$  erreicht. Der Strang wird wieder geöffnet, wenn der Druck einen zweiten Grenzwert  $P_{auf}$  unterschreitet. Der vorgegebene Kontrollknoten muss nicht zwingend eine Anfangs- oder Endknoten des Schieberstrangs sein. Der druckabhängige Schieber stellt eine Modellierungsoption dar, die mehrere reale Entsprechungen hat. Sowohl schwimmerabhängige als auch druckabhängige Steuerungen (auf/zu) eines Schiebers können modelliert werden.

**Schieber:** Meist kann jeder Strang eines Modells über die Angabe des Status vollständig geschlossen werden. Diese Modellierungsoption entspricht einem Schieber, der entweder vollständig geöffnet oder vollständig geschlossen sein kann.

**Zeitabhängiger Schieber (*time depending valve, TDV*):** Der zeitabhängige Schieber schließt bzw. öffnet den zugeordneten Strang an vorgegebenen Zeitpunkten.

In Ergänzung zu der Untergliederung der Kontrollarmaturen entsprechend ihrer Wirkungsweise werden im Folgenden Kontrollarmaturen entsprechend ihrer hydraulischen Charakteristik typisiert. Hinsichtlich der Beschreibung ihres hydraulischen Verhaltens können drei Gruppen von Kontrollarmaturen voneinander abgegrenzt werden (Deuerlein, 2002). Diese Gruppen sind im Folgenden beschrieben. Die Zugehörigkeit der weiter oben beschriebenen Modellierungsoptionen zu einer oder mehreren der Gruppen ist in Tabelle 3.6 dargestellt.

**Flusskontrollierende Armaturen:** Der Betriebszustand flusskontrollierender Armaturen hängt vom Durchfluss bzw. Druckhöhenverlust und damit vom hydraulischen Gleichgewichtszustand im Rohrnetz ab. Das hydraulische Verhalten der Armaturen kann daher analytisch beschrieben werden. Die Berechnung des hydraulischen Gleichgewichts setzt allerdings Kenntnisse über den Betriebszustand der Kontrollarmaturen im Rohrnetz voraus. Zu den flusskontrollierenden Armaturen gehören Rückschlagklappe, Durchflusskontrollschieber, Drosselschieber und Druckerhöhungsanlagen.

**Druckkontrollierende Armaturen:** Im Sinne einer Regelung wird durch das hydraulische Verhalten der druckkontrollierenden Armatur am Kontrollknoten ein vorgegebener Solldruck erreicht. Das hydraulische Verhalten druckkontrollierender Armaturen kann nicht in einer Durchfluss-Druckverlust-Beziehung beschrieben werden. Zu den druckkontrollierenden Armaturen gehören Druckminderer, Druckunterstützer und druckabhängige Schieber.

**Armaturen mit vorgegebenen Betriebszuständen:** Bei bestimmten Armaturen wird der Betriebszustand als Parameter vorgegeben. Zu dieser Armaturengruppe sind z.B. Schieber zu rechnen, mit denen ein Leitungsstrang vollständig geschlossen wird. Die Drehzahlsteuerung einer Pumpe ist ebenfalls dieser Gruppe zuzuordnen, während die eigentliche Druckerhöhung der Pumpe in Abhängigkeit des hydraulischen Gleichgewichts im System der Gruppe flusskontrollierender Armaturen zuzuordnen ist.

Tabelle 3.6: Typisierung wichtiger Kontrollarmaturen

Kontrollarmatur	flussktrl.	druckktrl.	vorgeg.
Rückschlagklappe	✓		
Durchflusskontrollschieber	✓		
Drosselschieber	✓		
Druckminderer		✓	
Druckunterstützer		✓	
Druckabhängiger Schieber		✓	
Schieber			✓
Zeitabhängiger Schieber			✓
Druckerhöhungsanlage	✓		✓

### 3.4.6 Modellierung der Pumpen

Förderanlagen werden je nach verwendeter Software strangbezogen oder knotenbezogen modelliert. Der Druck wird zwischen Anfangs- und Endknoten des zugeordneten Strangs bzw. am zugeordneten Knoten erhöht. Für die Druckerhöhung wird meist eine Durchfluss-Druckerhöhung-Beziehung angegeben, die die Pumpenkennlinie einer Kreiselpumpe bei der Nenndrehzahl repräsentiert.

Um einen eindeutigen Betriebspunkt zu gewährleisten, muss im Gegensatz zur realen Pumpenkennlinie die Durchfluss-Druckerhöhung-Beziehung durch eine monoton fallende Funktion abgebildet werden. Eine Änderung der Förderleistung wird über das Verhältnis der Drehzahl zur Nenndrehzahl angegeben. Die Durchfluss-Druckerhöhung-Beziehung wird durch Anwendung der Affinitätsgesetze umgerechnet (s. Kap. 2.3.4). Außerdem ist die Vorgabe eines Solldrucks an einem Kontrollknoten möglich. Die notwendige Druckerhöhung zur Gewährleistung des Soll-

drucks wird unter Berücksichtigung des Systemzustands berechnet. Eine Durchfluss-Druckerhöhung-Beziehung wird nicht vorgegeben.

### 3.4.7 Mathematische Abbildung

Der das Leitungsnetz abbildende Digraph  $D$  kann mit der Inzidenzmatrix  $\mathbf{A}_D$  dargestellt werden (s. Gl. 3.1). Die vorgegebenen Wasserentnahmen an den Knoten können in einem Bedarfsvektor  $\mathbf{Q}$  zusammengefasst werden. Bei der Rohrnetzbe-  
rechnung werden die Durchflüsse und Druckhöhenverluste in den Strängen sowie die Potentialhöhen an den Knoten ermittelt. Die Durchflüsse im Leitungsnetz können im Durchflussvektor  $\mathbf{q}$ , Druckhöhenverluste im Vektor  $\mathbf{h}$  und die berechneten Potentialhöhen im Vektor  $\mathbf{H}$  dargestellt werden.

Knoten, die eine Einspeisung mit vorgegebenem Potential repräsentieren (Behälter, Reservoirs), werden im Modell für die Rohrnetzbe-  
rechnung über einen virtuellen Strang mit einem virtuellen Referenzknoten verbunden. Analog werden Knoten, die eine druckabhängige Entnahme (Hydranten, Sprinkler) repräsentieren oder eine gegebenen Druck-Durchfluss-Beziehung (Einspeisepumpen) aufweisen, über virtuelle Stränge mit dem Referenzknoten verbunden.

Der Referenzknoten gibt ein globales Bezugspotential für das modellierte System vor. Die Massenbilanz am virtuellen Referenzknoten stellt die gesamte Systemeinspeisung und -entnahme dar. Existieren mehrere Knoten mit vorgegebenem Potential, sind demnach virtuelle Schleifen zu berücksichtigen. Der Graph bzw. Digraph inklusive virtuellem Referenzknoten und virtuellen Strängen wird auch als erweiterter Graph bzw. erweiterter Digraph (*augmented graph*) bezeichnet.

Abbildung 3.4 zeigt das Beispiel eines erweiterten Digraphen. Die virtuellen Stränge  $V_1, V_2$  und  $V_3$  verbinden die Knoten  $K_1$  (Reservoir),  $K_4$  (Behälter) und  $K_6$  (druckabhängige Entnahme) mit dem virtuellen Referenzknoten  $R$ . Weitere Ausführungen zur Rohrnetzbe-  
rechnung finden sich in Kapitel 3.7.

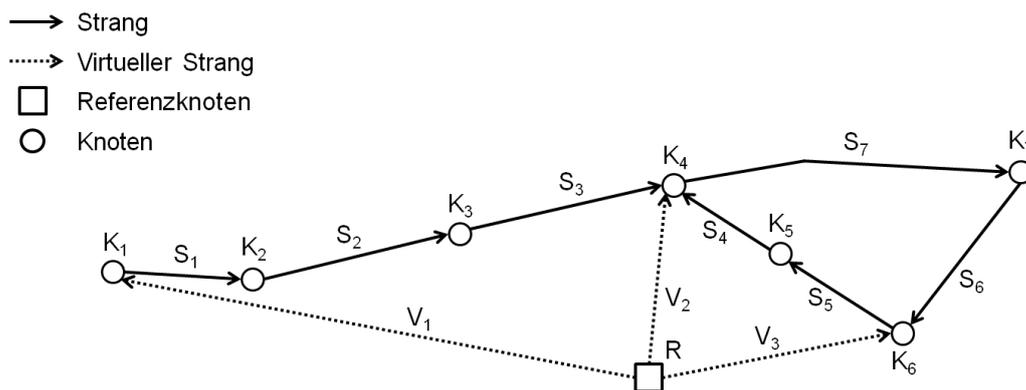


Abbildung 3.4: Beispiel eines erweiterten Digraphen

## 3.5 Modellparameter

### 3.5.1 Einteilung der Modellparameter

Je nach Aufgabe sind die Eigenschaften des Rechenmodells Parameter oder Variablen. Bei der Rohrnetzberechnung sind das Verteilungssystem, die Wasserentnahmen, Einspeisepotentiale und Steuervorgaben gegebene Parameter (s. Kap. 3.7). Die variablen Drücke an den Knoten, Flüsse und Fließgeschwindigkeiten in den Strängen, Wasserspiegeländerungen in den Behältern, Kontrollzustände der Armaturen, Verweilzeiten des Wassers sowie Ausbreitungen und Durchmischungen werden berechnet. Die Qualität der Modellparameter entscheidet letztendlich über die Qualität der Berechnungsergebnisse. Daher ist eine an die Aufgaben des Modells angepasste Parametrierung des Modells unerlässlich. Dabei ist der Aufwand für die Beschaffung der Parameter mit der erreichbaren Qualität und Aussagekraft der Berechnungen abzuwägen.

Deurerlein (2002) teilt die Parameter eines Simulationsmodells bzgl. ihrer Erhebung und Qualität in drei Gruppen ein:

- Direkt und mit genügender Genauigkeit messbare Parameter (z.B. Lage des Leitungsnetzes, Behältergeometrien, Pumpencharakteristiken, Steuervorgaben, Wasserverbrauch von Großabnehmern)
- Direkt aber u.U. mit nicht genügender Genauigkeit messbare Parameter (z.B. Wasserverbrauch der Haushalte)
- Nicht direkt messbare Parameter (z.B. Rauheiten der Leitungen, Innendurchmesser der Leitungen, Wasserverluste)

Die DVGW (2006a) gibt für die wichtigen Parameter Lage des Leitungsnetzes, Einspeisemengen und Einspeisedrücke, Wasserverbräuche sowie für die physikalischen Eigenschaften des Wassers zulässige Abweichungen an. Des Weiteren werden für Leitungsrauheiten in Abhängigkeit der Nutzungsart Richtwerte gegeben. Die Bestimmung nicht direkt oder nicht mit genügender Genauigkeit ermittelbarer Parameter ist Aufgabe der in den nächsten beiden Kapiteln beschriebenen Modellkalibrierung.

### 3.5.2 Kalibrierung des Modells

Bei der Modellkalibrierung (auch Vergleichsrechnung genannt) werden reale, gemessene Systemzustände mit Systemzuständen verglichen, die unter gleichen Voraussetzungen berechnet wurden. Das Modell wird bei auftretenden Abweichungen entsprechend angepasst. Der Kalibrierungsprozess umfasst i.A. die Parameter Rauheit der Leitungen, Wasserverbräuche, Wasserverluste und Steuervorgaben, wobei der Ermittlung der Rauheiten die größte Bedeutung zukommt (DVGW, 2006a; Walski u. a., 2001a). Bei der Kalibrierung der Rauheiten wird meist die integrale Rauheit des Netzes verwendet (s. Kap. 3.7.2.6). Die integrale Rauheit umfasst hierbei die reale Rauheit des Rohrabschnitts, lokale Druckverluste (z.B. Krümmer), Inkrustationen und Verschmutzungen der Leitungen sowie unbekannt Einflüsse (z.B.

Unstimmigkeiten im Datenbestand, wie nicht bekannte, teilgeschlossene Schieber oder fehlerhafte Durchmesserangaben). Als Messdaten werden Drücke, Durchflüsse, Einspeisungen und Qualitätsparameter (z.B. Tracer) verwendet (Deuerlein, 2002).

Die Hauptaufgabe der Kalibrierung ist die Ermittlung der Rauheiten. Dazu sind Druck- und Durchflussmessungen notwendig. Hierfür gibt die DVGW (2006a) Richtwerte für die Anzahl der Messpunkte, notwendige Druckabfälle während der Messung sowie zulässige Abweichungen der Messwerte zu den Vergleichsrechnungen an. Für weiterführende Informationen zur Kalibrierung wird auf die Fachliteratur verwiesen, z.B. Bhave (1991) und AWWA (2005). Eine Übersicht der Kalibrierungsverfahren wird im nächsten Kapitel gegeben.

#### 3.5.3 Kalibrierungsverfahren

Sowohl die Wahl sensitiver Messstellen als auch effiziente Kalibrierungsverfahren sind auf Grund ihrer Komplexität seit vielen Jahren Gegenstand der Forschung. Deuerlein (2002) grenzt Probierv Verfahren, explizite Verfahren, die Methode der kleinsten quadratischen Abweichungen und implizite Verfahren voneinander ab und gibt einen Überblick über die Verfahren und die entsprechende Literatur.

Bei Probierv Verfahren werden die Modellparameter zunächst geschätzt. Die Schätzungen sowie die Anzahl und Wahl der Messstellen basieren meist auf Literaturwerten sowie Erfahrungen und Kenntnissen des Modellierers. Das Ergebnis einer Simulationsrechnung unter Berücksichtigung der geschätzten Parameter wird mit den gemessenen Werten verglichen. Bei Abweichungen werden die Parameter vom Modellierer geändert. Dieses Verfahren wird wiederholt, bis eine genügend genaue Übereinstimmung zwischen Messwerten und berechneten Werten herrscht. Das Probierv Verfahren ist sehr zeitaufwändig und führt u.U. nicht zur geforderten Genauigkeit. Für ausführliche Beschreibungen des Verfahrens wird auf DVGW (2006a), AWWA (2005), Wiegleb und Beilke (1999) sowie Bhave (1991) verwiesen.

Unter expliziten Verfahren wird die exakte analytische Parameterbestimmung verstanden. Dabei ist die Kalibrierung in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Messungen auf eine feste Zahl von Parametern beschränkt (Ormsbee und Wood, 1986; Deuerlein, 2002).

Übersteigt die Anzahl der gemessenen Größen die Anzahl der zu kalibrierenden Parameter, kann die Methode der kleinsten quadratischen Abweichungen angewandt werden. Diese Methode besteht aus der Minimierung einer Funktion, in die sowohl die Messwerte als auch die Werte der Vergleichsrechnungen eingehen. Für die Erhebung der relativ großen Anzahl benötigter Messwerte ist die Herstellung vieler Betriebszustände notwendig.

Im Gegensatz dazu sind implizite Verfahren für beliebige Messwerte und Betriebszustände anwendbar. Bei impliziten Verfahren wird die Kalibrierung als Optimierungsaufgabe mit Nebenbedingungen formuliert. Zur Lösung der Optimierungsaufgabe werden neben expliziten Verfahren auch stochastische Verfahren wie Genetische Algorithmen angewandt. Deuerlein (2002) beschäftigt sich mit der expliziten Lösung. Darstellungen von impliziten Verfahren finden sich bei Ormsbee (1989).

## 3.6 Modellierungsprozess

Unter dem Begriff Modellierungsprozess werden alle Arbeitsschritte verstanden, die zur Erstellung eines operationellen hydraulischen Modells notwendigen sind. Grundsätzlich kann der Modellierungsprozess in vier Hauptschritte unterteilt werden, auf die im Folgenden näher eingegangen wird:

1. Definition der Modellanforderungen
2. Datenerhebung und Datenaufbereitung
3. Modellerstellung
4. Modellkalibrierung

**Definition der Modellanforderungen:** Vor der Modellierung werden die Aufgaben des zu erstellenden Modells definiert. Daraus ergeben sich der Detaillierungsgrad, die notwendige Genauigkeit des Modells und somit die zu erhebenden Datengrundlagen (Walski u. a., 2001a). D.h. die Modellanforderungen sind entscheidend für den Aufwand und letztendlich für die Kosten der eigentlichen Modellierung. Genügt Qualität und Quantität der vorhandenen Daten nicht den Erwartungen, müssen die möglichen Modellanforderungen u.U. entsprechend korrigiert werden.

**Datenerhebung und Datenaufbereitung:** Die Qualität, Quantität und Art der zur Verfügung stehenden Daten sind von Fall zu Fall verschieden. Auf Grund unterschiedlicher Modellanforderungen und unterschiedlicher Datenquellen lassen sich daher allgemeine Aussagen über den notwendigen Umfang und die notwendige Qualität der Daten nicht treffen. Auch lässt sich eine allgemeine Vorgehensweise der Datenerhebung nur schwer angeben. Auf Grund dieses individuellen Charakters ist die Datenerhebung nicht exakt planbar und stellt erfahrungsgemäß den zeitaufwendigsten Teil einer Modellierung dar.

Es können vier Gruppen notwendiger Daten unterschieden werden (AWWA, 2005):

- Geographische Daten
- Systemdaten
- Betriebsdaten
- Wasserverbrauchsdaten

Zu den geographischen Daten sind alle Rauminformationen wie z.B. topographische Daten, Landnutzungsdaten, politische Grenzen, Luftbilder und digitale Geländemodelle zu zählen. Die Systemdaten umfassen alle physischen Eigenschaften des Verteilungssystems wie z.B. Leitungs-, Pumpen-, Armaturen- und Behälterdaten. Die Randbedingungen des Modells wie z.B. Steuervorgaben der Pumpen und Armaturen sowie Einspeisepotentiale werden als Betriebsdaten bezeichnet. Unter Wasserverbrauchsdaten werden alle Wasserentnahmen sowie deren zeitliche Änderungen (Ganglinien) verstanden.

Zunächst ist es empfehlenswert eine Bestandsaufnahme der vorhandenen Daten anzufertigen. Eine detaillierte Datenaufstellung für eine Bestandsaufnahme beschreibt die AWWA (2005). Die Bestandsaufnahme gibt darüber Aufschluss, welche Daten direkt in digitaler oder physikalischer Form vorliegen, welche aus digitalen oder physikalischen Sekundärdaten entwickelt werden können und welche im Feld zu erheben sind. Daraus lässt sich der Aufwand für die Datenerhebung, Datenaufbereitung und Kalibrierung sowie der erreichbare Detaillierungsgrad des Modells ableiten. Für die Datenaufbereitung ist eine geeignete digitale Plattform zu wählen. Zweckmäßig sind hierfür GI-Systeme, die eine flexible Analyse, Verknüpfung und Verschneidung raumbezogener Daten ermöglichen (s. Kap. 2.5.5.2).

**Modellerstellung:** Die Modellerstellung umfasst die Abstraktion der im vorigen Abschnitt beschriebenen physischen und nicht-physischen Daten des Verteilungssystems sowie die Überführung dieser Daten in ein Knoten-Strang-Modell (s. Kap. 3.4). Außerdem werden im Rahmen der Modellerstellung alle notwendigen allgemeinen Berechnungsparameter sowie Anfangsschätzungen der zu kalibrierenden Parameter vorgegeben. Die eigentliche Modellerstellung ist ein iterativer Prozess der Datenerhebung und -aufbereitung, der Überführung dieser Daten in das Modell, der Kalibrierung des Modells sowie der Verifizierung der Daten über Vergleichsrechnungen.

**Modellkalibrierung:** Die Kalibrierung dient der Ermittlung von Modellparametern, die nicht direkt erhoben werden können (s. Kap. 3.5.2). Außerdem ist die Verifizierung und Evaluierung der Berechnungsergebnisse sowie ggf. die entsprechende Modellüberarbeitung bei festgestellten Abweichungen zur Kalibrierung zu zählen.

## 3.7 Hydraulische Rohrnetzrechnung

### 3.7.1 Terminologie und Definitionen

**Hydraulische Rohrnetzrechnung:** Unter dem Begriff der hydraulischen Rohrnetzrechnung wird i.A. die Ermittlung des hydraulischen Systemzustands (Druck- und Flussverteilung) eines Wasserverteilungsnetzes verstanden. In diesem Sinne wird die Rohrnetzrechnung auch Simulation des hydraulischen Systemzustands genannt. Variablen der Berechnung sind die Druckhöhen an den Potentialknoten sowie die Durchflussmengen und Fließgeschwindigkeiten in den Leitungssträngen. Parameter der Berechnung sind das Leitungsnetz mit physikalischen Größen (Durchmesser, Rauheiten), die Topologie sowie die geographischer Lage, die Armaturen mit Charakteristika, die Wassereinspeisemengen mit Potentialhöhen und bei bedarfsabhängiger Simulation die Wasserentnahmen.

**Bedarfsabhängige und druckabhängige Rohrnetzrechnung:** Es wird zwischen der bedarfsabhängigen und der druckabhängigen Simulation unterschieden. Meist

ist bei der Berechnung des hydraulischen Systemzustands die Vorgabe der Wasserentnahmemengen an den Modellknoten als weiterer Parameter hinreichend genau. Sind die Wasserentnahmen vorgegeben, wird von der bedarfsabhängigen Simulation gesprochen. Bei der druckabhängigen Simulation wird dem Umstand Rechnung getragen, dass die Wasserentnahme in Beziehung zum anstehenden Druck am Entnahmepunkt steht. Die Modellierung und Berechnung ist in diesem Fall allerdings ungleich aufwändiger und schwieriger als bei der bedarfsabhängigen Simulation. Im Folgenden wird unter der Rohrnetzrechnung die bedarfsabhängige Simulation verstanden.

**Stationäre Rohrnetzrechnung:** Bei der stationären Rohrnetzrechnung wird für vorgegebene konstante Parameter für einen bestimmten Zeitpunkt der hydraulische Systemzustand berechnet. Die stationäre Rohrnetzrechnung ist näher in Kapitel 3.7.4 beschrieben.

**Zeitabhängige Rohrnetzrechnung:** Verschiedene Parameter, wie z.B. Wasserverbräuche und Behälterfüllstände, sind im realen System nicht konstant. Aufgabe der zeitabhängigen Rohrnetzrechnung ist die Berücksichtigung der zeitlichen Parameteränderungen. Auf Grund der geringen Fließgeschwindigkeiten können bei der zeitabhängigen Berechnung die Beschleunigungskräfte vernachlässigt werden. Der zu untersuchende Simulationszeitraum wird in Zeitschritte unterteilt und die veränderlichen Parameter werden entsprechend diskretisiert. Die eigentliche Berechnung ist eine Abfolge stationärer Berechnungen, die deshalb auch als quasi-stationäre Berechnung bezeichnet wird. Auch ist die Bezeichnung dynamische Rohrnetzrechnung gebräuchlich. Unter dem Begriff 'dynamisch' wird im technischen Sprachgebrauch jedoch meist die Berücksichtigung von Beschleunigungskräften verstanden. Um Missverständnisse zu vermeiden, wird im Folgenden der Begriff zeitabhängige Rohrnetzrechnung verwendet.

## 3.7.2 Grundlagen der Rohrhydraulik

### 3.7.2.1 Bewegungsarten des Wassers

Grundlegend werden die Bewegungsarten Fließen und Stürzen des Wassers unterschieden. Unter Fließen wird die Bewegung des Wassers innerhalb fester Wandungen verstanden. Das Stürzen beschreibt die Bewegung des Wassers im offenen luftgefüllten Raum. Für das Fließen wird des Weiteren das laminare und turbulente Fließen sowie das stationäre und instationäre Fließen unterschieden (s. Kap. 3.7.2.4 und Mutschmann und Stimmelmayer (2007)). Im stationären Fließzustand ist die Geschwindigkeit im betrachteten Strömungsfeld zum Betrachtungszeitpunkt an jedem Punkt gleich groß. Es existieren keine lokalen Beschleunigungen im Strömungsfeld. Im instationären Fließzustand sind die Geschwindigkeiten im betrachteten Strömungsfeld verschieden und es existieren lokale Beschleunigungen.

### 3.7.2.2 Massenerhaltung

Im stationären Fließzustand gilt für das mit einem inkompressiblen Fluid vollgefüllten Rohr entsprechend des Prinzips der Massenerhaltung die Kontinuitätsgleichung (s. Gl. 3.5).

$$Q_i = v_i \cdot A_i = \textit{konst.} \quad (3.5)$$

Dabei ist  $Q_i$  [ $l/s$ ] der Durchfluss durch den Querschnitt  $i$  mit der Fläche  $A_i$  [ $m^2$ ] und der Fließgeschwindigkeit  $v_i$  [ $m/s$ ].

### 3.7.2.3 Energieerhaltung

Entsprechend des Prinzips der Energieerhaltung besagt die Gleichung nach Bernoulli, dass unter inkompressiblen Bedingungen für die rotationsfreie Strömung die Summe der Geschwindigkeitshöhe  $v^2/(2 \cdot g)$ , der geodätischen Höhe  $z$  und der Druckhöhe  $p/(\rho \cdot g)$  konstant ist (Jirka, 2007). Dabei ist  $v$  die Geschwindigkeit,  $\rho$  die Dichte,  $p$  der Druck des Fluids und  $g$  die Erdbeschleunigung. Gleichung 3.6 zeigt die um den Druckhöhenverlust  $h$  erweiterte Bernoulli-Gleichung.

$$\frac{v^2}{2 \cdot g} + z + \frac{p}{\rho \cdot g} + h = \textit{konst.} \quad (3.6)$$

Die Geschwindigkeitshöhe meist vernachlässigbar klein. Deshalb genügt für die Berechnung der Druckhöhe in einem Wasserverteilungsnetz i.A. die Berücksichtigung der Druckhöhe, des Druckhöhenverlusts und der geodätischen Höhe. Für die Betrachtung lokaler Druckhöhenverluste ist jedoch die Geschwindigkeitshöhe von Bedeutung (s. Kap. 3.7.2.5 und Mutschmann und Stimmelmayer (2007)).

### 3.7.2.4 Kontinuierliche Druckhöhenverluste

Der Durchfluss von Wasser durch ein vollgefülltes, gerades Rohr ist mit Energiehöhenverlusten in Folge innerer (Viskosität des Fluids) und äußerer (Rohrwandung) Reibung verbunden. Die Energiehöhenverluste entsprechen den Druckhöhenverlusten. In Deutschland wird der Druckhöhenverlust üblicherweise mit der dimensionshomogenen Formel nach Darcy-Weisbach berechnet (DVGW, 2006a). Des Weiteren finden empirische Ansätze wie z.B. die Formel nach Hazen-Williams, vor allem in Nordamerika, Verwendung (Walski u. a., 2001a,b).

Die Formel von Darcy-Weisbach gibt den Druckhöhenverlust  $h$  [ $m$ ] in einem geraden Rohr mit Kreisquerschnitt und konstantem Reibungsbeiwert  $\lambda$  [–] in Abhängigkeit der Geschwindigkeitshöhe  $v^2/(2 \cdot g)$  [ $m$ ], der Rohrlänge  $L$  [ $m$ ] und des Innendurchmessers  $D$  [ $m$ ] an (s. Gl. 3.7). Dabei  $v$  [ $m/s$ ] die mittlere Fließgeschwindigkeit und  $g$  [ $m/s^2$ ] die Erdbeschleunigung darstellten (Zoebel und Kruschik, 1978).

$$h = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (3.7)$$

Die Ermittlung des dimensionslosen Reibungsbeiwerts  $\lambda$  in Gleichung 3.7 hängt von der Geschwindigkeitsverteilung im Rohrquerschnitt ab, d.h. davon, ob die Strömung laminar oder turbulent ist. Der Strömungszustand im Rohr wird hauptsächlich durch die Parameter mittlere Fließgeschwindigkeit  $v$  [m/s], Innendurchmesser  $D$  [m] und kinematische Viskosität des Fluids  $\nu$  [m<sup>2</sup>/s] bestimmt (Jirka, 2007). Der Strömungszustand wird durch die dimensionslose Reynoldszahl  $Re$  [-] gekennzeichnet.

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (3.8)$$

Die Transition von laminarer zu turbulenter Strömung findet bei einer kritischen Reynoldszahl  $Re_{krit}$  statt. Die DVGW (2006a) und Karger u. a. (2005) geben für die experimentell ermittelte kritische Reynoldszahl einen Wert von 2320 an. Jirka (2007) gibt an, dass eine Strömung bei  $Re < Re_{krit} = 2000$  *definitiv laminar* und bei  $Re \geq Re_{krit} = 2000$  *praktisch immer turbulent* ist.

$$Re_{krit} = 2320 \quad (3.9)$$

Für die turbulente Strömung in Rohrleitungen sind drei Bereiche zu unterscheiden. In einem ersten Bereich, bei *hydraulisch glattem Verhalten* des Rohres, ist die Rauheit  $k$  [mm] (s. Kap. 3.7.2.6) des Rohres kleiner als die viskose Unterschicht und hat keinen Einfluss auf die Strömung. In diesem Fall hängt der Reibungsbeiwert ausschließlich von der Reynoldszahl ab. Im *Übergangsbereich* hängt der Reibungsbeiwert zusätzlich von der relativen Rauheit  $k/D$  des Rohres ab. Bei *hydraulisch rauem Verhalten* des Rohres ist die Rauheit größer als die viskose Unterschicht. Der Reibungsbeiwert hängt ausschließlich von der relativen Rauheit ab (DVGW, 2006a).

**Laminare Strömung:** Im laminaren Strömungsbereich kann der Reibungsbeiwert nach dem Gesetz von Hagen-Poiseulle (s. Gl. 3.10) ermittelt werden (Karger u. a., 2005).

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (3.10)$$

**Turbulente Strömung, hydraulisch glatt:** Im hydraulisch glatten Bereich der turbulenten Strömung kann der Reibungsbeiwert mit Hilfe des Gesetzes von Prandtl-Kármán (s. Gl. 3.11) ermittelt werden (Karger u. a., 2005).

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{\lambda}} &= 2 \lg \frac{Re \cdot \sqrt{\lambda}}{2,51} \\ &= 2 \lg (Re \cdot \sqrt{\lambda}) - 0,80 \end{aligned} \quad (3.11)$$

**Turbulente Strömung, Übergangsbereich:** Im Übergangsbereich der turbulenten Strömung kann der Reibungsbeiwert mit Hilfe des Gesetzes von Prandtl-Colebrook (s. Gl. 3.12) ermittelt werden (DVGW, 2006a).

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left( \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{D \cdot 3,71} \right) \quad (3.12)$$

**Turbulente Strömung, hydraulisch rau:** Im hydraulisch rauhen Bereich der turbulenten Strömung kann der Reibungsbeiwert mit Hilfe des Gesetzes von Prandtl-Kármán (s. Gl. 3.13) ermittelt werden (Karger u. a., 2005).

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{\lambda}} &= 2 \lg \frac{3,71 \cdot D}{k} \\ &= 1,14 - 2 \lg \frac{k}{D} \end{aligned} \quad (3.13)$$

In Wasserverteilungssystemen ist die Strömung auf Grund der Dimensionierung der Leitungsetze (Durchmesser und Geschwindigkeiten) meist im Übergangsbereich. Die DVGW (2006a) empfiehlt daher für die Ermittlung des Reibungsbeiwerts die Verwendung der Gleichung von Prandtl-Colebrook für den Übergangsbereich (s. Gl. 3.12).

### 3.7.2.5 Lokale Druckhöhenverluste

Bei der Durchströmung von Rohrerweiterungen, Rohrverengungen, Krümmern, Verzweigungen, Armaturen usw. wird lokal kinetische Energie verbraucht. Der lokale Druckhöhenverlust hängt von der Geschwindigkeitshöhe (kinetische Energiehöhe) ab. Gleichung 3.14 zeigt die Abhängigkeit des lokalen Druckhöhenverlusts  $h_l$  [m] von der Geschwindigkeitshöhe  $v^2/(2 \cdot g)$  [m]. Der Beiwert  $\zeta$  beschreibt die Form des durchströmten Bauteils und kann z.B. den Tabellenwerken von Zoebel und Kruschik (1978) entnommen werden.

$$h_l = \zeta \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (3.14)$$

Bei der Berechnung der Druckhöhenverluste in Wasserverteilungsnetzen werden die lokalen Druckhöhenverluste meist nicht gesondert berechnet. Die lokalen Druckhöhenverluste werden bei der Berechnung der kontinuierlichen Druckhöhenverluste durch einen erhöhten Rauheitswert, die so genannte integrale Rauheit, mit berücksichtigt.

### 3.7.2.6 Rauheit des Rohres

Bedingt durch die Herstellung und Veränderungen während des Betriebs sind die Wandungen von Rohrleitungen rau. Die Oberflächenbeschaffenheit eines Rohres wird durch die Rauheit  $k$  beschrieben. Nikuradse (1933) hat in Experimenten die geometrisch messbare Größe Sandrauheit  $k_s$  [mm] entwickelt. Die Rohrwandung wurde von Nikuradse in dichtester Lagerung mit Sand beschichtet. Die Sandrauheit  $k_s$

stellt dabei den Korndurchmesser des verwendeten Sandes dar. Mit der Sandrauheit nach Nikuradse lässt sich jedoch die Oberflächenbeschaffenheit handelsüblicher Rohre nicht genügend genau beschreiben. Die Rauheit eines Rohres wird daher üblicherweise mit der äquivalenten Sandrauheit beschrieben. Die im Experiment ermittelte Rauheit eines Rohres zeigt dabei das gleiche Widerstandsverhalten wie das Rohr im Experiment von Nikuradse mit der entsprechenden Sandrauheit (Valentin, 2003). In der Praxis findet bei der Berechnung des Druckhöhenverlusts die integrale Rauheit  $k_i$  [mm] Verwendung. Die integrale Rauheit berücksichtigt alle den Druckverlust steigernden oder mindernden Einflüsse wie z.B. Krümmer, Verzweigungen und Armaturen. Die integrale Rauheit ist als Maß für das hydraulische Verhalten zu verstehen. Ein direkter Zusammenhang zwischen der integralen Rauheit und einer geometrisch messbaren Rauheit besteht nicht (DVGW, 2006a).

### 3.7.3 Grundlagen der Rohrnetzhydraulik

#### 3.7.3.1 Abbildung des Rohrnetzes als Rechenmodell

Das reale Wasserverteilungssystem wird für die Berechnung des hydraulischen Systemzustands als Knoten-Stränge-Modell abgebildet. Dabei stellen die Knoten  $K$  des Rechenmodells Verbindungen der Stränge  $S$  dar. Rohrleitungen sind als Stränge mit konstantem Durchfluss modelliert. Jeder Strang hat genau einen Anfangs- und einen Endknoten. Einspeise- und Entnahmepunkte sind den Knoten zugeordnet. Armaturen sind entsprechend ihrer Charakteristik und des Modellierungsprinzips als Knoten oder Stränge abgebildet. Die Abbildung des realen Systems als rechenfähiges Knoten-Stränge-Modell sowie die notwendigen graphentheoretischen Grundlagen sind detailliert in den Kapiteln 3.3 und 3.4 erläutert.

#### 3.7.3.2 Allgemeine Formulierung des Widerstandsgesetzes

Das Widerstandsgesetz aus Gleichung 3.7 beschreibt die Beziehung des Druckhöhenverlusts  $h$  und des Durchflusses  $q$  und kann wie in Gleichung 3.15 dargestellt allgemein formuliert werden (Bhave, 1991). Der Koeffizient  $R$  und der Exponent  $e$  beinhalten dabei sämtliche Parameter des gewählten Ansatzes zur Ermittlung des Druckhöhenverlusts (s. Kap. 3.7.2.4).

$$h = R \cdot Q^e \quad (3.15)$$

#### 3.7.3.3 Massenerhaltung

Im mit Wasser vollgefüllten Rohr ist entsprechend Gleichung 3.5 die Zuflussmenge gleich der Abflussmenge (Walski u. a., 2001a). In Ergänzung dazu kann das aus der Elektrotechnik bekannte erste Kirchhoffsche Gesetz auf Rohrnetze übertragen und die Knotenbedingung formuliert werden. Die Knotenbedingung besagt, dass an jedem Knoten des Rechenmodells die Summe der Zuflüsse gleich der Summe der Abflüsse sind (Bhave, 1991; DVGW, 2006a). In Gleichung 3.16 ist der Zufluss  $Q_{S,K}$

durch den Strang  $S$  zum Knoten  $K$  positiv und der Abfluss negativ. Dabei ist  $n$  die Anzahl der an den Knoten  $K$  angeschlossenen Stränge. Die Entnahme (positiv) oder Einspeisung (negativ) am Knoten  $K$  ist mit  $Q_{E,K}$  bezeichnet.

$$\sum_S^n Q_{S,K} - Q_{E,K} = 0 \quad (3.16)$$

### 3.7.3.4 Energieerhaltung

Das durch Gleichung 3.6 ausgedrückte Prinzip der Energieerhaltung besagt, dass die Potentialdifferenz zwischen zwei Knoten eines Rohrnetzes gleich groß ist, unabhängig davon, welcher Pfad im Netz zwischen den Knoten betrachtet wird (Walski u. a., 2001a). Des Weiteren ist für alle Stränge der Druckhöhenverlust gleich der Differenz der Potentialhöhen der Anfangs- und Endknoten (Deuerlein, 2002). Die als Kompatibilitätsbedingung bezeichnete Beziehung zwischen den Potentialhöhen und dem Druckhöhenverlust ist in Gleichung 3.17 dargestellt. Dabei ist  $H_{K1,S}$  die Potentialhöhe des Anfangsknotens und  $H_{K2,S}$  die Potentialhöhe des Endknotens des Stranges  $S$  sowie  $h_S$  der Druckhöhenverlust im Strang  $S$ .

$$H_{K1,S} = H_{K2,S} + h_S \quad (3.17)$$

In diesem Zusammenhang lässt sich das zweite Kirchhoffsche Gesetz auf Rohrnetze übertragen und die Maschenbedingung formulieren. Die Maschenbedingung besagt, dass die Summe der Druckhöhenverluste der Rohrleitungen einer Masche bei vorgegebener Richtung den Wert Null ergibt (Bhave, 1991; DVGW, 2006a). In Gleichung 3.18 besteht die Masche  $M$  aus der Anzahl  $n$  Stränge  $S$ . Im Strang  $S$  der Masche  $M$  tritt der Druckhöhenverlust  $h_{S,M}$  auf.

$$\sum_S^n h_{S,M} = 0 \quad (3.18)$$

### 3.7.3.5 Hydraulisches Gleichgewicht

Mit dem Widerstandsgesetz (s. Gl. 3.15), der Knotenbedingung (s. Gl. 3.16) und der Kompatibilitätsbedingung (s. Gl. 3.17) bzw. der Maschenbedingung (s. Gl. 3.18) kann der hydraulische Gleichgewichtszustand eines Rohrnetzes mathematisch formuliert werden (Deuerlein u. a., 2003; DVGW, 2006a):

$$h = R \cdot Q^e$$

$$\sum_S^n Q_{S,K} - Q_{E,K} = 0 \quad (3.19)$$

$$\sum_S^n h_{S,M} = 0$$

Die Indizes der Gleichung 3.19 sind in den verwiesenen Gleichungen bzw. Kapiteln erläutert.

### 3.7.3.6 Formulierung des hydraulischen Gleichgewichts in Matrizendarstellung

Für die programmiertechnische Umsetzung ist die Formulierung von Gleichung 3.19 in Matrizen und Vektoren zweckmäßig. Entsprechende Darstellungen finden sich bei Nielsen (1989) und Deuerlein (2002). Mit Bezug auf die in Kapitel 3.4 verwendeten Bezeichnungen können das Widerstandsgesetz, die Kontinuitätsgleichung (bzw. Knotenbedingung) und die Kompatibilitätsbedingung (bzw. Maschenbedingung) wie folgt formuliert werden:

$$\begin{aligned} \mathbf{h} &= f(\mathbf{q}) \\ \mathbf{A}^T \mathbf{q} &= \mathbf{Q} \\ \mathbf{h} + \mathbf{A}\mathbf{H} &= -\mathbf{A}_P \mathbf{H}_P \end{aligned} \quad (3.20)$$

Dabei fasst der Vektor  $\mathbf{h}$  die Druckhöhenverluste in den Strängen zusammen. Die Wasserentnahmen an den Verbrauchsknoten sind im Vektor  $\mathbf{Q}$ , die Durchflüsse in den Strängen im Vektor  $\mathbf{q}$  dargestellt. Die Inzidenzmatrix  $\mathbf{A}$  beschreibt die Verbrauchsknoten, der Vektor  $\mathbf{H}$  die unbekanntes Potentialhöhen an den Verbrauchsknoten. Analog bildet die Inzidenzmatrix  $\mathbf{A}_P$  die Knoten mit bekannten Potentialhöhen sowie der Vektor  $\mathbf{H}_P$  die bekannten Potentialhöhen der Potentialknoten ab.

## 3.7.4 Stationäre Rohrnetzrechnung

### 3.7.4.1 Berechnungsverfahren für vermaschte Rohrnetze

Ziel der stationären Rohrnetzrechnung ist die Ermittlung der Durchflüsse und Druckhöhenverluste in den Strängen sowie der Druckhöhen an den Knoten des Rechenmodells bei gegebenen konstanten Modellparametern (s. Kap 3.7.1). Das in Gleichung 3.19 formulierte stationäre hydraulische Gleichgewicht eines gegebenen vermaschten Rohrnetzes wird iterativ berechnet.

Dabei werden zunächst unter Einhaltung der Knotenbedingung aus Gleichung 3.16 eine Flussverteilung angenommen und die entsprechenden Druckhöhenverluste in den Strängen berechnet. Wird die Maschenbedingung aus Gleichung 3.18 nicht erfüllt, werden für die Maschen Korrekturflüsse berechnet, die zur bisherigen Flussverteilung addiert werden. Das Verfahren wird wiederholt bis eine gewünschte Genauigkeit erreicht ist. Alternativ können die Druckhöhen an den Knoten unter Einhaltung der Maschenbedingung angenommen und die Knotenbedingung an den Knoten überprüft werden. Statt der Korrekturflüsse werden Korrekturdruckhöhenverluste berechnet und zu den bisherigen Druckhöhenverlusten addiert.

Folglich sind grundsätzlich maschenbezogene (Korrektur der Flüsse in den Strängen) und knotenbezogene Verfahren (Korrektur der Druckhöhen an den Knoten) zur Berechnung des hydraulischen Gleichgewichts zu unterscheiden (Deuerlein u. a., 2003; Martin und Pohl, 2000). Mutschmann und Stimmelmayer (2007) sowie Bhawe (1991) bezeichnen das maschenbezogene Verfahren auch als Druckhöhenausgleichsmethode und das knotenbezogene Verfahren als Durchflussausgleichsmethode.

Wird jede Masche bzw. jeder Knoten separat betrachtet und das Ergebnis bei der Betrachtung der jeweils nächsten Masche bzw. des nächsten Knotens berücksichtigt, wird von einer sequenziellen Methode gesprochen. Werden die Maschen bzw. Knoten gemeinsam betrachtet, spricht man von einer simultanen Lösungsmethode (Martin und Pohl, 2000). Simultane Lösungsverfahren ermöglichen im Vergleich zu den sequenziellen Verfahren eine Konvergenz nach einer geringeren Anzahl von Iterationen.

Für die direkte Lösung des nichtlinearen Gleichungssystems 3.19, das das hydraulische Gleichgewicht beschreibt, existieren mehrere Ansätze. Ein maschenorientiertes, sequenzielles Berechnungsverfahren für Rohrnetze ohne Kontrollarmaturen gibt Cross (1936) an. Detaillierte Beschreibungen des für Handrechnungen geeigneten Verfahrens finden sich bei Bhave (1991) und Martin und Pohl (2000). Die praktische Anwendung des Verfahrens zeigen Lang und Detert (2007) und Karger u. a. (2005). Für die simultane Lösung der nichtlinearen Gleichungen findet die Newton-Raphson-Methode Anwendung. Dabei werden die nichtlinearen Gleichungen linearisiert und das Gesamtsystem umfassende Korrekturvektoren berechnet. Ausgehend von einem geschätzten Anfangszustand wird die Genauigkeit iterativ verbessert. Eine Beschreibung der Methode findet sich bei Bhave (1991). Die so genannte Gradientenmethode von Todini und Pilati (1987) zeichnet eine schnelle Konvergenz aus und wurde in der von der Environmental Protection Agency (EPA) entwickelten, weltweit verbreiteten Open-Source Software EPANET umgesetzt (Rossmann, 2000). Untersuchungen von Simpson (1999) und Deuerlein u. a. (2008) zeigen jedoch, dass der in den gängigsten Softwarelösungen implementierte Ansatz für bestimmte Anordnungen von Kontrollarmaturen in Rohrnetzen keine Lösung findet. Die Software EPANET ist näher in Kapitel 6.6 beschrieben.

Eine zur direkten Lösung der nichtlinearen Gleichungen alternative Vorgehensweise ist die Formulierung des hydraulischen Gleichgewichts als Optimierungsaufgabe. Den Beweis, dass für das nichtlineare Gleichungssystem eine eindeutige Lösung existiert, erbrachte Birkhoff (1963). Im so genannten Variationsprinzip für nichtlineare Netzwerke wird die Berechnung des hydraulischen Systemzustands von Rohrnetzen ohne Kontrollarmaturen als Optimierungsaufgabe formuliert. Das hydraulische Gleichgewicht ist äquivalent der Minimierung so genannter *Content*- und *Co-Content*-Funktionen, deren Differential das hydraulische Widerstandsgesetz aus Gleichung 3.15 darstellt. Die Minimierung der *Content*-Funktion ist der Kompatibilitäts- oder Maschenbedingung aus Gleichung 3.18 äquivalent. Analog dazu entspricht die Minimierung der *Co-Content*-Funktion der Knotenbedingung aus Gleichung 3.16. Beide Minimierungsaufgaben besitzen die gleiche, eindeutige Lösung (duale Minimierungsaufgaben), die iterativ berechnet wird. Collins u. a. (1978) lösen die Minimierungsaufgabe indem sie die nichtlinearen Funktionen mit linearen Funktionen annähern. Sie setzen für die eindeutige Lösung eine bestimmte Formulierung des Widerstandsgesetzes voraus (s. Kap. 3.7.3.2). Druckkontrollierende Armaturen wie PRVs und PSVs können deshalb nicht berücksichtigt werden (s. Kap. 3.4.5). Berghout und Kuczera (1997) schlagen eine Lösung vor, in der sie das Widerstandsgesetz für die Rohre linearisieren und damit eine Berechnung des Gleichgewichts

mittels Linearer Programmierung ermöglichen. Die Eindeutigkeit der Lösung ist jedoch nicht gegeben.

Deuerlein (2002) entwickelte einen Ansatz, der sowohl fluss- als auch druckkontrollierende Armaturen berücksichtigt und durch seine Eindeutigkeit eine sichere Konvergenz garantiert. Dieser Ansatz wurde in der Software KANET implementiert, die näher in Kapitel 6.4 beschrieben ist. Ausführliche Darstellungen der genannten und weiterer Ansätze zur stationären Rohrnetzrechnung finden sich bei Deuerlein (2002) und Bhave (1991).

### 3.7.4.2 Berechnungsverfahren für verästelte Rohrnetze

Verästelte Netze stellen einen Sonderfall der vermaschten Netze dar, bei denen die Berechnung auf Grund des dann linearen Gleichungssystems relativ einfach ist. Im verästelten Rohrnetz lässt sich die Flussverteilung unter Berücksichtigung der Massenerhaltung (Gl. 3.16) direkt angeben. Aus der Flussverteilung und dem Widerstandsgesetz (Gl. 3.15) können die Druckhöhenverluste in den Strängen ermittelt werden. Ausgehend von den bekannten Potentialhöhen an den Einspeiseknoten ergeben sich die Druckhöhen an den Knoten. Bezogen auf die in Kapitel 3.7.3.6 dargestellte Formulierung des hydraulischen Gleichgewichts mit Matrizen und Vektoren stellt sich der oben beschriebene Sachverhalt folgendermaßen dar (Deuerlein, 2002). Wird der Wurzelknoten des Baums eines Verästelungsnetzes als Referenzknoten definiert, ist die Inzidenzmatrix  $\mathbf{A}$  des Baums quadratisch und nichtsingulär und damit invertierbar ( $\mathbf{A}^{-1}$ ). D.h. die Kontinuitätsgleichung  $\mathbf{A}^T \mathbf{q} = \mathbf{Q}$  des hydraulischen Gleichgewichts (Gl. 3.20) lässt sich unter Verwendung der Inversen  $[\mathbf{A}^T]^{-1}$  nach  $\mathbf{q}$  auflösen. Damit können die Flüsse berechnet werden:

$$\mathbf{q} = [\mathbf{A}^T]^{-1} \mathbf{Q} \quad (3.21)$$

Die Druckhöhenverluste  $\mathbf{h}$  können mit dem Widerstandsgesetz  $\mathbf{h} = f(\mathbf{q})$  aus Gleichung 3.20 ermittelt werden. Die Kompatibilitätsbedingung  $\mathbf{h} + \mathbf{A}\mathbf{H} = -\mathbf{A}_P \mathbf{H}_P$  des hydraulischen Gleichgewichts (Gl. 3.20) lässt sich unter Verwendung der inversen Inzidenzmatrix  $\mathbf{A}^{-1}$  nach  $\mathbf{H}$  auflösen. Damit können die Potentialhöhen an den Knoten berechnet werden:

$$\mathbf{H} = -\mathbf{A}^{-1}(\mathbf{A}_P \mathbf{H}_P + \mathbf{h}) \quad (3.22)$$

### 3.7.5 Zeitabhängige Rohrnetzrechnung

Die Ermittlung des zeitabhängigen Verhaltens eines Verteilungsnetzes erfolgt in einer Aneinanderreihung stationärer Berechnungen (quasi-stationäre Berechnung). Der betrachtete Zeitraum wird in so genannte Zeitschritte gleicher Zeitdauer unterteilt. Die zeitabhängigen Parameter werden entsprechend diskretisiert. Z.B. werden Ganglinien der Verbrauchswerte, Schaltzeiten der Armaturen sowie Potentialhöhen an Einspeisepunkten über den Simulationszeitraum vorgegeben. Die vorgegebenen

Werte werden über die Dauer eines Zeitschritts als konstant angenommen. Ausgehend von bekannten Potentialhöhen an den Einspeiseknoten und Behälterknoten wird die stationäre Fluss- und Druckverteilung zu Beginn des ersten Zeitschritts wie in Kapitel 3.7.4 beschrieben berechnet. Über die resultierenden Zu- und Abflüsse können bei bekannter Behältergeometrie und Zeitschrittdauer die Behälterfüllstände und damit die Potentialhöhen an den Knoten zu Beginn des nächsten Zeitschritts berechnet werden. Der auf die Extrapolation der Zu- und Abflüsse über die Dauer eines Zeitschritts zurückzuführende Fehler kann auf Grund der zeitlich relativ geringen Änderung der Verbrauchswerte und der geringen Fließgeschwindigkeiten bei angepasster Wahl der Zeitschrittdauer vernachlässigt werden (Rossmann, 2000; Deuerlein, 2002). Der Fehler kann durch zusätzliche iterative Korrektur des Füllstands innerhalb eines Zeitschritts oder durch die dynamische Anpassung der Zeitschrittdauer- und Anzahl (Minimierung des Extrapolationsfehlers) verkleinert werden (Deuerlein, 2002; Bhave, 1991).

#### **3.7.6 Rohrnetzrechnungsprogramme**

Es existiert eine Vielzahl an kommerziellen und nicht-kommerziellen Softwareprogrammen für die Rohrnetzrechnung. Die gängigen Softwareprogramme ermöglichen fast durchweg die Simulation des stationären und zeitabhängigen hydraulischen Systemverhaltens. Das Wasserverteilungssystem wird ausschließlich als Knoten-Stränge-Modell mit zugeordneten Attributen modelliert. Für die Erstellung eines rechenfähigen Modells bieten die meisten Softwarelösungen graphische Benutzeroberflächen und Schnittstellen zu Programmen für die Datenvor- und nachverarbeitung. Für die Berechnung des hydraulischen Systemzustands finden verschiedene Ansätze Verwendung (s. Kap. 3.7.4). Verbreitet wird auch der frei verwendbare Lösungsalgorithmus des Programms EPANET eingesetzt. Unterschiede zwischen den Programmen sind hauptsächlich bei der Umsetzung der Modellierung, bei den Berechnungsalgorithmen sowie in den Funktionalitäten der Benutzeroberflächen und Schnittstellen auszumachen. Außerdem verfügen einige Programme über weiterführende Applikationen wie z.B. die kostenoptimale Neuauslegung eines zu planenden Systems, die Ermittlung effizienter Steuerstrategien oder die Ermittlung der Ausbreitung und Durchmischung verschiedener Wässer.

# 4 Für Entwicklungsländer charakteristische Mängel der Wasserverteilung

## 4.1 Zielsetzung und Überblick

Auch wenn sich die Wasserversorgung in den entwickelten Ländern vor allem durch die Überalterung der Systeme mit ersten Problemen konfrontiert sieht, kann dort ein Mindestversorgungsstandard fast ausnahmslos gewährleistet werden (Roscher, 2005; Clark u. a., 2002). Demgegenüber sind Mängel in der Wasserverteilung, die letztendlich die Bereitstellung von ausreichend Trinkwasser mit einwandfreier Qualität als grundlegende Aufgabe von Wasserversorgungssystemen beeinträchtigen, nach wie vor hauptsächlich ein Problem der Entwicklungsländer (WHO und UNICEF, 2000; WHO, 2003). Hierbei lassen sich für Entwicklungsländer charakteristische Mängel ausmachen, die je nach Entwicklungsstand und Ausprägung der jeweiligen Wasserverteilung mehr oder weniger ursächlich für die mangelhafte Versorgung sind. Dies kann im Extremfall bedeuten, dass ein charakteristischer Mangel in einem bestimmten System die Hauptursache für eine nicht funktionierende Wasserverteilung ist, während er in einem anderen System keine entscheidende Rolle spielt.

Die Verbesserung einer ungenügenden Wasserverteilung durch die Beseitigung ihrer Mängel setzt ein Verständnis der Mängel sowie deren Ursachen und Auswirkungen voraus. Da Mängel wiederum Mängel bedingen, hängt die Definition was als Mangel und was als Ursache oder Auswirkung eines Mangels bezeichnet wird von der Betrachtungsebene ab. Außerdem bestehen zwischen Mängeln Abhängigkeiten und Interaktionen, die eine losgelöste Betrachtung einzelner Mängel erschweren oder unmöglich machen. Eine allgemeine Beschreibung und Klassifizierung dieser typischen Mängel ist also schwierig und erfordert eine mehrdimensionale Betrachtungsweise.

Ziel dieses Kapitels ist die Beschreibung der für diese Arbeit relevanten Mängel sowie deren Ursachen und Auswirkungen. Dadurch wird das notwendige Verständnis für die in den Kapiteln 5, 6 und 7 gegebenen Lösungsansätze geschaffen. Dazu wird zunächst als Fallbeispiel die Wasserverteilung in der algerischen Stadt Béni Abbès vorgestellt (s. Kap. 4.2). Die wichtigsten Mängel in der Wasserverteilung von Béni Abbès werden im nächsten Kapitel beschrieben, ohne dass deren Abhängigkeiten und Ursachen systematisch dargelegt werden (s. Kap. 4.3). Der Notwendigkeit einer systematischen Betrachtung von Mängeln als Basis für nachhaltige Lösungsansätze wird mit der Entwicklung eines allgemeinen Ansatzes zur Beschreibung der

Wirkungsketten von Mängeln Rechnung getragen (s. Kap. 4.4). Die Wirkungsketten der für diese Arbeit relevanten Mängel werden im darauf folgenden Kapitel 4.5 unter Anwendung des entwickelten Ansatzes analysiert und beschrieben. Die Analyse stützt sich dabei zum einen auf die im Fallbeispiel Béni Abbès durchgeführte Mängelanalyse und zum anderen auf die Fachliteratur.

## 4.2 Die Wasserverteilung des Fallbeispiels Béni Abbès

### 4.2.1 Geographische Einordnung

Die Stadt Béni Abbès liegt im Wilaya<sup>1</sup> Béchar der Demokratischen Volksrepublik Algerien (s. Abb. 4.1). Während entlang der Mittelmeerküste im Norden des Landes ein mediterranes Klima vorherrscht, sind die Gebiete südlich des Atlasgebirges, das sich parallel zur Küste erstreckt, von einem ariden Klima bestimmt. Über 90 % der ca. 2,38 Millionen km<sup>2</sup> Fläche Algeriens sind den Wüstengebieten der Sahara zuzuordnen.

Im Nordwesten der Sahara Algeriens erstreckt sich auf ca. 80.000 km<sup>2</sup> Fläche der Große Westliche Erg<sup>2</sup>. Entlang der südwestlichen Grenze des Erg verläuft das Tal des Wadi Saoura (s. Fußnote 2, S. 4). Das Wadi Saoura wird durch den Zusammenfluss des Wadi Guir und des Wadi Zousfana bei der Ortschaft Igli gebildet und verläuft sich nach ca. 220 km in der Senke Sebkhah Mellahi. An mehreren Stellen des bis zu 50 m tiefen Betts des Wadi Saoura tritt Grundwasser, das unter dem Erg gespeichert ist, in Quellen zu Tage (AHT, 2009b). Diese Quellen bilden die Lebensgrundlage der Oasen und Oasenstädte des Saouratals.

Béni Abbès, eine der Oasenstädte, liegt ca. 40 km südlich von Igli. An dieser Stelle schließt nordöstlich an das Tal des Wadi ein Plateau an, das ähnlich einer Bucht von den Dünen des Großen Westlichen Ergs umfasst wird. Im Tal des Wadi befinden sich ein größerer Palmenhain, ein Ksar<sup>3</sup> und ältere Viertel der Stadt. Der größere und jüngere Teil der Stadt liegt auf dem Plateau. Die Stadt verfügt über ein Krankenhaus, mehrere Schulen, Moscheen und administrative Einrichtungen im Stadtgebiet. Auf der orographisch rechten Seite des Saoura, also westlich der Stadt, befindet sich ein Elektrizitätswerk, das die Stadt mit Energie versorgt. Nennenswerte Industrie gibt es nicht. Abbildung 4.2 zeigt ein von Westen nach Osten aufgenommenes Panoramabild von Béni Abbès mit den neuen Stadtteilen auf dem Plateau (im Bild links) sowie den alten Stadtteilen und dem Palmenhain im Tal des Wadi Saoura (im Bild rechts).

---

<sup>1</sup>Das Wort Wilaya bezeichnet in Algerien einen mit dem französischen Département vergleichbaren Verwaltungsbezirk.

<sup>2</sup>Das arabische Wort Erg bezeichnet ein Sanddünenmeer.

<sup>3</sup>Das Wort Ksar bezeichnet traditionelle, befestigte Berbersiedlungen.

#### 4.2 Die Wasserverteilung des Fallbeispiels Béni Abbès



Abbildung 4.1: Übersichtskarte von Algerien (www.lexilogos.com; nachbearbeitet)



Abbildung 4.2: Panorama von Béni Abbès (A. Stache)

## 4.2.2 Demographie

Entsprechend der Angaben der kommunalen Administration Assemblée Populaire Communale (APC) hatte die Stadt Béni Abbès im Jahr 2004 12.562 Einwohner (Klingel u. a., 2008). Nach Angaben der United Nations (2008a) wächst die Bevölkerung Algeriens mit abnehmender Wachstumsrate weiter. Das prognostizierte Bevölkerungswachstum in Béni Abbès unter Verwendung dieser Angaben ist in Tabelle 4.1 für einige ausgewählte Jahreszahlen angegeben.

Tabelle 4.1: Prognose des Bevölkerungswachstums in Béni Abbès

<b>Jahr</b>	<b>Wachstumsrate</b>	<b>Bevölkerung</b>
[–]	[%]	[E]
2004	1,48	12.562
2005	1,51	12.748
2010	1,45	13.740
2015	1,29	14.765
2020	1,08	15.743
2025		16.611

## 4.2.3 Wasserdargebot und Wasserqualität

Béni Abbès verfügt über eine Quelle mit einer Schüttung von ca. 25,70 l/s. Davon stehen der Trinkwasserversorgung ca. 13,50 l/s zur Verfügung. Das übrige Quellwasser wird für die Bewässerung des Palmenhains genutzt. Des Weiteren wird Grundwasser aus einem im Wadi gelegenen Brunnen (*Br1*, ca. 5,50 l/s) sowie einem, zeitweise zwei auf dem Plateau gelegenen Brunnen (*Br2* und *Br3*, insgesamt ca. 5,00 - 10,00 l/s) für die Trinkwasserversorgung entnommen. Die zahlreichen, meist im Palmenhain gelegenen Foggaras<sup>4</sup> und kleinen privaten Brunnen spielen für die Trinkwasserversorgung keine entscheidende Rolle. Insgesamt stehen der Trinkwasserversorgung damit ca. 24,00 - 29,00 l/s Wasser zur Verfügung (s. Tab. 4.2 und Abb. 4.3). Wird das Dargebot auf die Einwohner bezogen, entspricht dies beispielsweise für das Jahr 2010 ca. 150 - 182 l/E/d.

Das Quellwasser genügt nach einer Untersuchung aus dem Jahr 2005 den algerischen Qualitätsanforderungen an Trinkwasser (AHT und OtterWasser, 2005). Nach der gleichen Studie weist zumindest der im Wadi gelegene Brunnen durch einen zu hohen Salzgehalt keine Trinkwasserqualität auf. Diesem Umstand wird Rechnung getragen, indem das Brunnenwasser mit Quellwasser gemischt wird (AHT, 2009b). Über die Wasserqualität der auf dem Plateau gelegenen Brunnen liegen keine Untersuchungen vor.

<sup>4</sup>Das im Maghreb gebräuchliche Wort Foggara bezeichnet einen unterirdischen, horizontalen Stollen, der Wasser sammelt und zu seinem Ausgang transportiert.

Tabelle 4.2: Nutzbares Wasserdargebot in Béni Abbès

Ressource [–]	Dargebot [l/s]	Wasserqualität [–]
Quelle	13,50	Trinkwasser
Brunnen <i>Br1</i>	5,50	kein Trinkwasser
Brunnen <i>Br2</i> , <i>Br3</i>	5,00 - 10,00	unbekannt
Gesamt	24,00 - 29,00	

#### 4.2.4 Wasserverteilungssystem

Abbildung 4.3 zeigt eine Übersicht des Wasserverteilungssystems in Béni Abbès mit den im Folgenden referenzierten Bezeichnungen der Systemelemente. Das Wasser der Quelle wird über eine Freispiegleitung zu einem Zwischenbehälter (*TB1*) mit einer nachgeordneten Förderanlage geführt. In diesen Zwischenbehälter fördert auch die Tauchpumpe des Brunnen *Br1*. Vom Zwischenbehälter wird mit einer der dort installierten Pumpen über eine Zubringerleitung Wasser über ca. 35 m Höhe in die zwei Hochbehälter *HB1* und *HB2* gefördert. Über eine zweite Zubringerleitung werden der Wasserturm im Stadtzentrum (*WT1*) sowie der im Norden der Stadt gelegene Tiefbehälter *TB2* beschickt. Dabei werden ca. 55 m Höhe zum Wasserturm und ca. 40 m Höhe zum Tiefbehälter mit der zweiten, bei *TB1* angeordneten Pumpe überwunden. Das Wasser aus Brunnen *Br2* wird ebenfalls in den Tiefbehälter *TB2* gefördert. Vom Zwischenbehälter *TB2* wird mit zwei parallel angeordneten Pumpen Wasser in die Wassertürme *WT2* und *WT3* gepumpt. Zur Zeit wird das Wasser des Brunnens *Br3* in den Wasserturm *WT3* gefördert. Mittelfristig ist eine Förderung in den Tiefbehälter *TB2* geplant. Die Hochbehälter *HB1* und *HB2* sowie die Wassertürme *WT1*, *WT2* und *WT3* speisen über Gravitation in das hydraulisch kommunizierende Verteilungsnetz ein.

Ein kleinerer Wasserturm im Stadtzentrum, der ausschließlich eine Moschee versorgt, wird über das Verteilungsnetz befüllt. Das Krankenhaus im Osten der Stadt verfügt über einen eigenen Behälter (*TB4*), der über eine von den Hochbehältern *HB1* und *HB2* kommenden Leitung beschickt wird. Für die notwendige Druckerhöhung ist auf etwa halber Distanz eine Pumpe angeordnet, für deren Betrieb das Krankenhaus zuständig ist. Das auf der anderen Seite des Wadi gelegene Kraftwerk bezieht Wasser aus dem Verteilungsnetz. Das Wasser wird über eine Pumpstation mit Zwischenbehälter (*TB3*) in einen Wasserturm (*WT4*) beim Kraftwerk gepumpt. In Abbildung 4.3 ist lediglich ein Teil der Zuleitung zu *TB3* bzw. *WT4* dargestellt.

Eine Erhebung in 435 Haushalten, das entspricht ca. 3.200 Einwohnern, ergab, dass ca. 95 % der Haushalte in Béni Abbès über das öffentliche Netz versorgt werden (AHT, 2005). Die Anzahl der angeschlossenen Haushalte wird auf ca. 2.450 beziffert (Klingel u. a., 2008). Ca. 80 % dieser Haushalte verfügen über kleine ca. 1 - 2 m<sup>2</sup> große, meist auf dem Hausdach angeordnete Hausbehälter, in denen Wasser für die Zeiten ohne Versorgung vorgehalten wird (s. Kap. 4.2.6). Ca. 41 % der Haus-

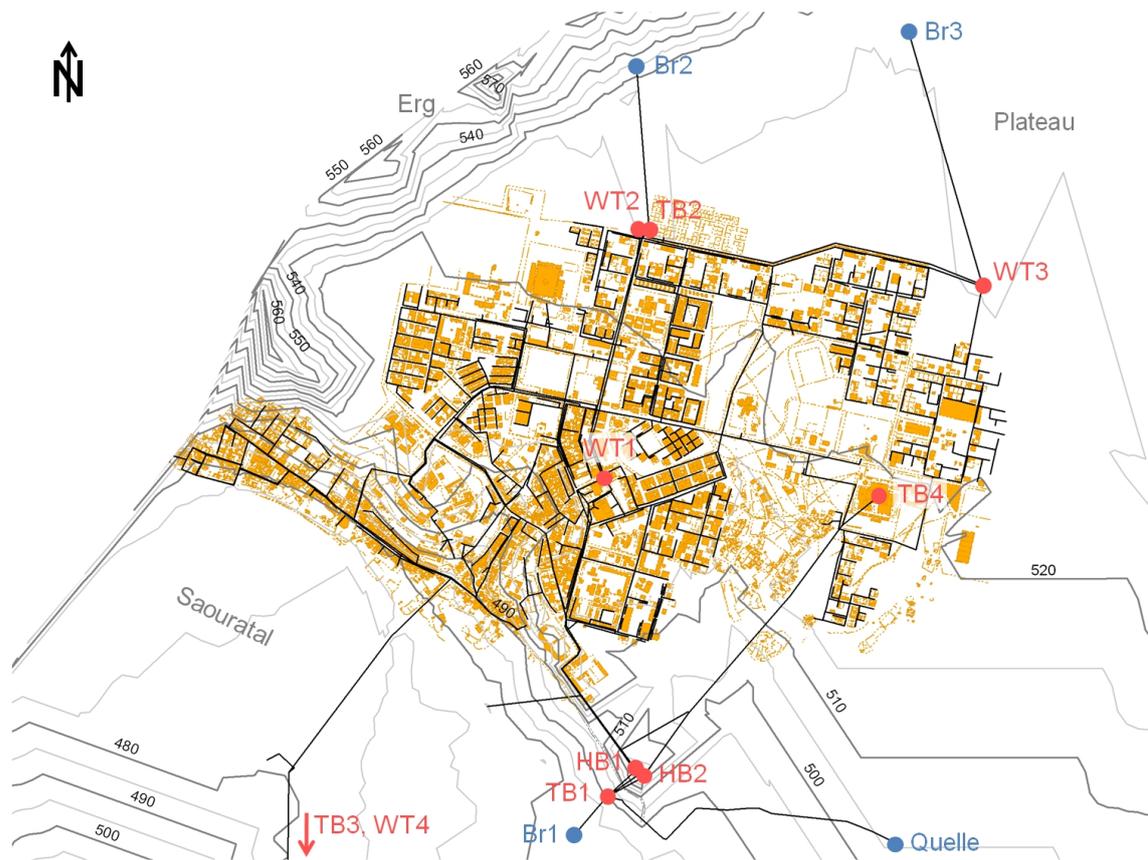


Abbildung 4.3: Übersichtsplan des Wasserverteilungssystems von Béni Abbès

halte verfügen über private Pumpen. Ein Teil dieser Pumpen (ca. 63 %) ist zwischen Verteilungsnetz und Hausbehälter angeordnet, um den notwendigen Druck für deren Befüllung zu erzeugen, wenn der Versorgungsdruck im Verteilungsnetz dafür nicht ausreicht. Zum Teil sind die Hausbehälter auch ebenerdig angeordnet und nachgeschaltete Pumpen (ca. 27 %) erzeugen den notwendigen Druck für die häusliche Versorgung. Abbildung 4.4 zeigt einen Hausbehälter auf einem Hausdach sowie einen ebenerdig angeordneten Hausbehälter, in Kombination mit einer Pumpe. Tabelle 4.3 fasst die genannten Werte zusammen.

Das gesamte Leitungsnetz mit einer Länge von ca. 62 km weist eine Vielzahl unterschiedlicher Durchmesser (DN20 bis DN300) und Materialien (AZ, St, GGG, PVC) auf. Tabelle 4.4 zeigt für jedes Material die Gesamtlängen sowie den minimalen und maximalen Durchmesser der Leitungen. Beim Bau des Netzes während der französischen Kolonialzeit<sup>5</sup> wurden vermutlich hauptsächlich Leitungen aus St und AZ verwendet. Dieses ursprüngliche Netz wurde bis heute immer wieder erweitert. Dabei fanden u.a. Leitungen aus GGG, PVC und neuerdings PE Verwendung.

<sup>5</sup>Die staatliche Unabhängigkeit Algeriens wurde 1962 von Frankreich anerkannt (Schmidt, 2005).



Abbildung 4.4: Auf dem Dach (*links*) und ebenerdig (*rechts*) angeordnete Hausbehälter (J. Deuerlein)

Tabelle 4.3: Über das öffentliche Netz versorgte häusliche Abnehmer

Über das öffentliche Netz versorgte Haushalte	ca. 2.450
Über das öffentliche Netz versorgte Haushalte	ca. 95 %
Angeschlossene Haushalte mit Hausbehälter	ca. 80 %
Angeschlossene Haushalte mit privater Pumpe	ca. 41 %
Zw. Netz und Hausbehälter angeordnete private Pumpen	ca. 63 %
Nach dem Hausbehälter angeordnete private Pumpen	ca. 37 %

Tabelle 4.4: Materialien, Durchmesser und Längen der Leitungen des Wasserverteilungssystems

Material	Durchmesser	Länge
[–]	[DN]	[km]
AZ	DN20 - DN300	9,25
St	DN20 - DN200	45,33
GGG	DN125	0,53
PVC	DN30 - DN160	7,22
Gesamt	DN20 - DN300	62,33

### 4.2.5 Zuständigkeiten

Die Wasserversorgung in Algerien war bisher staatlich organisiert. Erst seit 2005 sieht das neue Wassergesetz<sup>6</sup> die Möglichkeit einer Einbindung der Privatwirtschaft über Konzessionsverträge oder Betreibermodelle vor (BFAI, 2007). Dies führte z.B. zur Vergabe des Betriebs der Wasserverteilungsnetze der vier größten Städte des Landes Algier, Oran, Annaba und Constantine für eine befristete Zeit an ausländische Konsortien. Die oberste Behörde der Wasserwirtschaft ist das Wasserressourcenministerium MRE. Mehre Abteilungen (Divisions) stellen die operativen Organe dar, z.B. die für die Trinkwasserversorgung zuständige Direction de l'Alimentation en Eau Potable (D.A.E.P.) und die für die Entwicklung der Infrastruktur zuständige Direction des Etudes et des Aménagements Hydrauliques (D.E.A.H.).

Auf der Ebene der Wilayas stellt die Direction de l'Hydraulique des Wilayas (DHW) die Verwaltungsbehörde dar, der wiederum lokale Subdivisionen unterstehen. Béni Abbès liegt im Zuständigkeitsbereich der Direction de l'Hydraulique de Béchar und stellt eine eigene Subdivision.

Außerdem untersteht dem Ministerium die 2001 gegründete staatliche, aber finanziell und wirtschaftlich autonome Organisation Algérienne Des Eaux (ADE). Aufgabe der ADE ist die landesweite Umsetzung der nationalen Wasserpolitik und damit das Management und der Betrieb der Produktion, Aufbereitung, Speicherung und Verteilung des Wassers, die Instandhaltung und der Neubau der entsprechenden Infrastruktur sowie die Überwachung der Trinkwasserqualität. Außerdem liegen die Planung und Umsetzung von Investitionsprogrammen in der Trinkwasserversorgung im Zuständigkeitsbereich der ADE.

Die ADE ist allerdings in Béni Abbès noch nicht vertreten, so dass die vom Bürgermeister geführte APC als Betreiber des Wasserverteilungsnetzes auftritt. Die APC ist somit zuständig für den technischen Betrieb, die Verwaltung der Abnehmer, die Abrechnung und die Instandhaltung. Die Subdivision der DHW berät die APC in der Umsetzung ihrer Aufgaben im Hinblick auf die Einhaltung der Wasserrichtlinien. De facto wird der Austausch, die Erweiterung und der Neubau der Infrastruktur von der DHW geplant und die jeweilige Umsetzung initiiert. Außerdem nimmt die DHW entscheidend Einfluss auf den technischen Betrieb.

### 4.2.6 Technischer Betrieb und Systemplanung

**Steuerung:** Die Pumpen an den Zwischenbehältern *TB1* und *TB2* zur Befüllung der Hochbehälter *HB1* und *HB2* sowie der Wassertürme *WT1*, *WT2* und *WT3* werden von Personal der APC, das an den Pumpstationen stationiert ist, meist nach einem vorgegebenen Zeitplan an- bzw. ausgeschaltet. Bei der Pumpensteuerung wird aber auch improvisiert und von den vorgegebenen Schaltplänen abgewichen. Muss zur Befüllung eines Behälters eine Schieberstellung im Zubringersystem geändert

---

<sup>6</sup>Das 2005 erlassene Gesetz *Loi n° 05-12 du 28 Jomada Ethania 1426 correspondant au 4 août 2005 relative à l'eau* regelt die Nutzung und Bewirtschaftung der Wasserressourcen (Bouteflika, 2005).

werden, wird dies meist von dem an den Behältern stationierten Personal der APC getätigt. Eine Rückmeldung der Behälterfüllstände im Sinne einer Regelung der Behälterbefüllung, und damit eine Sicherung gegen Über- bzw. Leerlaufen existiert nicht. Der Füllstand kann zumindest in den Behältern *WT1*, *WT2* und *WT3* über einfache mechanische Messvorrichtungen vom zuständigen Behälterpersonal abgelesen und telefonisch an die Pumpstation durchgegeben werden.

Das an den Behältern stationierte Personal ist zudem für die Beschickung des Verteilungsnetzes zuständig. Die Rohrnetzeinspeisung aus den Hochbehältern und Wassertürmen in das Verteilungsnetz wird zeitlich und in der Menge limitiert. Dafür werden nach vorgegebenen Zeitplänen Schieber an den Behälterausgängen geöffnet bzw. geschlossen. Des Weiteren wird versucht, über das Stellen von in Behälternahe angeordneten Schiebern verschiedene Netzbereiche zu bestimmten Zeiten zu versorgen. Allerdings wird auch die Beschickung des Verteilungsnetzes z.T. intuitiv gesteuert. Laut Betreiber wird die Rohrnetzeinspeisung hauptsächlich auf Grund der begrenzten Ressourcen und der hohen Anzahl von Leckagen begrenzt.

Fest installierte Durchfluss- und Druckmessungen sind im Verteilungssystem nicht implementiert. D.h. eine Kontrolle und ein Nachvollziehen der Wasserverteilung über regelmäßige Messungen und deren Auswertungen erfolgt nicht. Obwohl zahlreiche Hauswasserzähler installiert sind, werden diese so gut wie nie abgelesen und weder für die Ermittlung der Wasserverteilung mit z.B. einer Wasserbilanz noch für die Verbrauchsabrechnung genutzt. Im Jahr 2008 wurden beispielsweise alle 1.714 häuslichen Abonnenten über Pauschalen abgerechnet (AHT, 2009a).

**Aufbereitung:** Die Aufbereitung des Rohwassers beschränkt sich auf rudimentäre Einrichtungen zur Chlorung in den Zwischenbehältern *TB1* und *TB2*. Es ist allerdings keine kontrollierte Zugabe von Chlor als Arbeitsprozess implementiert. Auch wird die Trinkwasserqualität seitens der Betreiber nicht analysiert.

**Instandhaltung:** Die Zuständigkeiten für die Instandhaltung sind in Béni Abbès nicht klar gegeben. Sowohl die APC als auch die Subdivision der DHW führen im weiteren Sinne Instandhaltungsmaßnahmen durch. Dabei beschränken sich die Maßnahmen weitestgehend auf die Instandsetzung und hier insbesondere auf die nicht geplante Reparatur. Die APC unterhält einen Bauhof, der kleinere Reparaturen am Netz durchführt. Größere Maßnahmen werden normalerweise von der DHW vorgegeben und initiiert.

**Planung:** Planungsaufgaben von Infrastrukturmaßnahmen, wie z.B. der Neubau eines Behälters, die Installation einer Pumpe oder die Neuverlegung von Leitungen, liegen im Aufgabenbereich der DHW. Meist werden solche Maßnahmen von der DHW entworfen und deren Detailplanung und Umsetzung vergeben. Allerdings werden auch Maßnahmen, vor allem die Verlegung von Leitungen, ohne detaillierte Planung und die notwendige Einbettung in ein Systemkonzept von der DHW beschlossen und umgesetzt oder deren Umsetzung veranlasst.

## 4.3 Mängel in der Wasserverteilung des Fallbeispiels Béni Abbès

### 4.3.1 Überblick

Die Wasserversorgung in Béni Abbès ist geprägt durch zahlreiche Mängel. Die für Béni Abbès spezifischen Mängel im technischen Bereich werden im Folgenden beschrieben. Die Darstellung basiert im wesentlichen auf den im Rahmen des Kooperationsprojekts gewonnenen und in mehreren Projektberichten (Klingel u. a., 2005a; IWG, 2009; AHT, 2008) und Artikeln (Klingel und Guth, 2009; Klingel und Deulerlein, 2008, 2007; Klingel u. a., 2007a; Klingel, 2006) festgehaltenen Erkenntnissen. In den folgenden Kapiteln 4.4 und 4.5 werden die bedeutendsten Mängel verallgemeinernd charakterisiert und ihre Ursachen und Wirkungen analysiert.

### 4.3.2 Wasserressourcen

Die wichtigste Wasserressource in Béni Abbès ist die Quelle (s. Kap. 4.2.3). Das Quellwasser tritt in einer kleinen Höhle, deren Eingang verschüttet ist, zu Tage. Das Wasser wird durch eine Rohrleitung abgeführt, die vor der Verschüttung verlegt wurde. Durch die Verschüttung ist die Quelle heute nicht mehr zugänglich. Die Quelle ist weder durch eine Quellfassung noch durch ein Wasserschutzgebiet gesichert. Der Bereich um die Quelle ist frei zugänglich, so dass die Gefahr der Verunreinigung durch z.B. weidendes Vieh oder der Beschädigung der Quelle durch weitere, evtl. durch Fremdeinwirkung ausgelöste, Verschüttungen besteht.

Die für die Wasserversorgung genutzten Brunnen wurden ohne vorherige Erkundung gebohrt. Die Vorgehensweise beim Bohren der Brunnen führte zu mehreren, nicht nutzbaren Bohrlöchern auf dem Plateau. Kenntnisse über die Ergiebigkeit der Brunnen, die über Pumpversuche ermittelt werden kann, liegen nicht vor. Die Ausbeutung der Brunnen mit überdimensionierten Tauchpumpen führt immer wieder zur Absenkung des Wasserspiegels und damit zur Schädigung der Pumpen durch den damit verbundenen Luft- und Sandeintrag. Außerdem birgt die ungeplante Ausbeutung der Brunnen die Gefahr einer Überbeanspruchung des Grundwasserleiters. Die in Tabelle 4.2 angegebenen Ergiebigkeiten sind Schätzwerte einer möglichen konstanten Entnahme. Die ungeplante Vorgehensweise bei der Erschließung neuer Wasserressourcen wird von den zuständigen Behörden als nicht problematisch angesehen. Es wird von der Möglichkeit einer beliebigen Steigerung des Wasserangebots durch das Anlegen neuer Brunnen ausgegangen, was jedoch nicht belegt ist. Entsprechende Analysen stehen aus.

Regelmäßige Messungen der Ergiebigkeit sowie der Wasserqualität von Quelle und Brunnen existieren ebenfalls nicht. Deren Notwendigkeit der Messungen im Rahmen einer nachhaltigen Wasserversorgung wird von den zuständigen Behörden nur beschränkt erkannt. Eine Aufbereitung des Wassers, abgesehen von sporadischen Chlorzugaben, findet dementsprechend nicht statt. Die aus einer einmaligen Untersuchung bekannte Versalzung des Wassers aus Brunnen *Br1* wird auf Grund

der Mischung der Wässer im Behälter *TB1* nicht als problematisch angesehen (s. Kap. 4.2.3). Da keine Durchflussmessungen vorgenommen werden, ist die Einspeisemenge in das Verteilungsnetz unbekannt. Deren Kenntnis ist jedoch unerlässliche Voraussetzung für einen planmäßigen und nachhaltigen Netzbetrieb, insbesondere für die Befüllung der Behälter, die Kontrolle der Wasserverteilung sowie die Kontrolle und Reduktion der Wasserverluste.

#### 4.3.3 Systemkonzept

Die Netztopologie sowie die Anordnung der Behälter und Pumpstationen lassen ein ursprüngliches Konzept mit Druckzonen und übergeordnetem Zubringersystem erkennen. Allerdings existieren heute in Folge ungeplanter Netzerweiterungen keine hydraulisch getrennten Druckzonen mehr. Auch ist das Zubringersystem nicht konsequent vom Verteilungsnetz getrennt. Des Weiteren sind zahlreiche Hausanschlüsse, u.a. mit privaten Pumpen, an die Zubringerleitungen angeschlossen.

Das Versorgungsnetz ist stark vermascht und durch unzählige parallel verlaufende Leitungen mit Querverbindungen gekennzeichnet. Teilweise liegen bis zu vier Leitungen parallel in einer Straße. Die Anordnung und Nutzung der Behälter innerhalb des hydraulisch kommunizierenden Verteilungsnetzes folgen keiner erkennbaren Logik. Demzufolge ist kein übergeordnetes Systemkonzept auszumachen, das die wesentliche Funktionsweise unter Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen vorgibt.

#### 4.3.4 Technischer Betrieb

##### 4.3.4.1 Steuerung

Die in Kapitel 4.2.6 beschriebene Behälterbefüllung führt immer wieder zu einem Überlaufen der Speicherbehälter und dadurch zu größeren Wasserverlusten. Analog führt die Betriebsweise des Zubringersystems zeitweise zu einer ungenügenden Befüllung der Behälter und damit zu Versorgungsunterbrechungen. Aus den Hochbehältern und Wassertürmen wird, mit der Intention verschiedene Netzbereiche zu unterschiedlichen Zeiten zu versorgen, Wasser über Gravitation intermittierend in das Verteilungsnetz eingespeist. Eine klare Abgrenzung der Netzbereiche und damit eine geplante Versorgung ist jedoch auf Grund des hydraulisch kommunizierenden Verteilungsnetzes sowie des mangelhaften Kenntnisstandes über die Netzstruktur nicht möglich.

Die Folge ist neben der o.g. intermittierenden Beschickung eine intuitive und im Wesentlichen nicht kontrollierte Betriebsweise. Letztendlich ist eine gleichmäßige und damit gerechte Verteilung des verfügbaren Wassers dadurch nicht möglich. Dies wird durch eine Erhebung der Versorgungszeiten bestätigt (s. Kap. 4.3.8). Einige Bereiche, in denen durch die Betriebsweise nie oder nicht genügend Wasser bereit gestellt wird, müssen mit Tankwagen versorgt werden.

Bei der Befüllung des Leitungsnetzes treten durch Druckstöße sehr große Druckspitzen auf. Im Gegensatz dazu führt der Einsatz von Pumpen der Verbraucher zur

Befüllung ihrer Hausbehälter zeitweise zu lokalen Unterdrücken im Leitungsnetz und, nach Ende der Einspeisung, zu dessen Entleerung. Die Druckspitzen sowie die großen Druckschwankungen bedingen Rohrbrüche und Ermüdungsschäden am Leitungsnetz. Die Leckagen und Wasserverluste sind dementsprechend hoch. In einer Studie wurden die realen Wasserverluste unter kontinuierlichen Versorgungsbedingungen in einem Netzbereich auf ca. 40 % geschätzt (s. Kap. 5.4.3). Zudem besteht die Gefahr, dass durch die Leckagen bei niedrigem Druck oder Unterdruck Partikel in das Leitungsnetz eingetragen werden. Besonders gravierend wirkt sich hierbei das marode, oft parallel verlaufende Abwassernetz aus.

Durch die Betriebsweise und Systemstruktur ist eine Kontrolle der Mengenverteilung, beispielsweise über Durchflussmessungen, nur sehr beschränkt möglich. Darüber Hinaus sind herkömmliche Durchflussmessgeräte auf Grund der zumindest möglichen Zweiphasenstömung (Lufteinschlüsse) nicht einsetzbar.

Zudem sind Stagnationszonen im Verteilungsnetz und die damit verbundene mögliche Verkeimung des Wassers nicht zu vermeiden. Die oft oberflächennahe oder überirdische Verlegung der Leitungen in Verbindung mit den zeitweise sehr hohen Temperaturen (im Sommer bis zu 50°C) verstärkt die Problematik (s. Abb. 4.7). Analog zum Verteilungsnetz besteht die Gefahr einer Verkeimung des Wassers in der häuslichen Zwischenspeicherung. In den aus Blech gefertigten und meist auf den Dächern vor der Sonne ungeschützt angeordneten Hausbehältern wird Wasser mitunter für mehrere Tage gespeichert (s. Kap. 4.3.8).

Die negativen Auswirkungen der Wasserverteilung auf die Wasserqualität bestätigen die bekannten Analysen. Laut einer Studie weist zumindest das Quellwasser Trinkwasserqualität auf (s. Kap. 4.2.3). Vom örtlichen Krankenhaus durchgeführte Analysen des in den Behältern gespeicherten Wassers belegen jedoch dessen ungenügende Qualität. Demzufolge führt allein der Transport durch die Zubringerleitungen zu einer verminderten Qualität.

#### 4.3.4.2 Instandhaltung

Wie bereits in Kapitel 4.2.6 erwähnt, beschränkt sich die Instandhaltung des Leitungsnetzes in Béni Abbès weitestgehend auf die nicht planbare Reparatur. Die durchgeführten Reparaturarbeiten sind meist von minderer Qualität. So treten viele Leckagen an vormals unsachgemäß, z.B. durch Umwicklung mit einem Gummiband, reparierten Leitungen erneut auf (s. Abb. 4.5). Zum einen ist dies auf nicht verfügbares Material und Werkzeug, zum anderen auf den Mangel an gut ausgebildeten Fachkräften zurückzuführen.

Auch werden bei weitem nicht alle bekannten Schäden behoben. So werden z.B. durch Wasseraustritt offensichtliche Leckagen über Wochen nicht repariert. Ein Arbeitsprozess von der Schadensmeldung bis zur Schadensreparatur und -dokumentation existiert nicht. Die Situation bzgl. weiterer Elemente der Trinkwasserverteilung wie Pumpen und Behälter stellt sich ähnlich dar. Eine Instandhaltung findet bis auf die notwendigsten und meist provisorisch durchgeführten Reparaturarbeiten nicht statt.



Abbildung 4.5: Leckagen und deren unsachgemäße Reparatur

#### 4.3.4.3 Datenhaltung

Die verfügbare Datengrundlage zum Leitungsnetz beschränkt sich im Wesentlichen auf Netzpläne, die von einem lokalen Planungsbüro erstellt wurden, einen handgezeichneten Übersichtsplan sowie die Systemkenntnisse der lokalen Fachkräfte der APC und insbesondere der DHW. Allerdings haben Untersuchungen, bei denen die verfügbare Datengrundlage sowie die Kenntnisse der Fachkräfte mit der Realität verglichen wurden, gezeigt, dass das vorhandene Wissen in hohem Maße ungenau oder falsch ist.

Dazu wurden Punkte des Leitungsnetzes untersucht, die Veränderungen im Verlauf eines Leitungsstranges darstellen (z.B. Leitungskreuzungen, Material- und Durchmesserwechsel, Schieber etc.). Die Punktinformationen ergeben zusammengekommen ein schlüssiges Informationsbild des Leitungsnetzes. Der untersuchte Netzbereich umfasst ca. 18 % des gesamten Leitungsnetzes. Der Netzbereich sowie die Untersuchungsergebnisse sind in Abbildung 4.6 dargestellt.

Von den 154 überprüften und verzeichneten Punkten existieren 48 (ca. 31 %) in der Realität nicht. Dagegen wurden 70 vorher nicht bekannte Leitungsabschnitte entdeckt. Bei 106 existierenden und bekannten Punkten entsprechen 70 nicht bekannte Punkte ca. 40 % der existierenden Punkte. D.h. der tatsächliche Leitungsverlauf weicht erheblich von dem in den Planunterlagen verzeichneten Verlauf ab. Zum Teil ist dies auf nicht dokumentierte Netzerweiterungen oder Durchmesserwechsel zurückzuführen. Von den 106 in den Planunterlagen verzeichneten und real existierenden Untersuchungspunkten werden 75 (ca. 70 %) mit falschen Angaben (z.B. Durchmesser oder Material) geführt.

Wird die Gesamtzahl der verzeichneten und nicht verzeichneten 224 Punkte (100 %) betrachtet, sind ca. 34 % der Punkte lagemäßig richtig erfasst, aber mit falschen Angaben verzeichnet. Ca. 31 % der tatsächlich existierenden Punkte sind nicht verzeichnet und ca. 21 % der verzeichneten Punkte existieren nicht. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die verfügbaren Daten in insgesamt 193 Fällen, d.h. zu ca. 86 %, nicht korrekt sind. Diese Aussagen gelten allerdings nur für

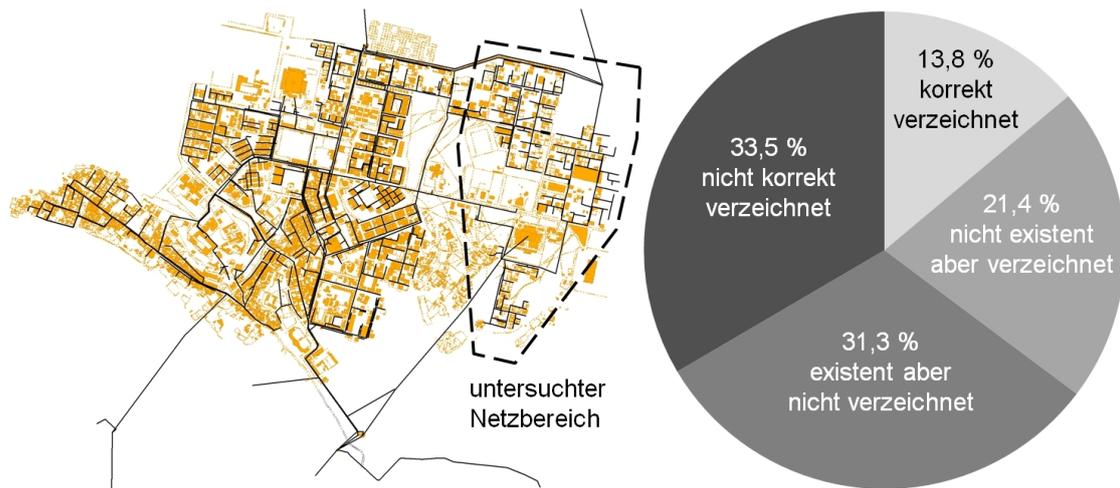


Abbildung 4.6: Konsistenzprüfung der vorhandenen Leitungsnetzdaten

den untersuchten Netzbereich uneingeschränkt.

Aufzeichnungen der Geometrien, Installationen und technischen Charakteristika der Speicherbehälter, Brunnen, Pumpen und der Quelle existieren nicht. Ebenso sind keine topographischen und geologischen Daten verfügbar. Zur Bebauung und Flächennutzung existieren das Stadtgebiet umfassende Pläne der APC. Jedoch wird in den Plänen Ist-Zustand und Planungszustand vermischt aufgeführt. Die Unterlagen sind daher für planerische Zwecke in der Wasserversorgung nicht verwertbar.

Eine zuständige Stelle für die Dokumentation der Elemente der Wasserversorgung existiert nicht. Auch wurde von den zuständigen Behörden der Sinn einer fortwährenden Dokumentation und Aktualisierung des Datenbestands nicht erkannt. Dies liegt unter anderem daran, dass der geplanten Instandhaltung und Netzanpassung bzw. -erweiterung, die solide Planungsgrundlagen voraussetzen, nur eine sehr geringe Bedeutung zugemessen werden. Weitere Gründe sind die verfügbaren finanziellen Ressourcen und Fachkräfte sowie die unklaren Zuständigkeiten.

### 4.3.5 Planung

Maßnahmen, die die Komponenten des Wasserverteilungssystems betreffen, werden in Béni Abbès üblicherweise von der DHW konzipiert. Dabei erstellt die DHW meist eine Entwurfsplanung und vergibt die Detailplanung und Umsetzung an Ingenieurbüros und Bauunternehmen. Als Auftraggeber übt die DHW außerdem die Funktion einer Art Bauüberwachung aus.

Einzelne Maßnahmen werden meist als Reaktion auf auftretende Probleme veranlasst. Dabei wird auf eine rechnerische Auslegung und vorausschauende Planung weitgehend verzichtet. Maßnahmen werden intuitiv beschlossen und veranlasst. Eine vorausschauende Planung findet mangels eines übergeordneten Systemkonzepts nicht statt und kann nicht stattfinden (s. Kap. 4.3.3). Die mangelnde Abstimmung zwischen den beteiligten Behörden erschwert zusätzlich eine ganzheitliche Vorge-

hensweise (s. Kap. 4.3.7). Hinzu kommt, dass die Netzstruktur sowie die verfügbare Datengrundlage und die Betriebsweise ein rechnerisches Nachvollziehen des hydraulischen Systemverhaltens unmöglich machen (s. Kap. 4.3.3 und 4.3.4).

Technisch mangelhaft durchgeführte Infrastrukturmaßnahmen sind daher die Regel. Dies liegt einerseits an der unsachgemäßen Durchführung, andererseits an der Bauüberwachung, die nicht die Aufgaben einer Qualitätskontrolle bei der Umsetzung initiiert Maßnahmen erfüllt. Gründe hierfür sind neben der fachlichen Kompetenz vermutlich auch in der Motivation der Fachkräfte zu sehen.

Nicht selten sind die Entscheidungen über Maßnahmen nicht alleine vom Bedarf und von der besten Lösung bestimmt. Vielmehr spielen politische und soziale Faktoren eine große Rolle. Der zentrale Wasserturm *WT1* wurde z.B. ohne ersichtliche technische Notwendigkeit und gegen fachlichen Rat gebaut. Über die Gründe kann nur spekuliert werden. Es ist anzunehmen, dass auf Grund der Sichtbarkeit der Maßnahme die Entscheidung u.a. politisch motiviert war. Außerdem stellt Korruption nach wie vor in Algerien ein Problem dar.

#### 4.3.6 Infrastruktur

Sowohl die Transport- und Zubringerleitungen als auch die Verteilungsleitungen sind größtenteils nicht sachgemäß verlegt und in schlechtem Zustand. Ein Großteil der Leitungen ist oberirdisch, ohne Schutz gegen mechanische Einwirkungen verlegt (s. Abb. 4.7). Reparaturarbeiten am Leitungsnetz sind meist mangelhaft ausgeführt (s. auch Kap. 4.3.4). Viele Absperrschieber sind ohne Schieberkammer ausgeführt und z.T. vom Erdboden bzw. von Sand verdeckt und daher nicht zugänglich und funktionsfähig (s. Abb. 4.8). Die existierenden Schieberkammern sind überwiegend schadhaft und mit Sand gefüllt. Der Schutz und die Zugänglichkeit der Armatur sind dadurch nicht mehr gewährleistet.



Abbildung 4.7: Leitungen des Wasserverteilungssystems (linkes Bild: C. Laures)

Die Speicherbehälter genügen nicht den hygienischen Ansprüchen und weisen zum Teil Leckagen auf. Die Bausubstanz ist teilweise marode. In keinem Fall sind mehrere

#### 4 Für Entwicklungsländer charakteristische Mängel der Wasserverteilung



Abbildung 4.8: Schieber und Schieberkammern des Wasserverteilungssystems (rechtes Bild: C. Laures)

Kammern umgesetzt, die eine Reinigung oder Wartung bei zumindest teilweiser Aufrechterhaltung des Betriebs ermöglichen würden. Einige Behälter sind ungenügend vor Dritten gesichert und die Speicherkammern nicht ausreichend gegen Verunreinigungen geschützt. Z.B. ist die ebenerdige Öffnung des Tiefbehälters *TB1* frei, für weidendes Vieh oder für Menschen, zugänglich. Außerdem befindet sich der Betriebsraum der Pumpen direkt über dem Speicherbehälter (s. Abb. 4.9). Schmutz, wie z.B. Schmiermittelreste, kann ungehindert in den Behälter eingetragen werden.



Abbildung 4.9: Pumpen des Wasserverteilungssystems

Die Förderanlagen sind generell nicht redundant, durch z.B. parallel angeordnete Pumpen, ausgeführt. Der Ausfall einer Pumpe führt zwangsläufig zum Totalausfall der Förderstrecke. Der Zustand der Pumpen sowie der zugehörigen Installationen ist bedenklich (s. Abb. 4.9). Zudem sind die Pumpen meist falsch ausgelegt, was vor allem bei den Tauchpumpen der Brunnen zu einem frühen Verschleiß führt (s. Kap. 4.3.2).

Der insgesamt schlechte Zustand der Wasserverteilungsinfrastruktur hat vielfältige, für die verschiedenen Systemkomponenten spezifische Ursachen. Eine entscheidende Rolle spielen bereits die Unzulänglichkeiten in der Planung, die zu erhöhten Belastungen und letztendlich zu Schäden führen können (s. Kap. 4.3.5). Die sehr schwach ausgeprägte Instandhaltung erfüllt ihre Aufgabe, nämlich die Erhaltung der Funktionsfähigkeit des Wasserverteilungssystems, nicht (s. Kap. 4.3.4 und 2.5.3). Folglich verschlechtert sich der Zustand der Infrastruktur stetig.

#### 4.3.7 Zuständigkeiten und Organisation

Ein nicht nur lokal auf Béni Abbès beschränktes Problem in der Organisation der Wasserversorgung ist die Definition der Zuständigkeiten. Durch die nicht klar zugewiesenen Verantwortungsbereiche innerhalb der staatlichen Behörden und im Fall Béni Abbès auch der lokalen Administration APC sind Abstimmungsprobleme unvermeidlich. Maßnahmen werden durchgeführt, ohne dass alle an der Wasserversorgung Beteiligten vorher informiert oder konsultiert werden. Des Weiteren führen die verschwommenen Grenzen in den Zuständigkeiten zwischen der DHW und der APC in Béni Abbès einerseits zu Mandatsüberschreitungen, andererseits wird der Umstand genutzt, um sich ggf. aus der Verantwortung zu nehmen.

#### 4.3.8 Auswirkungen für die Verbraucher

Eine Erhebung ergab, dass im Sommer ca. 87 % und im Winter ca. 76 % der an das öffentliche Netz angeschlossenen Verbraucher nicht kontinuierlich mit Wasser versorgt werden (AHT, 2005). Davon steht einigen täglich bis zu ca. einer Stunde und 45 Minuten Wasser aus dem Leitungsnetz zur Verfügung. Der Großteil wird aber nur insgesamt ca. vier bis fünf Stunden in der Woche mit Wasser versorgt. Etwa ein Drittel der Haushalte gab in der Studie an, bis zu zwei Tage in der Woche gar kein Wasser zu erhalten, während ein kleiner Anteil (ca. 2 %) sogar bis zu fünf Tage lang Wasser vorhalten muss.

Die in den vorigen Kapiteln dargestellten Untersuchungen und Mängel lassen den Schluss zu, dass das Wasser während der Verteilung und der Speicherung verunreinigt wird und beim Abnehmer sehr wahrscheinlich nicht den Qualitätsanforderungen an Trinkwasser genügt<sup>7</sup>.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Verbraucher unzuverlässig und intermittierend mit Wasser versorgt werden. Durch die große Variabilität in den Versorgungszeiten und in der Rohrnetzabgabe ist keine Gleichheit bei der Versorgung der Verbraucher gegeben. Außerdem sehen sich die Verbraucher mit einer nicht gesicherten Wasserqualität konfrontiert. Damit werden in allen genannten Punkten Kriterien der algerischen Wassergesetzgebung nicht erfüllt (s. Fußnote 6, S. 76). Derartige Verstöße führen allerdings in der Regel nicht zu Konsequenzen für die Verantwortlichen.

---

<sup>7</sup>Die Wasserqualitätsentwicklung im Wasserverteilungssystem von der Gewinnung bis zum Abnehmer ist Gegenstand aktueller Untersuchungen des IWG im Auftrag der GTZ in Béni Abbès.

## 4.4 Mängel und ihre Zusammenhänge

### 4.4.1 Definition des Begriffs Mangel

Die Aufgaben einer Wasserversorgung orientieren sich letztendlich immer am Verbraucher. Daher können folgende grundlegende Anforderungen abgegrenzt werden:

- Anforderungen bzgl. der bereitgestellten Wassermenge
- Anforderungen bzgl. der bereitgestellten Wasserqualität
- Anforderungen bzgl. des Versorgungsdrucks
- Anforderungen bzgl. einer gerechten Versorgung

Bzgl. der Anforderungen an eine Wasserversorgung wird aus Sicht der Verbraucher unter einem Mangel in der Wasserversorgung zunächst eine Einschränkung in der Erbringung ihrer definierten Aufgaben verstanden. Die Definition der Aufgaben einer Wasserversorgung bestimmt daher im Umkehrschluss, was als Mangel anzusehen ist. Ist z.B. die Bereitstellung von Trinkwasser in einwandfreier Qualität für den Verzehr eine Anforderung an die Wasserversorgung, sind Abstriche bei der geforderten Qualität ein Mangel. Ist lediglich die Bereitstellung von sauberem Brauchwasser mit einer deutlich geringeren Anforderung an die Qualität Aufgabe der Wasserversorgung, kann die gleiche bereitgestellte Qualität u.U. keinen Mangel darstellen. Darüber hinaus werden alle Ursachen, die zu einer Einschränkung in der Aufgabenerbringung führen, als Mängel bezeichnet. Demzufolge muss die Aufgabendefinition bei allgemeinen Betrachtungen von Mängeln in der Wasserversorgung berücksichtigt werden.

In den entwickelten Ländern sind die Anforderungen an die Wasserversorgung meist bzgl. Qualität, Quantität und Versorgungsdruck definiert (s. z.B. Kap. 2.2.1). Durch die tatsächliche Gewährleistung der Versorgung ist eine gerechte Versorgung implizit. Einschränkungen in der bereitgestellten Menge gehen dagegen fast immer mit Einschränkungen in der gerechten Verteilung einher. Da die Mehrzahl der Versorgungssysteme in Entwicklungsländern Defizite in der verteilten Menge aufweisen, ist dort die gerechte Verteilung als Anforderung bei Betrachtungen zu Mängeln mit zu berücksichtigen.

### 4.4.2 Ursache und Wirkung

Ein Mangel entsprechend der im vorigen Kapitel genannten Definition, hat meist nicht genau eine Ursache. Eine Vielzahl, z.T. kausal verknüpfter Mängel führt letztendlich zu einer Einschränkung in der Erfüllung der grundlegenden Aufgaben. Diese, sich bedingende und Wechselwirkungen aufweisenden Defizite werden ebenfalls als Mängel bezeichnet. D.h., der Begriff Mangel ist nicht ausschließlich auf die Ebene der Anforderungen, also die Ebene der Verbraucher, beschränkt. Ein Mangel kann je nach Betrachtungsebene auch Ursache für einen Mangel oder Auswirkung eines Mangels sein. In letzter Konsequenz führt jeder Mangel zu einer Einschränkung

der Aufgabenerfüllung der Wasserversorgung. Die Aufgabendefinition des Wasserverteilungsnetzes bestimmt daher wie bereits im vorigen Kapitel beschrieben, was grundsätzlich als Mangel anzusehen ist.

Für das Verständnis eines bestimmten Mangels ist demzufolge die Berücksichtigung der gesamte Kausalkette (Wirkungskette) mit ursächlichen Mängeln (tiefere Ebenen) und bedingten Mängeln (höhere Ebenen) notwendig. Entsprechend müssen für die nachhaltige Beseitigung eines Mangels alle ursächlichen Mängel behoben werden.

### 4.4.3 Zuordnung

Betrachtungen zu Mängeln, die letztendlich zu einer nicht oder nur eingeschränkt funktionsfähigen Wasserversorgung führen, können zunächst auf den technischen und ökonomischen Bereich der Wasserversorgung beschränkt werden. Der technische Bereich umfasst dabei alle Belange der Konzeption und Planung der Wasserversorgung, der Infrastruktur sowie des Betriebs der Systemkomponenten. Dem ökonomischen Bereich sind die betriebswirtschaftlichen Belange, wie die Preisgestaltung, die Abrechnung, die Investitionsplanung etc., zuzuordnen. Auf diese beiden Bereiche hat der Wasserversorger direkten Einfluss. Allerdings werden Mängel, die diesen Bereichen zuzuordnen sind, entscheidend von äußeren, regionalspezifischen Randbedingungen beeinflusst, auf die der Wasserversorger keinen direkten Einfluss hat:

- Institutionelle Randbedingungen (z.B. Politik, Organisationsstruktur, Gesetzgebung, Regulierung)
- Gesellschaftliche und kulturelle Randbedingungen (z.B. Verfügbarkeit von Fachkräften, Verbraucherverhalten, Akzeptanz, Korruption)
- Ökonomische Randbedingungen (z.B. Rechtsform, Subventionen)
- Ökologische Randbedingungen (z.B. CO<sub>2</sub>-Emission, Ressourcenschutz)
- Technische Randbedingungen (z.B. Schnittstellen zu weiteren Infrastruktursystemen, Verfügbarkeit von Material)

U.U. ist es sinnvoll Randbedingungen, die in Mängel resultieren und nicht als gegeben hingenommen werden müssen, nach der in Kapitel 4.4.1 gegebenen Definition als Mangel zu bezeichnen. Im speziellen Fall unveränderliche Randbedingungen sind dagegen in die Konzeption der Wasserversorgung mit einzubeziehen. Ohnehin unveränderliche Randbedingungen, wie z.B. geographische Aspekte, sind bewusst aus obiger Aufzählung ausgeklammert und analog in der Konzeption zu berücksichtigen.

### 4.4.4 Darstellungsansatz

Abbildung 4.10 zeigt einen Ansatz zur schematischen Darstellung von Mängeln und ihrer Zusammenhänge, der die in den Kapiteln 4.4.1, 4.4.2 und 4.4.3 beschriebenen Aspekte berücksichtigt. Die Darstellung bezieht sich auf genau eine Aufgabendefinition. Mängel die zu Einschränkungen in der Erfüllung dieser Aufgaben führen, sind matrizenhaft dargestellt. Dabei gibt die vertikale Richtung die Betrachtungsebene

vor. Bezogen auf einen Mangel sind alle Mängel höherer Ebenen Wirkungen und alle Mängel tieferer Ebenen Ursachen des betrachteten Mangels. Pfeile verdeutlichen die Wirkungsketten der Mängel. Ein Mangel kann dabei mehreren Wirkungsketten zugeordnet sein. Alle Mängel führen letztendlich zu einer Einschränkung in der Erfüllung der Aufgaben, die am Kopf der matrizenhaften Darstellung aufgeführt sind. Für die Beschreibung der Wirkungsketten kann eine Beschränkung des betrachteten Bereichs sinnvoll sein. Am unteren bzw. am rechten Rand der Darstellung werden Schnittstellen zu außerhalb des Betrachtungsbereichs liegenden Mängeln angeführt.

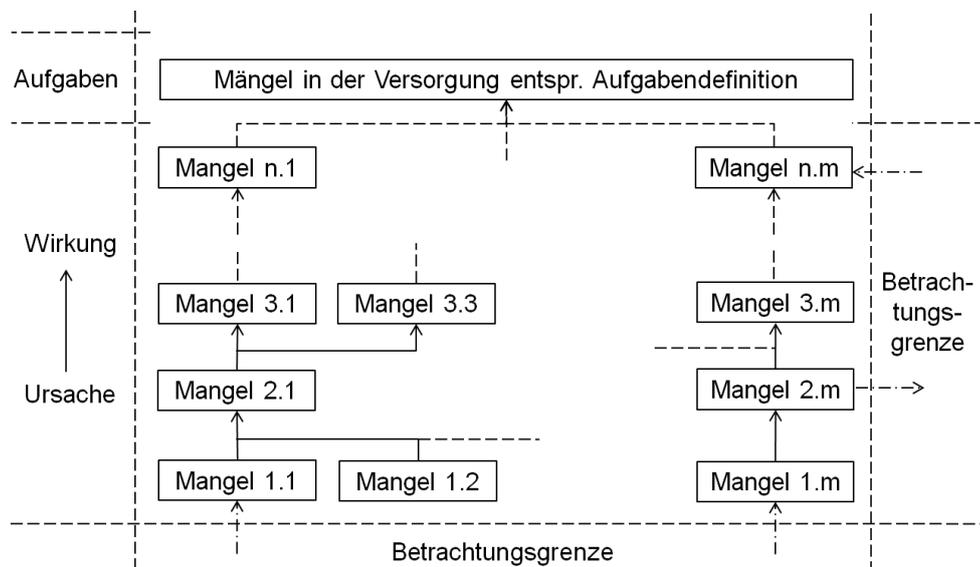


Abbildung 4.10: Schematische Darstellung der Wirkungsketten von Mängeln

## 4.5 Relevante Mängel

### 4.5.1 Abgrenzung

Eine umfangreiche Darstellung der wichtigen Wirkungsketten der für Entwicklungsländer typischen Mängel würde den in dieser Arbeit gegebenen Rahmen übersteigen. Daher werden im Folgenden ausschließlich die für diese Arbeit relevanten Mängel sowie ihre Zusammenhänge näher betrachtet. Im Zentrum der Betrachtung steht der intermittierende Betrieb von Systemen, die ursprünglich für eine kontinuierliche Versorgung ausgelegt wurden. Für eine nachhaltig mangelfreie zentrale Wasserversorgung ist das Verteilungsnetz kontinuierlich unter Druck zu betreiben (Kumar, 1998; Klingel und Deuerlein, 2008). In Kapitel 5 wird ein Konzept zur Überführung von Systemen mit intermittierender Versorgung hin zu einer kontinuierlichen Versorgung beschrieben. Die Voraussetzungen bzw. die zu beseitigenden Mängel für die Gewährleistung einer kontinuierlichen Versorgung sind vielfältig. U.a. ist eine angepasste Netzstruktur von zentraler Bedeutung, deren Umsetzung eine fundierte

Planung voraussetzt. Zudem sind sowohl für die Planung als auch für den Betrieb umfassende Systemkenntnisse notwendig. Ein an die Anforderungen in Entwicklungsländern und insbesondere an die Umsetzung des oben erwähnten Konzepts angepasstes Analyse-, Planungs- und Datenmanagementinstrument ist in Kapitel 6 beschrieben. Angepasste Arbeitsprozesse für den Aufbau und die Aktualisierung der notwendigen Datenbasis sind in Kapitel 7 dargestellt. Dementsprechend wird im Weiteren hauptsächlich auf die eng verknüpften Wirkungsketten der im Folgenden gelisteten Mängel eingegangen:

- Mängel in der Datenhaltung (s. Kap. 4.5.2)
- Mängel im Systemkonzept, der Netzstruktur und der Auslegung (s. Kap. 4.5.3)
- Mängel in der Betriebs- und Versorgungsweise (s. Kap. 4.5.4)

Die Aufgabendefinition ist in den Betrachtungen auf die bereitgestellte Wassermenge und Wasserqualität sowie die Gleichheit in der Versorgung beschränkt. Durch die Abhängigkeit der Wasserentnahmen vom Versorgungsdruck ist bei Gewährleistung der Entnahmen die Gewährleistung eines ausreichenden Drucks implizit. Defizite in der Höhe des Versorgungsdrucks, die allein eine Einschränkung bezüglich des Komforts bedeuten, werden bewusst ausgeklammert. Sie stellen keine existentielle Einschränkung in der Versorgung dar. Außerdem beschränken sich die Betrachtungen weitestgehend auf den technischen Bereich der Wasserversorgung. Auf Aspekte anderer Bereiche wird ggf. verwiesen (s. Kap. 4.4.3).

Die Zusammenhänge der wichtigsten Mängel der drei Betrachtungsbereiche sind im Folgenden in jeweils einem Kapitel dargestellt. Die mehrfache Nennung von Aspekten, die in mehreren Betrachtungsbereichen relevant sind, ist nicht zu vermeiden. Auch werden Aspekte, die bereits aus der Darstellung des Fallbeispiels Béni Abbès bekannt sind verallgemeinert wieder aufgegriffen. Außerdem sind in den folgenden drei Kapiteln die Wirkungsketten der Mängel abgebildet (s. Abb. 4.11, 4.12 und 4.13). Die Darstellung orientiert sich an dem in Kapitel 4.4 eingeführten Ansatz. Schnittstellen zu den jeweils anderen Betrachtungsbereichen sind angegeben.

### 4.5.2 Mängel in der Datenhaltung

#### 4.5.2.1 Notwendigkeit einer Datenhaltung

Wie bereits in Kapitel 2.5.5 erwähnt, unterliegt die Infrastruktur von Wasserverteilungsnetzen einer starken Dynamik. Wesentliche Einflussgrößen sind die Alterung der Anlagenteile und die dadurch bedingte Instandhaltung sowie demographischer Wandel und Änderungen der Flächennutzung und die dadurch bedingte Netzanpassung bzw. Netzerweiterung auf Grund sich verändernder Randbedingungen. Sowohl die Planung und Analyse als auch der Betrieb eines Wasserverteilungsnetzes verlangen daher fundierte Kenntnisse der Infrastruktur sowie der maßgebenden Randbedingungen. Demzufolge spielt die Datenhaltung eine zentrale Rolle bei der Ermöglichung einer funktionierenden sowie technisch, ökologisch und ökonomisch

nachhaltigen Wasserverteilung. Mängel in der Datenhaltung führen unweigerlich zu Mängeln in der Wasserverteilung.

Die Aufgabe der Datenhaltung ist u.a. die Dokumentation und Abbildung des aktuellen Zustands eines Wasserverteilungssystems, worauf im Weiteren der Fokus liegt. Die Verwaltung und Aktualisierung der Aufzeichnungen der Infrastruktur werden zweckmäßig zentral organisiert. Dadurch werden Redundanzen und Widersprüche im Datenbestand vermieden. Meist werden heute zur Verwaltung der Systemdaten zentrale, digitale Netzkataster geführt (s. Kap. 2.5.5.3).

##### **4.5.2.2 Ursachen der Mängel in der Datenhaltung**

In Entwicklungsländern sind zentrale Netzkataster sowie verknüpfte Arbeitsprozesse zur kontinuierlichen Datenerhebung und Aktualisierung des Katasters selten erfolgreich implementiert. Meist liegen nur veraltete Netzpläne vor, die häufig einen Planungszustand widerspiegeln, der nie mit der Realität abgeglichen wurde. Bei vielen Wasserversorgern existieren gar keine Aufzeichnungen. Bestenfalls verfügen lokale Wassermeister über gute Systemkenntnisse. Allerdings wird meist angenommen, dass der Wissensstand der Wassermeister besser ist, als es in Realität der Fall ist. Ein typisches Beispiel hierfür ist die Wasserversorgung in Béni Abbès (s. Kap. 4.3.4).

Die Ursachen liegen hauptsächlich im institutionellen und personellen Bereich der Wasserversorger. Von den Entscheidungsträgern wird die Bedeutung einer funktionierenden Datenhaltung schlicht nicht erkannt (Kumar, 1998). Auf der Ausführungsebene ist die Finanzierung und die Verfügbarkeit von entsprechend ausgebildetem und motiviertem Personal meist die entscheidende Restriktion (Thibodeaux, 2005).

##### **4.5.2.3 Auswirkungen der Mängel in der Datenhaltung**

Stehen keine korrekten und aktuellen Systemdaten zur Verfügung, ist eine herkömmliche Berechnung und somit die Analyse des existierenden Netzes sowie die Planung von Netzerweiterungen oder Netzanpassungen an veränderte Randbedingungen nicht möglich (Trifunovic und Vairavamoorthy, 2008). Die Folge sind ungeplante Systemerweiterungen sowie fehldimensionierte Leitungsnetze und Armaturen. Die aus den Fehldimensionierungen resultierenden erhöhten Belastungen der Infrastruktur beeinflussen den Zustand der Infrastruktur mit den weiter unten genannten Konsequenzen negativ. Auf die Aspekte der mangelhaften Planung wird im nächsten Kapitel näher eingegangen.

Eine ungenügende Datenbasis sowie die dadurch eingeschränkte Systemanalyse bedingen lückenhafte Systemkenntnisse. Die fehlenden Systemkenntnisse machen eine nachhaltige Instandhaltung und dabei insbesondere die zu planenden Grundmaßnahmen Wartung, Inspektion und Rehabilitation unmöglich (s. Kap. 2.5.3). Die Konsequenz ist ein mangelhafter Zustand der Infrastruktur, der in der eingeschränkten Funktionalität der Systemelemente und einer erhöhten Leckageanzahl mit entsprechenden realen Wasserverlusten resultiert (Hammerer, 2000). Eine effektive Reduzierung der realen Wasserverluste setzt wiederum fundierte Systemkenntnis-

se voraus (Howard und Bartram, 2005; Farley und Liemberger, 2005; Ulanicki u. a., 2008). Reale Wasserverlustmengen können Dimensionen annehmen, die in letzter Konsequenz eine adäquate Versorgung unmöglich machen. Oft wird auf eine große Leckageanzahl mit intermittierender Betriebsweise reagiert. Die Betriebsweise soll die Verlustmengen durch die Leckagen minimieren. Allerdings bedingt eine intermittierende Betriebsweise wiederum höhere Leckageraten. Insbesondere bei durch den intermittierenden Betrieb bedingten Unterschreitungen des minimalen Versorgungsdrucks bergen Leckagen zudem die Gefahr des Partikeleintrags und damit der Verschmutzung des Wassers.

Ungenügende Systemkenntnisse lassen einen sachgemäßen, versorgungstechnisch einwandfreien Betrieb nicht zu und führen damit zwangsläufig zu der Notwendigkeit das System intuitiv und intermittierend zu betreiben (s. Kap. 4.5.4). Die damit verbundenen Versorgungsengpässe führen u.a. zu der in Entwicklungsländern mitunter großen Anzahl illegaler Netzanschlüsse (Bradley u. a., 2002). Illegale Anschlüsse sind nur aufwändig zu lokalisieren und daher ein weiterer unbekannter Parameter in der Datenhaltung, der die beschriebenen Probleme verstärkt (s. auch Kap. 4.5.3). Auf weitere Ursachen der intermittierenden Betriebsweise sowie deren Auswirkungen wird in Kapitel 4.5.4 eingegangen.

### 4.5.2.4 Zusammenfassung der Mängel in der Datenhaltung

Zusammenfassend führen Mängel in der Datenhaltung zu eingeschränkten Systemkenntnissen. Diese sind wiederum die Voraussetzung für die sachgemäße Durchführung der Planung, der Instandhaltung und Wasserverlustreduktion sowie des Betriebs und damit für eine nachhaltige funktionierende Wasserverteilung.

Abbildung 4.11 zeigt einen Überblick über die Wirkungsketten der dem Bereich der Datenhaltung zuzuordnenden Mängel. In der Abbildung sind Schnittstellen zu Mängeln außerhalb des Betrachtungsbereichs angedeutet. Die durch eine ungenügende Datenhaltung bedingten Mängel in der Netzplanung und in der Betriebsweise sind in Kapitel 4.5.3 bzw. 4.5.4 und in Abbildung 4.12 bzw. 4.13 dargestellt. Ursächlich für die Mängel in der Datenhaltung sind hauptsächlich institutionelle, gesellschaftliche und ökonomische Randbedingungen (s. Kap. 4.4.3).

## 4.5.3 Mängel im Systemkonzept und der Netzplanung

### 4.5.3.1 Notwendigkeit eines Systemkonzepts

Der funktionierender Betrieb eines Wasserverteilungssystems setzt ein an die örtlichen Gegebenheiten angepasstes sowie zukünftige Entwicklungen berücksichtigendes Systemkonzept voraus (s. Kap. 2.4.1). Das Systemkonzept, also die Anordnung der Systemkomponenten Behälter, Förderanlagen, Zubringer- und Verteilungsnetze, ermöglicht den Betrieb der Einzelkomponenten nach den anerkannten Regeln der Technik. Alle Maßnahmen des Betriebs, der Instandhaltung und der Systemerweiterungen sind mit dem übergeordneten Systemkonzept in Einklang zu bringen.

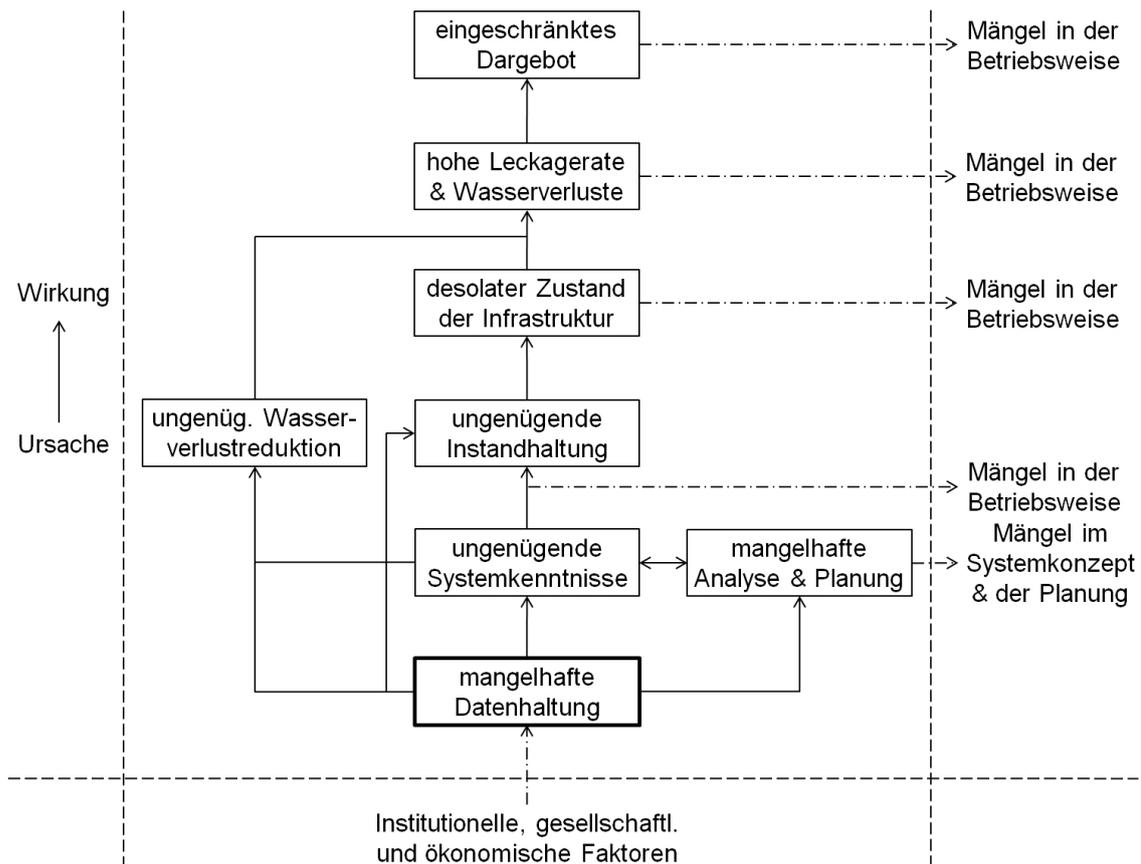


Abbildung 4.11: Wirkungsketten der Mängel in der Datenhaltung

#### 4.5.3.2 Ursachen der Mängel im Systemkonzept und der Netzplanung

In Entwicklungsländern mangelt es vielen Wasserverteilungssystemen an einem übergeordneten Konzept. Komplexe große Wasserverteilungssysteme ohne definierte Druck- oder Versorgungszonen sowie ohne definierte Zubringersysteme sind nicht ungewöhnlich (s. Kap. 4.3.3 und Cembrowicz u. a. (2004)). Systeme wurden zum Teil unter Berücksichtigung eines Konzepts entworfen und sind ungeplant erweitert und verändert worden. Meist wurden diese Systeme in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts für die damalige Größe des Versorgungsgebiets sachgemäß für eine kontinuierliche Versorgung gebaut. Auf das starke Bevölkerungswachstum im urbanen Raum und das damit oft verbundene unkontrollierte Siedeln konnte in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts nur noch ungenügend und improvisierend reagiert werden. Andere Systeme sind bereits ungeplant angelegt worden. In jedem Fall ist eine aktuelle Missachtung oder fehlende Berücksichtigung übergeordneter Konzepte kennzeichnend. Außerdem ist in Entwicklungsländern die verfügbare Datengrundlage oft ungenügend (s. voriges Kap.).

Ein rechnerisches Nachvollziehen des hydraulischen Systemverhaltens ist bei ungenügender Datengrundlage sowie nicht sachgemäßem Systembetrieb nicht möglich

(Trifunovic und Vairavamoorthy, 2008; Ang und Jowitt, 2006; Totsuka u. a., 2004). Insbesondere bei einer intermittierenden Betriebsweise ist auf Grund instationärer Strömungszustände, möglicher Zweiphasenströmungen sowie der meist komplexen Systemkonfigurationen (Hausbehälter, private Pumpen) mit teilweise unbekanntem Parametern (Wasserverluste, Systemdaten) die bedarfsabhängige Rohrnetzrechnung nicht mehr aussagekräftig (s. auch nächstes Kap.). Bei der bedarfsabhängigen Rohrnetzrechnung wird davon ausgegangen, dass bestimmte Wassermengen aus dem System entnommen werden (s. Kap. 3.7.1). Die Wassermengen werden als Parameter der Berechnung vorgegeben. Voraussetzung für die Aussagekraft der Berechnung ist die Annahme, dass der für die Entnahmen notwendige Druck gewährleistet ist. Dies trifft nur bei kontinuierlich unter Druck stehenden Verteilungssystemen zu. Die wenigen bekannten Ansätze zur Modellierung einer intermittierenden Betriebsweise, z.B. von Cabrera-Bejar und Tzatchkov (2009), Ingeduld u. a. (2006), Sashikumar u. a. (2003), Batish (2003) und Vairavamoorthy u. a. (2001), berücksichtigen die Charakteristika des intermittierenden Betriebs nicht umfassend oder stellen keine praktikablen Lösungen dar. Eine Systemanalyse ist daher schwierig und meist nur begrenzt aussagekräftig. Die Kenntnisse der bestehenden Infrastruktur und des hydraulischen Systemverhaltens sind demzufolge gering.

#### 4.5.3.3 Auswirkungen der Mängel im Systemkonzept und der Netzplanung

Wie bereits weiter oben erwähnt, ist eine nachhaltige Konzeption von Netzerweiterungen oder Netzanpassungen an veränderte Randbedingungen bei einem fehlenden übergeordneten Systemkonzept nicht möglich. Zudem ist eine sachgemäße Maßnahmenplanung und Auslegung der Systemkomponenten bei ungenügender Datengrundlage und mangelnder Systemkenntnis nicht durchführbar. Die Konsequenz sind intuitiv veranlasste, ungeplante Netzerweiterungen oder Eingriffe in die Netzstruktur und falsch dimensionierte Systemkomponenten.

Demzufolge können die Systemkomponenten nicht sachgemäß betrieben werden. Z.B. sind Förderanlagen über- oder unterdimensioniert und Behälter erfüllen ihre Aufgabe auf Grund nicht zweckmäßiger Anordnung im Netz nicht. Die ursprünglich mitunter sachgemäß konzipierte Systemstruktur wird wegen der ungeplanten Erweiterungen zunehmend komplexer (Vairavamoorthy u. a., 2001). Die Verteilungsnetze weisen eine undurchschaubare Topologie auf und sind nicht korrekt für die Wassereutnahmen und den Betrieb ausgelegt. In diesem Zusammenhang sind auch fehlende Erweiterungen oder Anpassungen der Systemkapazitäten an steigenden Bedarf, durch z.B. Bevölkerungswachstum, zu berücksichtigen (Andey und Kelkar, 2007; Totsuka u. a., 2004). Sowohl zu geringe als auch zu große Drücke sind folglich zu verzeichnen.

Die Druckspitzen und Druckschwankungen wirken sich negativ auf die Infrastruktur und damit auf die Wasserverluste und Wasserqualität aus. Zu niedrige Leitungsdrücke resultieren in Stagnationszonen und der damit verbundenen Gefahr von Verkeimung des Wassers sowie in nicht versorgten Netzbereichen. Diese Aspekte sind näher im nächsten Kapitel erläutert. Die, zudem auch durch die intermittierende Be-

triebsweise bedingten, Versorgungsengpässe sowie die damit verbundene ungerechte Verteilung veranlassen die Verbraucher zu illegalen Netzanschlüssen, das Nutzen privater Pumpen und zur Installation von Hausbehältern. Die Netzstruktur sowie die Netzhydraulik wird noch komplexer und undurchschaubarer (Kumar, 1998). Die komplexe Netzstruktur ist jedoch wiederum eine der Hauptursachen einer intuitiven, intermittierenden Betriebsweise (s. nächstes Kap.)

#### 4.5.3.4 Zusammenfassung der Mängel im Systemkonzept und der Netzplanung

Abbildung 4.12 zeigt einen Überblick über die Wirkungsketten der dem Bereich der Systemkonzeption und Netzplanung zuzuordnenden Mängel. In der Abbildung sind Schnittstellen zu Mängeln außerhalb des Betrachtungsbereichs angedeutet. Die bedingten Mängel in der Betriebsweise sind in Kapitel 4.5.4 und in Abbildung 4.13 dargestellt. Ursächlich für die Mängel in der Datenhaltung sind institutionelle, gesellschaftliche und ökonomische Randbedingungen sowie Mängel in der Datenhaltung (s. Kap. 4.4.3 und 4.5.2 sowie Abb. 4.11).

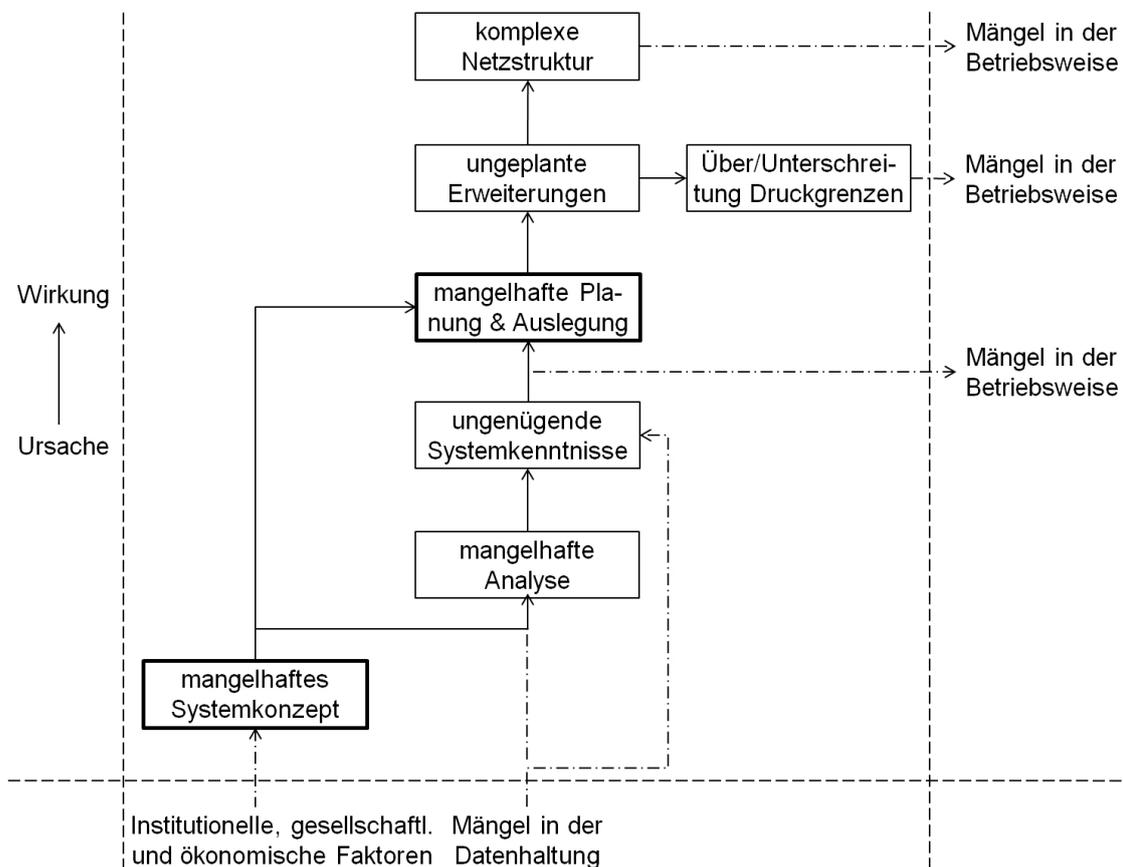


Abbildung 4.12: Wirkungsketten der Mängel im Systemkonzept und der Netzplanung

## 4.5.4 Mängel in der Betriebsweise und Versorgung

### 4.5.4.1 Notwendigkeit einer kontinuierlichen Betriebsweise

Die intermittierende Betriebsweise bzw. die intermittierende Versorgung ist charakteristisch für die Wasserverteilung in Entwicklungsländern. In Tabelle 1.1 werden für ausgewählte Regionen die Anteile der zentralen Wasserverteilungssysteme angegeben, die intermittierend betrieben werden. Nahezu alle intermittierend betriebenen Systeme wurden ursprünglich für einen kontinuierlichen Betrieb konzipiert (s. Kap. 2.5.2). Auf Grund verschiedener Zwänge werden die Systeme aktuell entgegen ihrer Konzeption intermittierend betrieben (Vairavamoorthy u. a., 2008, 2007b). Die negativen Auswirkungen dieser unsachgemäßen Betriebsweise sind zahlreich und verhindern letztlich eine versorgungstechnisch einwandfreie Wasserverteilung. Im Umkehrschluss kann festgehalten werden, dass der sachgemäße, kontinuierliche Betrieb Voraussetzung für eine nachhaltige Wasserverteilung ist. Die Ursachen und Auswirkungen der intermittierenden Betriebsweise werden im Folgenden diskutiert.

### 4.5.4.2 Ursachen der Mängel in der Betriebsweise und Versorgung

Als Grund für den intermittierenden Betrieb wird seitens der Entscheidungsträger häufig die Knappheit der verfügbaren Wasserressourcen angeführt, die keine kontinuierliche Versorgung der Abnehmer zulässt (Andey und Kelkar, 2007). Allerdings ist hierbei die absolute Wasserknappheit von der Knappheit, die ökonomischen oder technischen Zwängen geschuldet ist, abzugrenzen (Totsuka u. a., 2004). Als absolute Knappheit wird in diesem Zusammenhang ein Dargebot bezeichnet, das nicht genügt den Bedarf zu decken. Stellt die Erschließung neuer Wasserressourcen keine Option dar, ist die absolute Knappheit eine äußere, unveränderliche Randbedingung. Demgegenüber deckt bei der technisch-ökonomischen Wasserknappheit prinzipiell die verfügbare Wasserressource den Bedarf. Die Wasserknappheit resultiert aus einer Reduktion der verfügbaren Menge durch Wasserverluste und Wasserverschwendung bei der Verteilung und beim Verbraucher (McIntosh, 2003; Chowdhury u. a., 2002; Kumar, 1998, 1997). Die Ursachen sind im Wesentlichen auf den Betrieb der Wasserversorgung zurückzuführen (s.u. und Kap. 4.5.2). Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass bei technisch-ökonomischer Wasserknappheit prinzipiell eine kontinuierliche Versorgung möglich ist (Kumar, 1998).

Neben der Wasserknappheit führen im technischen Bereich der Wasserversorgung hauptsächlich eine mangelhafte Systemkonzeption, eine komplexe Netzstruktur sowie ungenügende Systemkenntnisse zu einem intermittierenden Betrieb. Die Ursachen hierfür sind näher in Kapitel 4.5.2 und 4.5.3 beschrieben. Unzulänglichkeiten im Systemkonzept können durch die daraus resultierende falsche Anordnung und Auslegung der Systemkomponenten zur Einschränkung derer Funktionsfähigkeit und damit zur Einschränkung eines sachgemäßen Betriebs innerhalb vorgegebener Grenzen führen. Eine komplexe Netzstruktur, u.a. auch Resultat der Unzulänglichkeiten im Systemkonzept, erschweren einen sachgemäßen Betrieb zudem. Eine weitere gravierende Einschränkung ergibt sich durch fehlende Kenntnisse der Struktur des Sys-

tems und des hydraulischen Verhaltens. Die Konsequenz ist die Notwendigkeit das System intuitiv, d.h. ungeplant und unkontrolliert, sowie intermittierend zu betreiben. Der Betrieb stellt also eine Reaktion auf die unzulänglichen Systeme und die fehlenden Systemkenntnisse dar und ist keine geplante Strategie (Vairavamoorthy u. a., 2008).

##### 4.5.4.3 Auswirkungen der Mängel in der Betriebsweise und Versorgung

Bei der intermittierenden Betriebsweise wird das Verteilungsnetz für eine bestimmte Zeit mit Wasser beschickt. U.u. werden auch verschiedene Bereiche eines Netzes zu unterschiedlichen Zeiten beschickt. Der intermittierende Betrieb führt damit per se zu einer intermittierenden Versorgung und zu Versorgungsengpässen. Die Folgen sind die Notwendigkeit der häuslichen Zwischenspeicherung sowie u.U. die Nutzung sekundärer Wasserprivate Wassergewinnungen, die durch die unkontrollierte Ausbeutung der Wasservorkommen eine Gefahr für die Wasserressource und damit für die Wasserversorgung darstellen können (McIntosh, 2003). Während der Beschickungszeiten entnehmen die Verbraucher Wasser aus dem Netz und speichern es für die Zeiten ohne Beschickung z.B. in kleinen privaten Behältern. Um die Beschickungszeiten voll nutzen zu können, bleiben die Wasserhähne meist konstant geöffnet (Totsuka u. a., 2004; McIntosh, 2003). Mitunter sind die privaten Behälter auch mit Schwimmerventilen ausgerüstet, wie z.B. in Béni Abbès (s. Kap. 4.2.4).

Durch die Entnahme relativ großer Wassermengen in relativ kurzer Zeit nehmen die Lastfaktoren Dimensionen an, für die die Leitungsnetze meist nicht ausgelegt sind. Andey und Kelkar (2007) haben in Fallstudien Lastfaktoren ermittelt, die bei intermittierendem um das bis zu 3,2-fache höher sind, als bei kontinuierlichem Betrieb. Zudem nimmt die Zahl der Anschlüsse und damit die Größe der zu verteilenden Menge auf Grund des Bevölkerungswachstums und der Urbanisierung mitunter zu, ohne dass die Kapazitäten des Verteilungsnetzes entsprechend erhöht werden (McIntosh, 2003). Dies führt zu relativ großen Druckhöhenverluste und damit zu Druckdefiziten im Netz. Abnehmer, die weiter vom Einspeisepunkt als andere Abnehmer entfernt sind, können dadurch weniger Wasser entnehmen (Totsuka u. a., 2004). Im Extremfall reichen die Drücke nicht aus, Wasser in entfernte Netzbereiche zu verteilen. Stagnationszonen und nur teilweise gefüllte Leitungsabschnitte sind die Folge. Um die Druckdefizite auszugleichen werden, wie z.B. in Béni Abbès (s. Kap. 4.3.4), teilweise private Pumpen genutzt. Nach Ende der Beschickung werden Netzbereiche durch weitere Entnahmen und Leckagen u.U. vollständig entleert. Die dazu z.T. eingesetzten privaten Pumpen führen u.U. zu negativen Drücken. Außerdem sind Druckstöße bei der wiederkehrenden Befüllung entleerter Leitungen keine Seltenheit.

Die durch Druckdefizite und intermittierende Netzbeschickung verursachte Stagnation des Wassers im Leitungsnetz sowie die Aufenthaltszeiten des Wassers in den Hausbehältern bergen die Gefahr der Verkeimung des Wassers. Studien belegen die Verunreinigung des Wassers im beschriebenen Kontext (Jensen u. a., 2001; Lee und Schwab, 2005; Gadgil, 1998; Totsuka u. a., 2004; Andey und Kelkar, 2007). Ober-

flächennahe Leitungsverlegung und die vor der Sonne ungeschützte Anordnung der Hausbehälter verstärken bei warmen Temperaturen die Gefahr. Im Beispiel Béni Abbès ist beides der Fall (s. Kap. 4.3.4).

Die durch die Betriebsweise sowie durch die in Kapitel 4.5.3 beschriebenen Mängel in der Netzauslegung bedingten Druckstöße, Druckspitzen und Druckschwankungen wirken sich negativ auf die Infrastruktur aus (Chowdhury u. a., 2002; Andey und Kelkar, 2007). Die Folgen sind ein schlechter Zustand der Infrastruktur, höhere Rohrbruchraten und die damit verbundenen hohen Wasserverluste (Bradley u. a., 2002; Kumar, 1998; WHO, 2003). Die oft ungenügende Instandhaltung und Wasserverlustreduktion verschärfen die Problematik (s. auch Kap. 4.3.4 und 4.3.6). Zu den in Kapitel 4.5.2 genannten Ursachen einer mangelhaften Wasserverlustreduktion kommen die Erschwernisse durch den intermittierenden Betrieb hinzu. Ist das Versorgungsnetz nicht dauerhaft unter Druck mit Wasser gefüllt, können wichtige Techniken der Wasserverlustermittlung und der Leckageortung nicht angewandt werden. Kumar (1997) beschreibt mögliche Methoden, die die Problematik der Leckageortung bei intermittierender Versorgung behandeln. Alle Methoden haben das Prinzip gemein, Netzbereiche über verschiedene Ansätze temporär kontinuierlich zu beschicken. Zudem führt die regelmäßige Wiederbefüllung leerer oder teilweise entleerter Rohrleitungen zu einer Zweiphasenströmung (Keller, 2006). Diese kann zu fehlerhaften Durchflussmessungen und in Kombination mit mitgeführten Partikeln zur Zerstörung von Hauswasserzählern führen (Totsuka u. a., 2004; McIntosh, 2003). Eine Ermittlung der Wassermengenverteilung, Basis jeder Wasserverlustreduktion, wird dadurch erheblich erschwert (s. auch Kap. 4.3.4).

Hohe Wasserverluste sind also gleichzeitig eine der zentralen Ursachen (s.o.) und u.a. eine Auswirkung einer intermittierenden Betriebsweise. Verstärkt wird die Problematik durch die bei intermittierender gegenüber kontinuierlicher Versorgung höhere Wasserverschwendung (Totsuka u. a., 2004; Bradley u. a., 2002; Kumar, 1998). Diese ist im Wesentlichen eine Folge der großen in kurzer Zeit bereitgestellten Wassermenge. Hausbehälter laufen während der Beschickung über, oder werden vor der Beschickung entleert um Raum für frisches Wasser zu schaffen (McIntosh, 2003; Chowdhury u. a., 2002; Bradley u. a., 2002). In Béni Abbès gaben bei einer Umfrage der AHT (2005) 76 % der befragten Haushalte an, Wasser durch eine bessere Bewirtschaftung der privaten Behälter sparen zu können, was ein Hinweis auf die Wasserverschwendung in diesem Zusammenhang ist (s. Kap. 4.2.4 und 5.6).

Niedrige Leitungsdrücke oder gar Unterdrücke ermöglichen den Eintrag von Partikeln und Grundwasser durch Leckagen in das Leitungsnetz. Die Verunreinigung des Wassers ist die unweigerliche Folge wie Untersuchungen von Lee und Schwab (2005), Gadgil (1998), Totsuka u. a. (2004) sowie Andey und Kelkar (2007) zeigen. Besonders gravierend sind die Folgen, wenn parallel zu den Trinkwasserleitungen defekte Abwasserkanäle verlaufen, wie Andey und Kelkar (2007) feststellen. Der Sachverhalt trifft auch auf die Situation in Béni Abbès zu (s. Kap. 4.3.4). Vairavamoorthy u. a. (2007a) und Vairavamoorthy u. a. (2007c) beschreiben einen Ansatz zur Analyse des Risikos der Verschmutzung durch Schmutzeintrag in das Leitungsnetz.

#### 4.5.4.4 Zusammenfassung der Mängel in der Betriebsweise und Versorgung

Zusammenfassend führt der intermittierende Betrieb im technischen Bereich der Wasserverteilung zu einer eingeschränkten Rohrnetzabgabe und zu Versorgungsengpässen (s. Kap. 4.5.1). Stagnationszonen und zu niedrige Drücke im Leitungsnetz sowie die private Zwischenspeicherung führen zu Wasserqualitätsproblemen. Damit können die grundlegenden Anforderungen an die bereitgestellte Menge, die Wasserqualität und die gerechte Verteilung der Wasserressourcen nicht oder nur teilweise erfüllt werden.

Abbildung 4.13 zeigt schematisch die Zusammenhänge der dem Bereich der Betriebsweise zuzuordnenden Mängel. Ursächlich für die Mängel in der Betriebsweise sind hauptsächlich Mängel in der Datenhaltung sowie im Systemkonzept und der Netzplanung (s. Kap. 4.5.2 und Abb. 4.11) sowie Kap. 4.5.3 und Abb. 4.12). Die Schnittstellen zu diesen Betrachtungsbereichen sind in der Abbildung angedeutet.

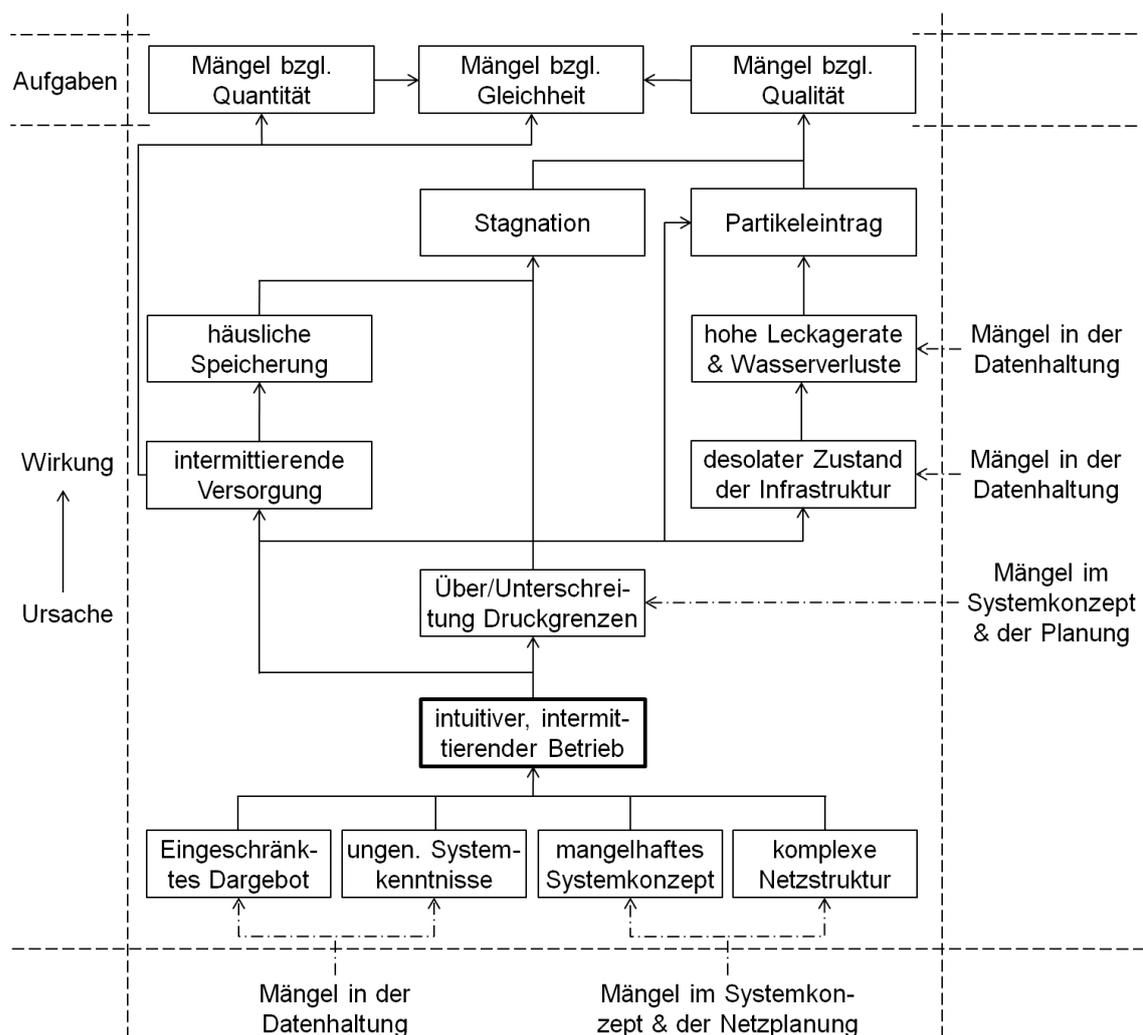


Abbildung 4.13: Wirkungsketten der Mängel in der Betriebs- und Versorgungsweise

# 5 Einführung einer kontinuierlichen Betriebsweise

## 5.1 Zielsetzung und Überblick

Wie in Kapitel 4 aufgezeigt wird, kann mit einer intuitiven, intermittierenden Betriebsweise als Reaktion auf innere und äußere Zwänge ein ursprünglich für eine kontinuierliche Versorgung ausgelegtes Wasserverteilungsnetz nicht nachhaltig betrieben werden. Die negativen Auswirkungen einer intermittierenden Betriebsweise sind vielfältig (s. auch Tab. 1.2):

- Ungenügende Wasserqualität
- Verkürzte Lebensdauer der Systemelemente
- Energieineffizienter technischer Betrieb
- Hohe Wasserverluste und Wasserverschwendung
- Verminderte Rohrnetzabgabe
- Ungerechte Wasserverteilung
- Intermittierende Versorgung
- Notwendigkeit der privaten Zwischenspeicherung
- Zahlungsunwilligkeit
- Wasserdiebstahl

Werden die Betrachtungen auf zentrale, ursprünglich für eine kontinuierliche Betriebsweise konzipierte Verteilungssysteme beschränkt, sind zwei prinzipielle Verbesserungsansätze denkbar (Totsuka u. a., 2004): Die intermittierende Betriebsweise wird optimiert oder eine kontinuierliche Betriebsweise wird eingeführt.

Mit der ersten Option beschäftigen sich einige Autoren. Totsuka u. a. (2004) und Vairavamorthy u. a. (2001) analysieren die Problematik und empfehlen Verbesserungsmaßnahmen für einen funktionierenden intermittierenden Betrieb. Dabei behandeln sie auch die Frage, wie ein System konzipiert und ausgelegt sein muss, um intermittierend betrieben werden zu können. Aus den Untersuchungen resultieren Planungsrichtlinien für Systeme mit intermittierender Betriebsweise und angepasste Planungswerkzeuge (Vairavamorthy u. a., 2008, 2007b). Gleichwohl stellen die Lösungsansätze keine wirkliche und dauerhafte Alternative zur kontinuierlichen Betriebsweise dar und sind daher immer im Sinne einer Soforthilfemaßnahme oder Übergangslösung zu sehen (Totsuka u. a., 2004; Myers, 2003; Kumar, 1998).

Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die kontinuierliche Betriebsweise mit den im Folgenden zusammengefassten Vorteilen notwendige Voraussetzung für einen nach-

haltigen Betrieb ist und daher immer angestrebt werden sollte (McIntosh, 2003; Myers, 2003; Kumar, 1998):

- Bereitstellung von Wasser mit adäquater Qualität
- Einhaltung der Druckgrenzen
- Gerechte Wasserverteilung
- Kontinuierliche Versorgung
- Möglichkeit des Einsatzes von Wasserzählern
- Längere Lebensdauer der Infrastruktur
- Geringere Dimensionen der Systemkomponenten
- Möglichkeit der Leckageortung
- Geringere Wasserverluste
- Höhere Rohrnetzabgabe
- Möglichkeit des Einsatzes von Verbrauchsmanagementmethoden
- Kosteneffizienter Betrieb
- Kundenzufriedenheit

Die Ursachen der intuitiven und intermittierenden Betriebsweise sind, wie in Kapitel 4 dargestellt, vielschichtig miteinander verknüpft. Zur Verbesserung der Situation genügt es daher nicht einzelne Ursachen zu bekämpfen. Zur Durchbrechung des Kreislaufs aus sich bedingenden Mängeln, die letztlich in der intermittierenden Betriebsweise münden, sind ganzheitliche Lösungsansätze notwendig.

Dieses Kapitel beschreibt ein Konzept zur Überführung intuitiv und intermittierend betriebener Verteilungsnetze hin zu einer kontinuierlichen Betriebsweise, das die relevanten Ursachen und deren Abhängigkeiten berücksichtigt. Die Voraussetzungen für einen nachhaltigen Betrieb und damit die Zielsetzung des Ansatzes sind mit dem Stand der Technik in Kapitel 2 beschrieben. Die Aufgaben ergeben sich aus der Überwindung der in Kapitel 4.5 dargestellten typischen Mängel.

Die Betrachtungen beziehen sich dabei auf zentrale Wasserverteilungssysteme, die ursprünglich, wie in Kapitel 2.5.2 dargestellt, für eine kontinuierliche Betriebsweise konzipiert wurden. Des Weiteren sind die Betrachtungen auf den technischen Bereich beschränkt. D.h. institutionelle, finanzielle und soziale Aspekte sind nicht explizit Gegenstand der Betrachtungen, werden aber ggf. in die Darstellung mit einbezogen. Das Konzept wurde für den konkreten Anwendungsfall in Béni Abbès entwickelt und ist hier in verallgemeinerter Form dargestellt (s. Kap. 1, 4.2 und 4.3). Ggf. sind die Erkenntnisse aus dem Fallbeispiel angeführt oder es wird auf diese verwiesen.

Zunächst wird in Kapitel 5.2 die Aufgabenstellung abgegrenzt, die Machbarkeit einer kontinuierlichen Versorgung analysiert, bekannte Ansätze diskutiert und schließlich der darauf aufbauende Ansatz des Konzepts umrissen. In den darauf folgenden Kapiteln 5.3, 5.4, 5.5 und 5.8 wird das Konzept entsprechend der einzelnen Umsetzungsschritte näher erläutert. Dabei wird immer wieder das Fallbeispiel Béni Abbès angeführt. Abschließend werden Aspekte der Kosten und Finanzierung diskutiert (s. Kap. 5.9).

## 5.2 Ansatz

### 5.2.1 Aufgabenstellung

Ein kontinuierlicher Betrieb setzt die Einhaltung eines relativ hohen technischen Niveaus in allen Bereichen der Wasserversorgung voraus. Durch die Aufrechterhaltung eines bestimmten Versorgungsdrucks und die Minimierung der Wasserverluste wird die kontinuierliche und damit gerechte Wasserverteilung im gesamten Netz ermöglicht. Entscheidend für die Einhaltung von Druckgrenzwerten sind neben der kontinuierlichen Betriebsweise ein adäquates Systemkonzept und die entsprechende Dimensionierung der einzelnen Systemkomponenten. Des Weiteren muss die Infrastruktur in einem funktionstüchtigen Zustand sein. Folglich ist eine operative Instandhaltung Voraussetzung. Letztendlich entscheiden die Akzeptanz der Abnehmer und damit ihr Verbrauchsverhalten über das Funktionieren der kontinuierlichen Wasserverteilung.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass sowohl die Konzeption und Auslegung des Verteilungssystems sowie der technische Betrieb entsprechend der anerkannten Regeln der Technik Voraussetzung für eine nachhaltige Wasserverteilung sind (s. Kap. 2.4 und 2.5).

Das hier dargestellte Konzept bietet einen Ansatz für bestehende Systeme, die weder ein angepasstes Systemkonzept aufweisen noch kontinuierlich betrieben werden. Der Fokus liegt auf den planerisch und umsetzungstechnisch komplexen Vorgängen der Datenhaltung, Umstrukturierung und Änderung der Betriebsweise.

### 5.2.2 Theoretische Machbarkeit

#### 5.2.2.1 Gegenüberstellung von Rohrnetzeinspeisung und Wasserverbrauch

Eine kontinuierliche Wasserversorgung über ein zentrales Verteilungssystem ist theoretisch immer machbar, wenn die mögliche Rohrnetzeinspeisung  $Q_N$  genügt, um den Verbrauch  $Q$  zu decken, d.h. wenn keine absolute Wasserknappheit herrscht (s. Kap. 4.5.4).

Allerdings wird der tatsächlich nutzbare Anteil der Rohrnetzeinspeisung  $Q_N$  um die Wasserverluste  $Q_V$  und die Wasserverschwendung  $Q_{VS}$ <sup>1</sup> bei der Verteilung und beim Verbraucher gemindert. Genügt die tatsächlich nutzbare Wassermenge  $Q_N - Q_V - Q_{VS}$  nicht um den Verbrauch zu decken, wird von der technisch-ökonomischen Wasserknappheit gesprochen. Variablen in dieser Betrachtung sind der Wasserverbrauch  $Q$ , die Wasserverluste  $Q_V$  und die Wasserverschwendung  $Q_{VS}$ .

Demnach ist eine kontinuierliche Versorgung möglich, wenn unter Berücksichtigung der möglichen Minimierung von Wasserverlusten, Wasserverschwendung und

---

<sup>1</sup>Aus planerischer Sicht ist die Wasserverschwendung Teil des Wasserverbrauchs bzw. des Wasserbedarfs (s. auch Kap.2.4.4.2). Für die hier thematisierte Machbarkeit wird es aber als sinnvoll erachtet, den tatsächlichen Verbrauch und die Verschwendung getrennt zu betrachten.

Wasserverbrauch der tatsächlich nutzbare Anteil der Rohrnetzeinspeisung dem Verbrauch mindestens entspricht:

$$Q_N - Q_V - Q_{VS} \stackrel{!}{\geq} Q \quad (5.1)$$

Die praktische Machbarkeit lässt sich am besten anhand von Pilotversuchen und Umfragen analysieren. Auf Pilotversuche wird näher in Kapitel 5.4 eingegangen. Umfragen unter den Verbrauchern werden in Kapitel 5.6 thematisiert.

### 5.2.2.2 Einflussgrößen

In einer Machbarkeitsanalyse ist das zukünftige Szenario der kontinuierlichen Versorgung zu betrachten. Dabei muss das sich verändernde Verbraucherverhalten bzgl. des tatsächlichen Verbrauchs und der Wasserverschwendung berücksichtigt werden. Dies lässt sich meist nur in Pilotversuchen ermitteln (s. Kap. 5.4). Im Falle limitierter Wasserressourcen verdeutlicht der Zusammenhang aus Gleichung 5.1 die potentiellen Angriffspunkte Wasserverbrauch, Wasserverluste und Wasserverschwendung zur Ermöglichung einer kontinuierlichen Versorgung:

**Wasserverluste:** Die Reduktion der Wasserverluste sollte aus versorgungstechnischen, ökologischen und ökonomischen Gründen immer ein Ziel des Wasserversorgers sein. Allerdings können Wasserverluste nicht vollständig vermieden werden (s. Kap. 2.5.4). Das systemspezifische theoretische Potential der Wasserverlustreduktion kann über den in Gleichung 2.24 angegebenen *ILI* ermittelt werden. Aus rein ökonomischer Sicht ist die Wasserverlustreduktion nur bis zu einem bestimmten systemspezifischen Wert, dem *ELL*, wirtschaftlich rentabel (s. Kap. 2.5.4.4). Allerdings sollten im Hinblick auf die Machbarkeit einer kontinuierlichen Versorgung das Reduktionspotential nicht alleine entsprechend der Rentabilität ermittelt werden. Ökologische und vor allem versorgungstechnische Aspekte sind mit einzubeziehen.

Dem Wasserversorger stehen verschiedene Methoden zur Ermittlung und Reduktion der Wasserverluste zur Verfügung (s. Kap. 2.5.4). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Leckageortung, der Einsatz von Zählern sowie die Kontrolle des Wasserdiebstahls nur in kontinuierlich betriebenen Netzen effektiv umsetzbar ist (s. Kap. 4.5.4). Erst die Einführung einer kontinuierlichen Betriebsweise ermöglicht also die effiziente Reduktion der Wasserverluste. Zudem führt die Umstellung auf kontinuierliche Wasserversorgung und die damit verbesserte Versorgungssituation und Hausanschlussrate zu einem Rückgang des Wasserdiebstahls. Erfahrungsgemäß stehlen Verbraucher eher gezwungenermaßen Wasser und wären bereit für das legale Beziehen von Wasser zu bezahlen (Chea, 2007; Myers, 2003).

**Wasserverschwendung:** Wasserverschwendung findet im Verantwortungsbereich des Verbrauchers, also nach dem Hauswasserzähler bzw. dem Übergabepunkt (falls keine Zähler vorhanden), statt. Häufige Arten der Wasserverschwendung sind defekte Hausinstallationen, laufende Toilettenspülungen, undichte oder fahrlässig of-

fen gelassene Wasserhähne und bei intermittierender Versorgung das Entleeren der Hausbehälter um Raum für frisches Wasser zu schaffen (s. Kap. 4.5.4).

Mit der Umstellung von intermittierender zu kontinuierlicher Versorgung ist daher mit einem Rückgang der Wasserverschwendung durch die Bewirtschaftung der Hausbehälter zu rechnen (Andey und Kelkar, 2007; McIntosh, 2003; Bradley u. a., 2002). Neben der Betriebsweise stehen dem Versorger zur Minderung der Wasserverschwendung verschiedene, im nächsten Abschnitt näher beschriebene Methoden des Verbrauchsmanagements, wie z.B. die Tarifgestaltung und Aufklärungskampagnen, zur Verfügung.

**Wasserverbrauch:** Zentrale Wasserverteilungssysteme wurden bisher fast ausschließlich nach einem versorgungsorientierten Prinzip konzipiert und betrieben. Dabei wird den Verbrauchern die Menge bereit gestellt, die die Verbraucher konsumieren wollen. Dieses Prinzip der Überversorgung setzt die Möglichkeit einer beliebigen Erhöhung des Dargebots voraus. Sind die Wasserressourcen limitiert und für den vorhandenen Bedarf nicht ausreichend, muss für eine funktionierende kontinuierliche Wasserverteilung das versorgungsorientierte Prinzip durch eine verbrauchsorientierte Strategie ersetzt werden.

Das verbrauchsorientierte Prinzip zeichnet die aktive Einflussnahme des Versorgers auf die Größe des Verbrauchs aus. Unter dem Begriff Verbrauchsmanagement werden verschiedene Methoden und Techniken zur effizienteren Nutzung limitierter Wasserressourcen zusammengefasst (Vairavamoorthy u. a., 2008; Butler und Memon, 2006; Nouh, 2005). Die im Kontext der Machbarkeit einer kontinuierlichen Versorgung wichtigen Methoden zur Reduktion des tatsächlichen Verbrauchs sind vor allem umfassende Verbrauchsmessungen, eine angepasste Wassertarifgestaltung, das Nachrüsten wassersparender Hausinstallationen, die Nutzung von aufbereiteten Abwässern sowie Sensibilisierungs- und Ausbildungsmaßnahmen.

### 5.2.2.3 Theoretische Machbarkeit in Béni Abbès

In Béni Abbès ist eine mögliche Erhöhung der Wasserproduktion fraglich. Zur Diskussion der theoretischen Machbarkeit einer kontinuierlichen Wasserversorgung in Béni Abbès wird deshalb im Folgenden von einem limitierten Wasserdargebot ausgegangen, das möglichen einwohnerbezogenen Bedarfswerten gegenübergestellt wird. Die praktische Machbarkeit wird in Kapitel 5.4.3 analysiert.

In Béni Abbès werden von den Betreibern sowie vom Kooperationsprojekt als Ziel ca. 25 % Wasserverluste angestrebt. Dieser Zielsetzung stehen momentan ca. 38 % reale Wasserverluste gegenüber (s. Tab. 5.4). Zur Überprüfung, ob die Zielsetzung realistisch ist, können die nicht vermeidbaren realen Wasserverluste  $U_{ARL} [l/d]$  in Béni Abbès mit dem in Kapitel 2.5.4.4 dargestellten Ansatz ermittelt werden:

Die Länge des Verteilungsnetzes  $L_N$  beträgt ca. 62,3 km (s. Tab. 4.4). Die Zahl der Hausanschlüsse  $N_{HA}$  liegt zukünftig bei ca. 2.760 (s. Kap. 5.5.4.3). Die Länge der Hausanschlüsse wird auf durchschnittlich 10 m geschätzt. Daraus ergibt sich eine Gesamtlänge  $L_{HA}$  von ca. 27,6 km. Der durchschnittliche zukünftige Betriebsdruck

$OP_m$  kann entsprechend der Potentialniveaus der geplanten Druckzonen mit ca. 25 m angenommen werden (s. Tab. 5.5). Daraus ergibt sich gemäß Gleichung 2.23 folgender Wert für  $U_{ARL}$ :

$$\begin{aligned} U_{ARL} &= (18 \cdot L_N + 0,8 \cdot N_{HA} + 25 \cdot L_{HA}) \cdot OP_m \\ U_{ARL} &= (18 \cdot 62,3 + 0,8 \cdot 2.760 + 25 \cdot 27,6) \cdot 25 \\ U_{ARL} &= 100485 \text{ l/d} = 1,2 \text{ l/s} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Ein  $U_{ARL}$  von ca. 1,2 l/s entspricht bei einer Rohrnetzeinspeisung  $Q_N$  von ca. 24,0 - 29,0 l/s ca. 4 - 5 % der Einspeisung (s. Tab. 4.2). Die momentanen realen Wasserverluste  $Q_{VR}$  bzw.  $C_{ARL}$  von 38 % entsprechen ca. 7,2 - 11,0 l/s. Demnach ist theoretisch eine Reduktion der realen Wasserverluste von ca. 38 % auf ca. 4 - 5 % möglich. Das theoretische Reduktionspotential  $ILI$  kann nach Gleichung 2.24 wie folgt angegeben werden:

$$\begin{aligned} ILI &= \frac{C_{ARL}}{U_{ARL}} \\ ILI &= \frac{7,2 \text{ l/s}}{1,2 \text{ l/s}} = 6,0 \\ ILI &= \frac{11,0 \text{ l/s}}{1,2 \text{ l/s}} = 9,1 \end{aligned} \quad (5.3)$$

Allerdings sind die Parameter der Berechnung mit Ungenauigkeiten behaftet. Z.B. ist die Abgrenzung von Versorgungs- und Hausanschlussleitungen in Béni Abbès und somit die Ermittlung des Parameters  $L_{HA}$  schwierig. Die berechneten  $U_{ARL}$  stellen daher einen groben Anhaltswert dar. Dennoch erscheint eine Senkung der Wasserverluste  $Q_V$  auf ca. 25 % in Anbetracht des Potentials der Senkung der realen Wasserverluste  $Q_{VR}$  durchaus realisierbar. Die Parameter und die berechneten Werte der Betrachtung sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Bei einer möglichen Rohrnetzeinspeisung  $Q_N$  von ca. 24,0 - 29,0 l/s entsprechen 25 % Wasserverluste ca. 6,0 - 7,3 l/s. Die mögliche Rohrnetzabgabe  $Q_A$  ergibt sich zu ca. 18,0 - 21,8 l/s. Davon werden ca. 2,5 l/s von administrativen und kommerziellen Verbrauchern benötigt (Klingel u. a., 2008). Bei einer aktuellen Bevölkerung von ca. 13.740 Einwohnern (s. Tab. 4.1) kann demnach ein einwohnerbezogener Verbrauch von ca. 97 - 121 l/E/d ermöglicht werden. Im Jahr 2025 stehen den prognostizierten ca. 16.610 Einwohnern noch ca. 81 - 100 l/E/d zur Verfügung (s. Kap. 4.2.2). Tabelle 5.2 fasst die Berechnung zusammen.

Tabelle 5.3 zeigt den theoretisch möglichen mittleren einwohnerbezogenen Tagesbedarf  $q_{dm}$  für verschiedene Jahre und Bevölkerungszahlen bei unterschiedlichen Wasserverlusten und einer Rohrnetzeinspeisung von 24,0 - 29,0 l/s (s. Tab. 4.1). Die Werte sind analog zu Tabelle 5.2 berechnet.

Die WHO gibt als Richtwert für die mittelfristige Wasserbereitstellung 70 l/E/d an (Reed, 2005). Diese Menge berücksichtigt den Bedarf für Trinken, Kochen, Waschen, Raumpflege, private Nahrungsproduktion und Abwasserentsorgung. Die möglichen Tagesbedarfswerte im Fallbeispiel Béni Abbès bei verschiedenen Annahmen für die Wasserverluste genügen alle dem empfohlenen Richtwert (s. Tab. 5.3).

Tabelle 5.1: Ermittlung des theoretischen Reduktionspotentials der realen Wasserverluste  $ILLI$ 

Größe	Wert	Ansatz
Länge Verteilungsnetz $L_N$	ca. 62,3 km	s. Tab. 4.4
Anzahl Hausanschlüsse $N_{HA}$	ca. 2.760	s. Kap. 4.2.4
Länge Hausanschlussleitungen $L_{HA}$	ca. 27,6 km	Schätzung
Mittlerer Betriebsdruck $OP_m$	ca. 25 m	s. Tab. 5.5
Rohrnetzeinspeisung $Q_N$	ca. 24,0 - 29,0 l/s	s. Tab. 4.2
Momentane reale Wasserverluste $CARL$	ca. 38 %	s. Tab. 5.4
	ca. 7,2 - 11,0 l/s	
Unvermeidbare reale Wasserverluste $UARL$	ca. 1,2 l/s	s. Gl. 5.2
	ca. 4 - 5 %	
Theoretisches Reduktionspotential $ILLI$	ca. 6,0 - 9,1	s. Gl. 5.3

Tabelle 5.2: Ermittlung des theoretisch möglichen mittleren einwohnerbezogenen Tagesbedarfs  $q_{dm}$ 

Größe	Wert	Ansatz
Rohrnetzeinspeisung $Q_N$	ca. 24,0 - 29,0 l/s	s. Tab. 4.2
Wasserverluste $Q_V$	ca. 25 %	s. Gl. 5.2
	ca. 6,0 - 7,3 l/s	$= Q_N \cdot Q_V$
Mögliche Rohrnetzabgabe $Q_A$	ca. 18,0 - 21,8 l/s	$= Q_N - Q_V$
Admin. & kommerz. Bedarf $Q_{adm}$	ca. 2,5 l/s	Klingel u. a. (2008)
Einwohner 2010 $E_{2010}$	ca. 13.740 E	s. Tab. 4.1
Einwohner 2025 $E_{2025}$	ca. 16.610 E	s. Tab. 4.1
Einwohnerbez. Bedarf 2010 $q_{dm2010}$	ca. 97 - 121 l/E/d	$= (Q_A - Q_{adm})/E_{2010}$
Einwohnerbez. Bedarf 2025 $q_{dm2025}$	ca. 81 - 100 l/E/d	$= (Q_A - Q_{adm})/E_{2025}$

Tabelle 5.3: Theoretisch möglicher mittlerer einwohnerbezogener Tagesbedarf  $q_{dm}$  bei  $Q_N = 24,0 - 29,0$  l/s

Jahr	Einwohner	$q_{dm}, Q_V=20\%$	$q_{dm}, Q_V=25\%$	$q_{dm}, Q_V=30\%$
[-]	[E]	[l/E/d]	[l/E/d]	[l/E/d]
2010	13.740	105 - 130	97 - 121	82 - 103
2015	14.765	98 - 121	91 - 113	77 - 96
2020	15.743	92 - 114	85 - 106	72 - 90
2025	16.611	81 - 108	81 - 100	68 - 85

### 5.2.3 Bekannte Ansätze

Die Problematik der intermittierenden Versorgung wird von einigen Autoren behandelt (s. Kap. 4.5.4). Allerdings beschränken sich die bekannten Studien weitgehend auf die Analyse der Ursachen und Auswirkungen einer intermittierenden Betriebsweise. Über die Einführung einer kontinuierlichen Betriebsweise sind nur wenige Ansätze und Fallstudien aus der Literatur bekannt.

McIntosh (2003) empfiehlt allgemein die von einer Zone ausgehende, allmähliche Einführung einer kontinuierlichen Versorgung. In Zonen mit kontinuierlicher Versorgung sollten alle Hausanschlüsse mit Zählern ausgerüstet sein. Illegale Anschlüsse sind zu entfernen. Über den Wasserpreis kann dann der Verbrauch beeinflusst werden. Das Messen der Rohrnetzeinspeisung in die Zonen ermöglicht die Leckagekontrolle und Reduktion der Wasserverluste. McIntosh unterstreicht, dass der Kern eines möglichen Erfolgs in der Betriebsführung und der Tarifgestaltung liegt. Außerdem ist die Akzeptanz aller Akteure über Sensibilisierungskampagnen zu schaffen.

Eine Expertengruppe um Myers (2003) konkretisieren die Idee der schrittweisen Einführung der kontinuierlichen Versorgung in einer vierstufigen Vorgehensweise.

1. Umstellungsplanung
2. Pilotbetrieb
3. Überarbeitung der Planung
4. Umsetzung der Planung

Im ersten Schritt werden umfassende Datenerhebungen (System-, Kunden- und Betriebsdaten) durchgeführt und Bedarfsprognosen erstellt. Die Definition des Versorgungsgrads stellt die Basis für die Umstrukturierung in Zonen und DMAs dar, die mit Hilfe eines hydraulischen Modells geplant wird (s. Kap. 2.5.4). Aufbauend auf einer Kostenschätzung und den Finanzierungsmöglichkeiten wird eine Umstellungsplanung erstellt. Außerdem sind Aufklärungskampagnen und Fortbildungsmaßnahmen durchzuführen. Der zweite Schritt dient der Erhebung von Betriebsdaten und des Verbraucherverhaltens in einer Pilotzone, in der die kontinuierliche Versorgung und eine volumenabhängige Abrechnung für mindestens 12 Monate eingeführt wird. Basierend auf den Erkenntnissen der Pilotphase wird die im ersten Schritt entwickelte Planung im dritten Schritt überarbeitet, bevor sie im vierten Schritt umgesetzt wird.

Die gleiche Expertengruppe untersuchte zudem die theoretische Machbarkeit einer kontinuierlichen Versorgung in den drei indischen Städten Delhi, Indore und Guwahati (s. Kap. 5.2.2). Unter Berücksichtigung der möglichen Reduktionen der Wasserverluste und des Wasserverbrauchs konnte die theoretische Machbarkeit für diese Städte nachgewiesen werden.

Andey und Kelkar (2007) analysieren und vergleichen den intermittierenden und kontinuierlichen Betrieb jeweils einer 100 bis 500 Hausanschlüsse bzw. 1.000 bis 4.000 Einwohner umfassenden Pilotzone der indischen Städten Ghaziabad, Jaipur, Nagpur und Panaji. Da der Testbetrieb sich jeweils nur auf eine kleine Zone beschränkt, geben sie keine dezidierte Vorgehensweise zur Einführung der kontinuierli-

chen Versorgung an. Für eine erfolgreiche Einführung wird jedoch auf die Bedeutung folgender Punkte bei der Vorbereitung einer Zone hingewiesen:

- Die Zone sollte für das Verteilungsnetz möglichst repräsentativ sein.
- Die Zone muss hydraulisch unabhängig sein.
- Die Zoneneinspeisung ist mit Großwasserzählern zu messen.
- Alle Hausanschlüsse müssen mit Hauswasserzählern ausgerüstet sein.
- Die Kenntnisse über Lage und Zustand der Leitungen und Armaturen sind zu prüfen und zu vervollständigen.

Ermittelt und verglichen werden in der Studie der einwohnerbezogene Verbrauch (Ablesungen der Hauswasserzähler), die Wasserqualität im Netz (Probenahmen), der Versorgungsdruck (Messungen), die Einspeisung und Spitzenfaktoren (Messungen), Wasserverluste (Ablesungen der Groß- und Hauswasserzähler) und die Kundenzufriedenheit (Umfrage). Die Ergebnisse zeigen für die kontinuierliche Versorgung eine Zunahme des Verbrauchs (10 - 30 %). Die Ursache ist laut der Autoren der limitierten Versorgung bei intermittierendem Betrieb zuzuordnen. Bei kontinuierlicher Versorgung waren die Spitzenfaktoren deutlich kleiner und die Wasserqualität erheblich verbessert (s. auch Kap. 4.5.4).

Die Machbarkeit der praktischen Umsetzung belegt die Fallstudie der kambodschanischen Hauptstadt Pnomh Penh (Chea, 2007; Myers, 2003). Zwischen 1993 und 2005 wurde eine kontinuierliche Versorgung im gesamten Netz eingeführt. Dazu wurden zunächst alle Anschlüsse erhoben, mit Zählern ausgestattet und ein Abrechnungs- und Kontrollsystem eingeführt. Dadurch stieg der Anteil an mit Zählern ausgerüsteten Haushalten von 12 % auf 100 %, während die Zahl der entdeckten illegalen Anschlüsse von über 300 pro Jahr auf unter 10 pro Jahr zurück ging. Maßnahmen gegen Wasserverluste senkten die nicht in Rechnung gestellte Wasserabgabe  $Q_{NR}$  von 72 % auf 10 %. Chea betont die Unabhängigkeit des Versorgungsunternehmens als Voraussetzung für Innovation und letztlich für die Einführung eines kostendeckenden Betriebs, der eine nachhaltige Versorgung erst ermöglicht.

Dahasahasra und Mulay (2008) stützten sich bei der Einführung einer kontinuierlichen Versorgung in der indischen Stadt Badlapur auf den von Myers empfohlenen Ansatz und beschreiben detailliert den Einsatz eines hydraulischen Modells bei der Umstrukturierungsplanung.

#### **5.2.4 Konzept zur Einführung einer kontinuierlichen Betriebsweise**

Der hier dargestellte Ansatz stützt sich zum einen auf die Erkenntnisse der im vorigen Kapitel dargestellten bekannten Ansätze und zum anderen auf die Erfahrungen aus dem Fallbeispiel Béni Abbès. Die lokalen Gegebenheiten in Béni Abbès verdeutlichen die Notwendigkeit eines in Bezug auf die Planung und die Umsetzung anpassbaren und zeitlich möglichst flexiblen Ansatzes. Von Bedeutung sind in diesem Zusammenhang insbesondere die meist ungenügende verfügbare Datenbasis und der Aufwand für deren Aktualisierung, die Möglichkeiten der Finanzierung

und Umsetzung von Baumaßnahmen sowie die wenig verlässlichen institutionellen Rahmenbedingungen (s. auch Kap. 4.2 und 4.5.4).

Als Lösungsansatz wird ein Konzept vorgeschlagen, das die Umsetzung der drei Säulen Aufbau einer Datenhaltung, Einführung einer angepassten Netzstruktur und Einführung einer kontinuierlichen Betriebsweise in einem Gesamtprozess aufeinander abstimmt. Der notwendigen Flexibilität wird Rechnung getragen, indem der Gesamtprozess auf Einzelschritte heruntergebrochen wird. In jedem Einzelschritt werden gezielt nur die für die jeweiligen Arbeiten notwendigen Daten erhoben. Das Informationsbild des Systems wird dadurch bedarfsgerecht aufgebaut. Das bestehende Verteilungssystem wird in ein Zubringer- und ein Versorgungsnetz mit Druckzonen und diskreten Sektoren umstrukturiert. Der Betrieb wird Sektor für Sektor umgestellt. Schwer abzuschätzende Planungsparameter und deren kleinräumliche Ausprägungen können in Sektoren mit kontinuierlicher Betriebsweise ermittelt und in eine Anpassung der Planung und Umsetzung eingebracht werden.

Einen Überblick über das Konzept zeigt Abbildung 5.1. Die schrittweise Umsetzung der Umstrukturierung und Umstellung der Betriebsweise ist in der Abbildung links schematisiert, während rechts der sukzessive Aufbau der Datenbasis dargestellt ist. Im Weiteren werden die Schritte in Bezug auf die Abbildung kurz umrissen. Eine ausführliche Darstellung findet sich in den folgenden Kapiteln.

**Aufbau eines Netzkatasters und hydraulischen Modells:** Zu Beginn werden ein Netzkataster und ein hydraulisches Modell mit den verfügbaren Daten aufgebaut. Die Daten werden im weiteren Prozessverlauf, wie in Abbildung 5.1 dargestellt, je nach Bedarf progressiv durch Erhebungen ergänzt und aktualisiert.

**Pilotversuch:** Ein Pilotversuch in einem hydraulisch getrennten Sektor (bzw. einer DMA) kann dazu dienen, den aktuellen und zukünftigen Wasserverbrauch sowie das Verbrauchsverhalten zu ermitteln. Zusätzlich können weitere Planungsparameter, wie z.B. die Wasserverluste, der Anschlussgrad, die Zahlungsbereitschaft und die Bereitschaft Wasser zu sparen, exemplarisch für das Gesamtnetz verifiziert werden.

**Planung der Umstrukturierung:** Für das Verteilungssystem ist eine Umstrukturierung in Druckzonen, bzw. im Falle von direkter Förderung in das Verteilungsnetz in so genannte hydraulisch unabhängige Betriebszonen, zu planen. Jede Zone wird möglichst aus einem Behälter versorgt. Die Behälter werden über ein übergeordnetes Zubringersystem beschickt. Es ist die Möglichkeit vorzusehen, die Zonen temporär in Sektoren zu unterteilen. Jeder Sektor sollte über eine separate Hauptleitung versorgt werden können. Die Betriebsweise wird sukzessive in den Sektoren umgestellt.

**Information und Sensibilisierung der Verbraucher:** Zur Schaffung eines Verständnisses der technischen Lösung und deren Akzeptanz durch die Verbraucher sind Informations- und Sensibilisierungsmaßnahmen durchzuführen. Die Sensibilisierung

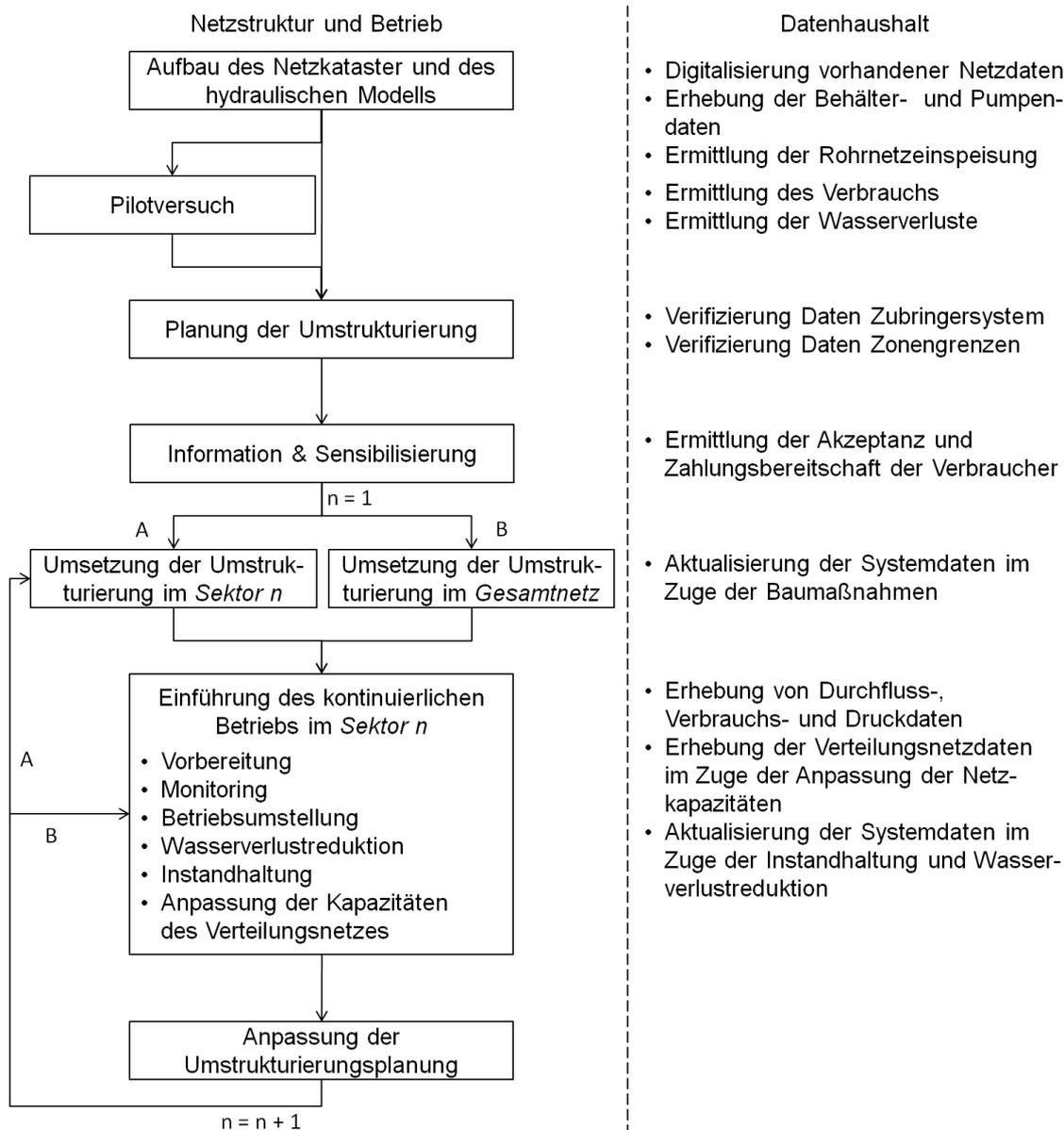


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung des Konzepts

kann je nach Art der Maßnahme zweckmäßig im gesamten Versorgungsgebiet oder prozessorientiert auf die Sektoren konzentriert durchgeführt werden.

**(Sukzessive) Umsetzung der Umstrukturierung:** Die Umstrukturierung kann für das gesamte Netz durchgeführt werden. Vorzugsweise sind die Maßnahmen innerhalb der geplanten Sektoren aber für die einzelnen Sektoren sukzessive vorzunehmen. Dadurch kann die Planung flexibel an Erkenntnisse aus Sektoren, die bereits kontinuierlich betrieben werden, angepasst werden. Der Betrieb im Netz sollte durch die Baumaßnahmen nicht beeinträchtigt werden.

**Sukzessive Einführung des kontinuierlichen Betriebs:** Die kontinuierliche Versorgung wird sukzessive in den Sektoren eingeführt. Im Vorfeld wird der jeweilige Sektor eingerichtet und ein Monitoring aufgebaut (Druck, Durchfluss, Verbrauch). Nach der Einführung der kontinuierlichen Versorgung sind intensive Maßnahmen zur Wasserverlustreduktion durchzuführen. Ggf. sind in Bereichen mit Versorgungsengpässen die Leitungskapazitäten zu erhöhen. Hat sich der Betrieb eines Sektors stabilisiert, wird die kontinuierliche Versorgung auf einen benachbarten Sektor ausgeweitet.

**Anpassung der Umstrukturierungsplanung:** Die Monitoringdaten sowie die Erfahrungen aus bereits überführten Sektoren fließen ggf. in die Anpassung der ursprünglichen Umstrukturierungsplanung ein.

## 5.3 Datenhaltung und hydraulische Modellierung

### 5.3.1 Werkzeuge

Wie in Kapitel 2.5.5 dargelegt, spielt die Datenhaltung bei der Planung und beim Betrieb eine zentrale Rolle. Geographische Daten, Systemdaten, Betriebsdaten und Wasserverbrauchsdaten gehen als Parameter in die hydraulische Modellierung und in die Planung ein (s. Kap. 3.6). Sowohl die Planung der Umstrukturierung, für die ein hydraulisches Modell ein unerlässliches Werkzeug darstellt, als auch die Umstellung des Betriebs verlangen daher aktuelle Daten. Der Aufbau eines Netzkatasters und eines hydraulischen Modells stellt deshalb den ersten Schritt des Konzepts zur Einführung einer kontinuierlichen Betriebsweise dar. Kapitel 6 beschreibt ein Werkzeug, das die Anforderungen an ein Netzkataster und an ein hydraulisches Modell vereint und durch die Datenintegration Widersprüche und Redundanzen im Datenbestand verhindert. Zudem verfügt das Werkzeug über Applikationen, die die Modellierung, Analyse und Planung im gegebenen Kontext unterstützen. Für die notwendigen Datenerhebungen im Verlaufe der Implementierung des Konzepts und im späteren Betrieb beschreibt Kapitel 7 auf das Werkzeug abgestimmte standardisierte Arbeitsprozesse.

### 5.3.2 Prozessorientierte Erhebung der Systemdaten

Der Bedeutung der Datenhaltung stehen meist eine ungenügende Qualität und Quantität der verfügbaren Daten gegenüber, die Erhebungen zur Ergänzung und Aktualisierung des Datenbestands notwendig machen (s. Kap. 4.5.2 und 4.5.3). Die Verifizierung und Aktualisierung verfügbarer Daten sowie die Ergänzung des Datenbestands ist allerdings mit einem immensen Aufwand verbunden. Bestimmte Systemdaten, wie Behältergeometrien, Pumpencharakteristika, Schieber und überirdisch verlegte Leitungen, können auf Grund geringerer Genauigkeitsanforderungen

und der leichten Zugänglichkeit relativ einfach erhoben werden. Andere Systemdaten, wie die Höhen der Einspeisepunkte und erdverlegte Leitungen, sind auf Grund der verlangten Genauigkeit oder der schweren Zugänglichkeit nur mit größerem Aufwand zu erheben. Das Konzept ermöglicht eine zu den Planungs- und Umsetzungsaktivitäten zeitlich parallele, auf den Fortschritt angepasste Datenerhebung. Diese bedarfsorientierte Organisation der Datenerhebung ermöglicht eine zeitlich gestraffte Abwicklung des Konzepts. Die Datenerhebungen in den einzelnen Schritten des Konzepts sind in Abbildung 5.1 zusammengefasst und im Folgenden dargestellt.

**Aufbau der Datenbasis:** Mit den zu Projektbeginn verfügbaren Daten wird die Basis des Netzkatasters und des hydraulischen Modells erstellt. Auf Grund des Planungsansatzes ist die Genauigkeit der Netzdaten zunächst sekundär (s. Kap. 5.5). Lediglich die Behälter- und Pumpendaten sind wegen ihrer Bedeutung für die Planung von Druckzonen zu überprüfen bzw. zu erheben. Ebenso sind die aktuelle und die potentiell mögliche Rohrnetzeinspeisung zu ermitteln. Der zukünftige Verbrauch ist auf aktuelle Abrechnungen zu basieren, zu schätzen oder über eine Zielsetzung für das Verbrauchsmanagement festzulegen. Der aktuelle und zukünftige Verbrauch kann auch über einen Pilotversuch ermittelt werden (s. Kap. 5.4). Mit der Planung kann unmittelbar nach der Erhebung und Digitalisierung der genannten Daten begonnen werden.

**Verifizierung der für die Umstrukturierung relevanten Leitungsabschnitte:** Die Planung umfasst lediglich die Umstrukturierung des bestehenden Netzes in ein Zubringersystem und Versorgungsnetz mit Druckzonen und Sektoren. Dementsprechend beschränkt sich die Planung auf die Leitungsabschnitte (inkl. Schieber) des Zubringernetzes, der Zonen- und Sektorengrenzen sowie derjenigen Hauptleitungen, die die Sektoren versorgen. Diese Daten sind während oder nach der Planung zu verifizieren und die Planung ggf. iterativ zu überarbeiten.

**Verifizierung der Versorgungsnetze:** Die Daten des Versorgungsnetzes eines Sektors können vor der Umstellung der Betriebsweise umfassend oder nach der Umstellung bedarfsgerecht erhoben werden. Die hydraulische Leistungsfähigkeit des Versorgungsnetzes eines Sektors wird bei der Umstrukturierung nicht berücksichtigt und nach der Einführung der kontinuierlichen Betriebsweise nach Bedarf erhöht. Die Datenerhebung kann auf die dafür notwendigen Netzabschnitte beschränkt werden. Außerdem werden im Zuge der Wasserverlustreduktion und der Instandhaltung Maßnahmen am Netz durchgeführt, die zur sukzessiven Aktualisierung bzw. Ergänzung des Datenbestands genutzt werden können.

#### 5.3.3 Aufbau der Datenhaltung in Béni Abbès

In Béni Abbès wird das in Kapitel 6 beschriebene Werkzeug für die Datenhaltung, die Systemanalyse und die Umstrukturierungsplanung eingesetzt. Zunächst wurden

die verfügbaren Netzpläne digitalisiert (s. Kap. 4.3.4.3). Die Behältergeometrien wurden vor Ort ermittelt. Eine geodätische Vermessungskampagne lieferte die Koordinaten und Höhen wichtiger Bezugspunkte zur Ermittlung der Einspeisepotentiale der Behälter sowie der Lage des Verteilungsnetzes. Die Vermessungsdaten wurden außerdem als Grundlage für die Erstellung eines digitalen Geländemodells (DGM) genutzt. Über das DGM konnten wiederum den Knoten des hydraulischen Modells Koordinaten und Höhen zugewiesen werden. Aus georeferenzierten Satellitenbildern wurde ein Stadtplan digitalisiert. Über Ortsbegehungen wurden Großverbraucher (Moscheen, Schulen, Behörden, Krankenhaus, Industrie) identifiziert. Abbildung 4.3 zeigt das digitalisierte Verteilungsnetz, die Höhenlinien des DGM und den Stadtplan.

Im Zuge der Umstrukturierungsplanung wurden relevante Leitungsabschnitte vor Ort verifiziert und die Datenbasis aktualisiert. Weitere Erhebungen von Netzdaten fanden bei der Vorbereitung eines Pilotversuchs statt (s. nächstes Kap.). Die Daten eines Teils des Netzes wurden schließlich im Rahmen von Schulungen komplett verifiziert. Die Auswertung ist in Kapitel 4.3.4 dargestellt. Aufbauend auf den Schulungen wurde die Aktualisierung des Netzkatasters als Arbeitsprozess in die Organisation der Wasserversorgung integriert. Kapitel 7 geht näher auf den Prozess und die Umsetzung in Béni Abbès ein.

## 5.4 Pilotversuche

### 5.4.1 Zweck der Pilotversuche

Pilotversuche eignen sich zur Analyse der praktische Machbarkeit der kontinuierlichen Betriebsweise. Dazu können in einem Pilotversuch im Vorfeld der Umstrukturierung folgende schwer zu ermittelnde Planungsparameter erhoben werden:

- Wasserverbrauch bei intermittierender Versorgung
- Wasserverbrauch bei kontinuierlicher Versorgung
- Verbrauchsganglinie bei kontinuierlicher Versorgung
- Wasserverluste des bestehenden Netzes
- Verbraucherverhalten (Akzeptanz, Vertrauen, Wasserverschwendung)

Die Analyse der praktischen Machbarkeit kann insbesondere für die Überzeugung von Entscheidungsträgern von Bedeutung sein. Wird im Vorfeld auf einen Versuch verzichtet, dient der erste Sektor zur Ermittlung fehlender Parameter. Allerdings muss dann mit größeren Anpassungen der Planung gerechnet werden.

### 5.4.2 Charakteristik des Pilotsektors

Ein Pilotversuch kann in einem bestehenden Netzbereich, der sich hydraulisch isolieren und über eine eigene Hauptleitung versorgen lässt, durchgeführt werden. Der Netzbereich sollte repräsentativ für das gesamte Verteilungsnetz gewählt werden (Andey und Kelkar, 2007). Zweckmäßig wird dieser Netzbereich auch als Sektor in

der späteren Planung berücksichtigt (s. Abb. 5.2 und 5.6). Es muss gewährleistet sein, dass das Volumen und die Beschickung des versorgenden Behälters einen kontinuierlichen Betrieb des Sektors zulässt. Dabei ist auch eine mögliche intermittierende Versorgung anderer Netzbereiche aus dem gleichen Behälter zu berücksichtigen. Der Sektor ist mit den für ein Monitoring notwendigen Druck- und Durchflussmessern und Hauswasserzählern auszustatten (s. Kap. 5.8.2).

Werden von den Verbrauchern Hausbehälter benutzt, sind die Zuleitungen mitunter ständig offen, um keine Versorgungszeiten zu verpassen. Während des Pilotversuchs bzw. einer Übergangsphase können die Hausbehälter weiter genutzt werden, damit die Verbraucher nicht auf die durch die Behälter vermittelte Sicherheit verzichten müssen. Allerdings ist dafür Sorge zu tragen, dass die Zuleitungen mit Ventilen oder die Hausbehälter mit einem Bypass ausgerüstet werden (Myers, 2003). Dadurch können die Behälter immer gefüllt gehalten werden und es stellt sich ein zu einer Installation ohne Hausbehälter nahezu identisches Verbrauchsverhalten ein. Langfristig sind die Behälter aus hygienischen Gründen abzuschaffen.

Die Verbraucher im Pilotsektor sind vor der Umstellung der Betriebsweise umfassend über den Zweck sowie den Beginn und das Ende der Betriebsumstellung zu informieren. Außerdem sollte über Aufklärungsmaßnahmen übermäßigem Wasserverbrauch bzw. Wasserverschwendung vorgebeugt werden.

### 5.4.3 Pilotversuche in Béni Abbès

#### 5.4.3.1 Wahl des Pilotsektors

In Béni Abbès ist eine kontinuierliche Betriebsweise prinzipiell machbar (s. Kap. 5.2.2). Dennoch birgt ein übermäßiger Verbrauch auf Grund der limitierten Rohrnetzeinspeisung ein Risiko für eine kontinuierliche Betriebsweise. Die Pilotversuche in Béni Abbès hatten deshalb neben der Ermittlung der in Kapitel 5.4.1 genannten Parameter auch den praktischen Nachweis der Machbarkeit zum Ziel.

Als Pilotzone bot sich auf Grund der einfachen Umsetzbarkeit ein Netzbereich im Nordosten des Versorgungsgebiets an (s. Abb. 5.2). Der Sektor kann über das Schließen einer einzigen Hauptleitung hergestellt werden. Der Hochbehälter *WT3* versorgt dann ausschließlich den Pilotsektor. Die Beschickung des Hochbehälters kann aus dem Brunnen *Br3* oder dem Tiefbehälter *TB2* erfolgen. Das mittlere statische Druckniveau ist ca. 26 m. Außerdem sind in diesem Netzbereich die Leitungen meist oberflächennah verlegt und nur mit einer dünnen Erdschicht überdeckt. Die Leckagekontrolle und Leckagereparatur sowie die Kontrolle der Sektorgrenzen wird dadurch vereinfacht.

Der Sektor umfasst ca. 370 Wohneinheiten mit ca. 2.275 Einwohnern (Klingel u. a., 2008). Er liegt damit in der von Andey und Kelkar (2007) empfohlenen Größenordnung (s. Kap. 5.2.3). Großverbraucher existieren nicht im Pilotsektor. 41 Haushalte (ca. 11 %) wurden mit Hauswasserzählern ausgerüstet. Die Hausbehälter sind entweder mit Schwimmerventilen an der Zuleitung oder mit einem Bypass ausgerüstet.

Die Einwohner des Pilotsektors wurden über den Versuch und dessen Zweck in-

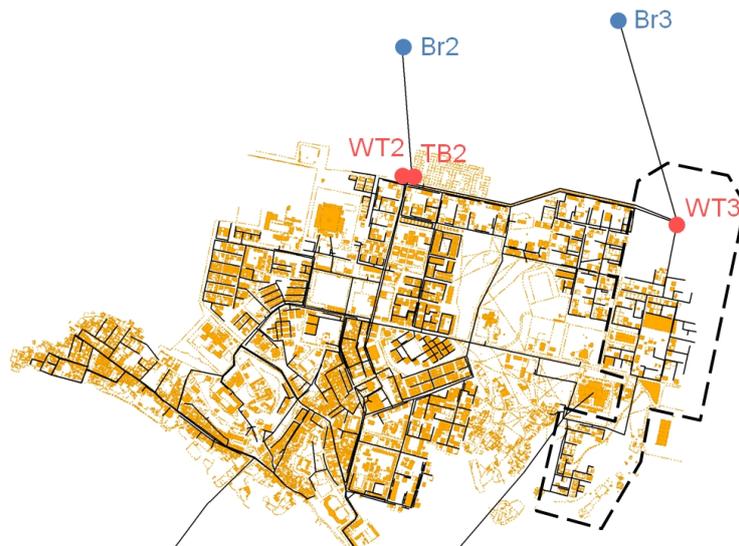


Abbildung 5.2: Pilotsektor

formiert. Es ist anzumerken, dass zum Zeitpunkt des Versuchs durch das bereits mehrere Jahre andauernde Kooperationsprojekt, in dem u.a. Informationskampagnen durchgeführt wurden, die Einwohner von Béni Abbès über eine relativ hohe Sensibilität gegenüber dem Thema Wasser verfügen. Auf die Thematik der Sensibilisierung wird näher in Kap. 5.6 eingegangen. Der Pilotsektor wurde in der späteren Umstrukturierungsplanung als einer von insgesamt zehn Sektoren übernommen (s. Kap. 5.5.4.2).

### 5.4.3.2 Ergebnisse

Die ursprünglich anvisierte Versuchslaufzeit von ca. acht Monaten konnte nicht wie geplant durchgeführt werden. Der Versuch wurde im November 2006 begonnen und Ende Januar 2007 von den lokalen Behörden auf Anordnung des Bürgermeisters in seiner Funktion als Vorstand des Betreibers APC eingestellt. Der Grund waren größere Leckagen, die nicht repariert wurden, woraus hohe Wasserverluste resultierten. Zudem konnte wegen einer defekten Pumpe am Brunnen *Br3* die Beschickung des Behälters *WT3* nicht aufrecht erhalten werden. Im April und Mai 2007 wurde der Versuch fortgesetzt. Die Ergebnisse sind in den Berichten von Pietschmann u. a. (2006) und Klingel u. a. (2007b) dargestellt sowie im Folgenden und in Tabelle 5.4 zusammengefasst.

Nach Einführung der kontinuierlichen Versorgung im November 2006 stieg die Rohrnetzeinspeisung am ersten Tag zunächst an. Dies ist u.a. sicherlich auf das Befüllen der Hausbehälter und der teilgefüllten Rohrleitungen zurückzuführen. Ab dem fünften Betriebstag war eine Stabilisierung der Rohrnetzeinspeisung zu verzeichnen. Demnach wurde im Falle eines existierenden Bypass der Bedarf direkt aus dem Netz gedeckt. Die mit Schwimmerschieber ausgerüsteten Behälter waren immer gefüllt.

Tabelle 5.4: Zusammenfassung der Ergebnisse der Pilotversuche

Größe	11 & 12/2006	04 & 05/2007
$Q_{Ni}$		ca. 129 m <sup>3</sup> /d
$Q_{Nk}$	ca. 131 m <sup>3</sup> /d	
$Q_{min}$	ca. 50 m <sup>3</sup> /d	
$Q_{VR}$	ca. 38 %	
$q_{dm}$	ca. 100 l/E/d	ca. 100 l/E/d

Dadurch wurde auch hier der Bedarf quasi direkt aus dem Netz gedeckt. Für die mittlere tägliche Rohrnetzeinspeisung  $Q_{Nk}$  wurde ein Wert von 131 m<sup>3</sup>/d ermittelt. Im zweiten Versuch stabilisierte sich die Rohrnetzeinspeisung bereits nach zwei Tagen.

Vor dem zweiten Versuch konnte bei intermittierender Betriebsweise eine Rohrnetzeinspeisung  $Q_{Ni}$  von ca. 129 m<sup>3</sup>/d ermittelt werden. Dies bedeutet einen nur unerheblichen Anstieg der Rohrnetzeinspeisung bei kontinuierlicher Versorgung.

Über das Messen der nächtlichen Rohrnetzeinspeisung (Zeit des minimalen Verbrauchs) wurde im ersten Versuch die minimale Zuflussmenge  $Q_{min}$  ermittelt. Unter der Annahme, dass die Restverbrauchsmenge  $Q_{Verbr}$  verschwindend gering ist, sind die realen Wasserverluste  $Q_{VR}$  gleich der minimalen Zuflussmenge  $Q_{min}$  (s. Kap. 2.5.4.2). Für  $Q_{min}$  wurden im Mittel und auf den Tag gerechnet ca. 50 m<sup>3</sup>/d gemessen. Das entspricht realen Wasserverlusten von 38 %. Allerdings umfasst dieser Wert auch reale Wasserverluste in den Haushalten nach den Hauswasserzählern.

Über die Ablesung der Hauswasserzähler wurde im ersten Versuch der mittlere einwohnerbezogene Tagesbedarf  $q_{dm}$  zu ca. 100 l/E/d bestimmt. Im zweiten Versuch betrug das Mittel aller Ablesungen ca. 150 l/E/d. Werden nur die Ablesungen ab dem dritten Tag nach Einführung der kontinuierlichen Versorgung berücksichtigt, ergibt sich ein  $q_{dm}$  von ebenfalls ca. 100 l/E/d. Vorausgesetzt die Wasserverluste werden wie in Kapitel 5.2.2.3 dargestellt reduziert, kann dieser Wert bei maximaler Ressourcenausbeute auch noch im Jahr 2025 gedeckt werden.

Eine Umfrage bei den Einwohnern des Pilotsektors ergab, dass die Hausbehälter während der Pilotversuche nicht mehr bzw. ständig gefüllt genutzt wurden. Private Pumpen wurden während der kontinuierlichen Versorgung nicht mehr genutzt.

## 5.5 Planung der Umstrukturierung

### 5.5.1 Systemkonzept

Wie in Kapitel 4.5.3 dargelegt, sind in Entwicklungsländern Wasserverteilungssysteme ohne definierte Druck- oder Versorgungszonen und Zubringersysteme keine Seltenheit. Im Kontext der Einführung einer kontinuierlichen Betriebsweise wird folgendes Systemkonzept vorgeschlagen:

- Zubringernetz und Versorgungsnetz sind hydraulisch durch Behälter getrennt.
- Jedem Behälter ist eine Druckzone zugeordnet.
- Die direkte Förderung in das Versorgungsnetz ist zu vermeiden.
- Kann die direkte Förderung in das Versorgungsnetz nicht vermieden werden, ist jeder Förderanlage eine diskrete Betriebszone zuzuordnen.
- Verbindungen zwischen den Druckzonen sind für Notfälle vorgesehen, aber im normalen Betrieb durch Zonentrennschieber geschlossen.
- Die Grenzen der Druckzonen verlaufen möglichst entlang markanter räumlicher Gegebenheiten (z.B. Hauptstraßen, Geländeformationen, Flächennutzungsgrenze).
- Druckzonen sind durch Sektorentrennschieber in Sektoren unterteilbar.
- Sektoren werden vom Behälter über separate Hauptleitungen versorgt.
- Bestehende Infrastruktur wird zur Umstrukturierung weitestgehend genutzt.

Abbildung 5.3 zeigt schematisch das umgesetzte Systemkonzept. In der Darstellung werden zwei Hochbehälter über Zubringerleitungen beschickt. Jedem Hochbehälter ist eine Druckzone zugeordnet. Die Verbindungsleitung der Druckzonen ist mit einem Zonentrennschieber geschlossen. Die größere Druckzone kann durch das Schließen von Sektorentrennschiebern in Sektoren unterteilt werden, die über jeweils eine Hauptleitung versorgt werden.

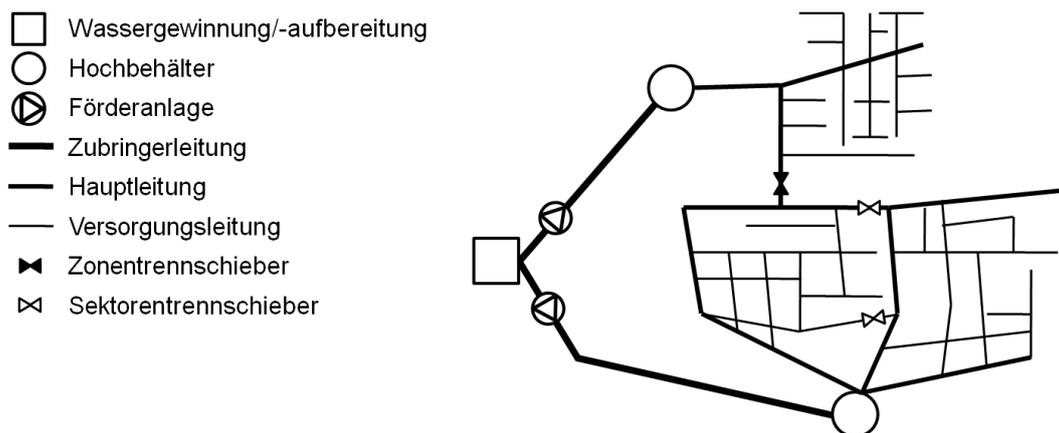


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung des Systemkonzepts

## 5.5.2 Ausführung des Systemkonzepts

### 5.5.2.1 Ansatz der Komponentenauslegung

Das Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum wird in Entwicklungsländern durch vielerlei Faktoren beschleunigt oder verlangsamt. Die Prognose des Wasserbedarfs und notwendiger Systemerweiterungen ist daher schwierig (Bradley u. a., 2002; Miloradov, 1992). Zudem sind Veränderungen im Verbrauchsverhalten durch die Einführung einer kontinuierlichen Versorgung schwer abzuschätzen. Demzufolge ist neben

der Möglichkeit einer zeitlichen Anpassung der Umsetzung auch ein Planungsansatz notwendig, der maximale Flexibilität bei der Berücksichtigung zukünftiger Bedarfs- und Netzentwicklungen garantiert (s. Kap. 5.2). Das im vorigen Kapitel umrissene Systemkonzept ermöglicht durch die hydraulische Trennung des Zubringer- und Versorgungssystems deren losgelöste Betrachtung und Auslegung:

**Zubringersystem:** Das Zubringersystem wird unter weitestgehender Nutzung bestehender Leitungen realisiert. Das System muss zunächst nur dem aktuellen Lastfall genügen. Allerdings werden zukünftige Systemerweiterungen als neue Druckzonen an das Zubringersystem angeschlossen.

**Druckzonen:** Die Druckzonen werden entsprechend der Topographie, der Bevölkerungsverteilung und der bestehenden Behälter geplant und durch das Trennen des bestehenden Versorgungsnetzes angelegt. Zukünftige Erweiterungen der Zonen sind nicht vorzusehen. Dadurch ist lediglich das Bevölkerungswachstum innerhalb der Zone bei der Auslegung zu berücksichtigen.

**Versorgungssystem:** Bei der Auslegung der Hauptleitungen wird die mögliche Nachverdichtung innerhalb der Sektoren sowie das Verbrauchsverhalten bei kontinuierlicher Versorgung berücksichtigt. Das übrige Versorgungsnetz bleibt zunächst unverändert und wird bedarfsorientiert nach der Einführung der kontinuierlichen Versorgung auf den o.g. Lastfall angepasst.

Die Planung und Auslegung der Systemkomponenten wird in den folgenden Kapiteln näher diskutiert.

### 5.5.2.2 Auslegung des Zubringersystems

Prinzipiell stellen zukünftige Netzerweiterungen immer neue Druckzonen oder Sektoren dar. Demnach muss die Auslegung des Zubringersystems einen Planungshorizont und die entsprechenden Bedarfsprognosen berücksichtigen. Werden allerdings bestehende Leitungen zur Realisierung eines Zubringersystems genutzt, genügt es, dass diese Leitungen lediglich für den aktuellen Bedarf ausgelegt sind. Eine Erhöhung der Kapazitäten kann bedarfsgerecht zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen. Müssen Leitungen aber aus anderen Gründen, z.B. wegen eines mangelhaften Zustands, erneuert werden, ist es zweckmäßig die erforderliche Kapazität am Planungshorizont bei der Auslegung zu berücksichtigen. Dadurch wird die schnelle Umsetzung eines Zubringersystems in einem bestehenden Verteilungsnetz ermöglicht.

### 5.5.2.3 Planung der Druckzonen und Sektoren

Die Druckzonen ergeben sich aus den topographischen Gegebenheiten sowie der Lage und Geometrie der Behälter. Werden die Druckzonen so angelegt, dass der

minimal zulässige Systembetriebsdruck  $DP$  vorherrscht, können die realen Wasserverluste und der Wasserverbrauch wegen ihrer Druckabhängigkeit reduziert werden. Übersteigt die Zahl der erforderlichen Druckzonen die Zahl der Behälter, besteht die Möglichkeit, dass ein Behälter zwei Zonen versorgt. Ggf. muss eine Druckreduzierung erfolgen. Gibt es mehr Behälter als notwendige Druckzonen, können mehrere Behälter für die Versorgung einer Zone vorgesehen oder Behälter stillgelegt werden.

Die Grenzen der Druckzonen sind möglichst entlang markanter räumlicher Gegebenheiten, wie z.B. Hauptstraßen, Geländeformationen oder Flächennutzungsgrenzen, zu wählen. Dadurch ist die neue Netzstruktur, auch vom Personal der Ausführungsebene, leicht erfassbar. Das Risiko der Installation von Querverbindungen wird minimiert. Zwischen den Druckzonen kann zur Erhöhung der Versorgungssicherheit eine klar definierte Verbindung, die im normalen Betrieb durch einen Zonentrennschieber geschlossen ist, vorgesehen werden (s. Abb. 5.3). Die Befüllung und Einspeisung der Behälter ist mit Großwasserzählern zu messen.

Es ist die Möglichkeit vorzusehen, Druckzonen temporär in hydraulisch getrennte Sektoren zu unterteilen. Die Versorgung der Sektoren einer Zone erfolgt über hydraulisch unabhängige Hauptleitungen aus dem entsprechenden Behälter. Für die Verbindungsleitungen der Sektoren sind Sektorentrennschieber vorzusehen (s. Abb. 5.3). An den Hauptleitungen sind, ggf. mobile, Durchflussmessungen vorzusehen.

Die Druckzonen und Sektoren können in einer iterativen Vorgehensweise anhand der Topographie, der Bedarfswerte und des bestehenden Systems geplant und mit Hilfe eines hydraulischen Modells rechnerisch geprüft werden. Zur automatisierten Berechnung sind verschiedene mathematische Ansätze und Werkzeuge bekannt. Der Ansatz von Gramer (2009) ermittelt Druckzonen anhand des Netzgraphen, der Knotenhöhen und der Einspeisepotentiale. Sempewo u. a. (2008) beschreiben ein Werkzeug zur Ermittlung von Sektoren, die entweder die gleichen Netzlängen oder Bedarfswerte aufweisen. Das in Kapitel 6 beschriebene Werkzeug unterstützt die Anwendung beider Werkzeuge. Jun und Loganathan (2007) geben eine Methode an, mit der die kleinsten, durch Schieber isolierbaren Netzbereiche ermittelt werden können. Weitere Ansätze sind vor allem im Zusammenhang mit der Planung von DMAs zur Wasserverlustreduktion bekannt (s. z.B. Morrison u. a. (2007), Farley und Liemberger (2005), DVGW (2003) oder Farley (2001)).

Die in der Regel chaotisch gewachsenen Netze sind meist von einer starken Vermischung, vielen Querverbindungen und parallelen Leitungen geprägt (s. Kap. 4.5.3). Die Gesamtlänge des Leitungsnetzes übersteigt demnach die notwendige Länge. Folglich können die Druckzonen und Sektoren weitgehend durch das Trennen und Stilllegen von Leitungen eingerichtet werden.

### 5.5.2.4 Auslegung des Versorgungssystems

Die Druckzonen und Sektoren werden für das bestehende Netz geplant und entsprechend ausgelegt. Lediglich die mögliche Nachverdichtung innerhalb der Druckzonen bzw. Sektoren wird bei der Auslegung der versorgenden Hauptleitungen berücksichtigt. Wie beim Zubringersystem kann eine ggf. notwendige Erhöhung der Kapazität

ten zu einem späteren Zeitpunkt bedarfsgerecht oder ereignisbezogen erfolgen. Bei der Auslegung sind Veränderungen im Verbrauchsverhalten durch die kontinuierliche Versorgung zu berücksichtigen (s. nächstes Kapitel).

Die Versorgungsnetze der Druckzonen bzw. Sektoren werden zunächst bei der Umstrukturierung nicht berücksichtigt. Eine umfassende Erhebung der Systemdaten ist in der Regel derart aufwändig, dass eine Durchführung im Vorlauf einer Planung zu viel Ressourcen und Zeit in Anspruch nehmen würde (s. Kap. 5.3). Durch die Einführung von Druckzonen ist die Überschreitung von Druckgrenzwerten jedoch ausgeschlossen. Auf Unterschreitungen wird angepasst im Zuge der Einführung einer kontinuierlichen Betriebsweise reagiert (s. Kap. 5.8.4). Alternativ können vor der Umstellung der Betriebsweise im Rahmen der Vorbereitung eines Sektors die Systemdaten des Versorgungsnetzes erhoben und Umstrukturierungsmaßnahmen geplant und durchgeführt werden.

### 5.5.2.5 Wasserbedarfsermittlung

Bei der Planung der Umstrukturierung wird der zukünftige Wasserbedarf als Planungsparameter benötigt. Bei der Ermittlung des Wasserbedarfs muss beachtet werden, dass eine Verbesserung der Versorgungssituation u.U. Veränderungen im Verbrauchsverhalten mit sich bringt.

Durch das Bewirtschaften privater Hausbehälter ist die Wasserverschwendung bei intermittierender Versorgung höher als bei kontinuierlicher Versorgung. Der Zusammenhang ist näher in Kapitel 4.5.4 und von verschiedenen Autoren, wie z.B. Totsuka u. a. (2004), McIntosh (2003), Chowdhury u. a. (2002), Bradley u. a. (2002) und Kumar (1998), beschrieben. Durch die kontinuierliche Versorgung ist also eine Minderung der Wasserverschwendung zu erwarten.

Der Wasserverbrauch wird entscheidend durch die technischen Faktoren Wasserverfügbarkeit, Verbrauchsmessung, Tarifgestaltung, Anschlussgrad und alternative Versorgungsmöglichkeiten beeinflusst (Bradley u. a., 2002). Außerdem spielt der Lebensstil, also das soziale Gefüge der Verbraucher eine Rolle (Bradley, 2004). Die Entwicklung des Bedarfs hängt zudem von der Urbanisierung und ökonomischen Entwicklung der Region ab (Miloradov, 1992). Durch eine kontinuierliche Versorgung wird u.U. die bereitgestellte Menge erhöht. In jedem Fall wird aber die zeitliche Verfügbarkeit erhöht. Trotzdem ist eine Zunahme des Verbrauchs langfristig meist nicht gegeben, wie Andey und Kelkar (2007), Bradley (2004) und Bradley u. a. (2002) feststellen. McIntosh (2003) geht sogar davon aus, dass der Verbrauch bei kontinuierlicher Versorgung geringer als bei intermittierender Versorgung ist.

Neben der Tarifgestaltung kann mit weiteren Methoden des Verbrauchsmanagements Einfluss auf den Wasserverbrauch genommen werden. Dies empfiehlt sich z.B. bei einem zu erwartenden relativ hohen Verbrauch, um Unsicherheiten in der Verbrauchsentwicklung vorzubeugen oder aber um für die prinzipielle Machbarkeit der kontinuierlichen Versorgung den Verbrauch zu senken (s. Kap. 5.2.2). Mit dem Thema des Verbrauchsmanagements setzen sich Butler und Memon (2006) sowie Vairavamoorthy u. a. (2008) umfassend auseinander. Nouh (2005) gibt einen Ansatz

speziell für die arabische Golfregion an.

Die genannten, den Bedarf mindernden und steigernden Einflussfaktoren erschweren die Prognose des Bedarfs nach Einführung einer kontinuierlichen Versorgung sowie der zukünftigen Bedarfsentwicklung. Zudem ändern sich die sozialen und ökonomischen Verhältnisse in Entwicklungsländern im Vergleich zu entwickelten Ländern mit großer Geschwindigkeit. Die Bedarfsermittlung über Pauschalwerte, wie sie in Kapitel 2.4.3.3 beschrieben ist, setzt aber ähnliche soziale und ökonomische Verhältnisse voraus und ist daher nur begrenzt anwendbar.

Bradley (2004) empfiehlt daher für Entwicklungsländer einen differenzierteren Ansatz, der die für ein Versorgungsgebiet spezifischen Einflussfaktoren, z.B. die ökonomische Entwicklung und Veränderungen auf dem Arbeitsmarkt, das Bevölkerungswachstum, die Wohngepflogenheiten, Trends zum Wassersparen, Einkommen usw., berücksichtigt. Für die Ermittlung des zukünftigen Wasserbedarfs unter Berücksichtigung mehrerer Kriterien finden verschiedene mathematische und statistische Vorhersagemodelle Anwendung (s. z.B. Ghiassi u. a. (2008) oder Gato u. a. (2007)). Diese Ansätze verlangen jedoch eine breite und verlässliche Datenbasis, deren Schaffung in der Regel mit einem großen Aufwand verbunden ist (Hopkins u. a., 2004).

Daher ist es zweckmäßig, die Veränderungen im Verbraucherverhalten durch eine kontinuierliche Versorgung in einem Pilotversuch zu ermitteln. Der Aufwand ist überschaubar und zudem kann der Pilotversuch als erster Schritt in der sukzessiven Umstellung der Betriebsweise dienen (s. Kap. 5.4). Durch gezieltes Monitoring in jedem weiteren, kontinuierlich versorgten Sektor können die Bedarfswerte und das Verbraucherverhalten nach und nach präzisiert werden (s. Kap. 5.8.2).

### 5.5.3 Vorteile des Systemkonzepts

Das Systemkonzept zeichnet sich insbesondere bei der Umstrukturierung bestehender Systeme durch folgende Vorteile aus:

- Möglichkeit einer angepassten Datenerhebung
- Berücksichtigung unsicherer Parameter bei der Systemauslegung
- Zeitlich flexible Umsetzung
- Geringer Aufwand durch Nutzung bestehender Infrastruktur
- Einhaltung der Druckgrenzwerte
- Möglichkeit der sukzessiven Einführung einer kontinuierlichen Betriebsweise

Für die Planung der Umstrukturierung werden mit den Netzdaten der Zonengrenzen und der Bedarfsverteilung vergleichsweise wenig Daten benötigt. Die Daten der Versorgungsnetze werden nach Bedarf in späteren Stadien des Prozesses erhoben (s. Kap. 5.8.4). Dadurch wird der Planungsaufwand zu Beginn reduziert und eine zeitlich flexible Umsetzung ermöglicht (s. auch Kap. 5.3).

Die schwer zu prognostizierende Bedarfsentwicklung wird durch die Entkoppelung bestehender Versorgungsnetze bzw. Zonen und zukünftiger Zonen berücksichtigt. In den bestehenden Netzbereichen wird eine maximale Nachverdichtung bei der

Auslegung der Hauptleitungen und des Zubringersystems einbezogen. Zukünftige Netzerweiterungen wirken sich alleine auf die Auslegung des Zubringersystems aus.

Das Systemkonzept zeichnet sich durch seine relativ einfache Umsetzbarkeit bei bestehenden Verteilungssystemen aus. Das Zubringernetz ist vom Versorgungsnetz zu trennen. Dazu werden hauptsächlich Leitungen stillgelegt und Anschlüsse geschlossen. Für die Einteilung von Druckzonen und Sektoren sind ebenfalls Leitungen zu trennen und ggf. Schieber einzubauen. Das Verlegen neuer Leitungen kann unter Berücksichtigung des bestehenden Netzes reduziert werden.

Durch die Wahl der Zonengrenzen entlang räumlich markanter Gegebenheiten ist das Systemkonzept vor Ort leicht erfassbar. Das Risiko von Querverbindungen durch improvisiert verlegte Leitungen wird minimiert. Zudem ermöglichen die transparente Trennung der Systemkomponenten eine einfache Systemsteuerung, Betriebskontrolle, Netzüberwachung, Datenerhebung und Wasserverlustreduktion.

Die Druckzonen gewährleisten durch die gewählte Potentialdifferenz zwischen Einspeisung und Hausanschlüssen, dass die Grenzwerte für den Versorgungsdruck  $SP$  nicht überschritten und theoretisch nicht unterschritten werden. Da die Versorgungsnetze der Druckzonen bei der Umstrukturierung zunächst nicht ganzheitlich berücksichtigt werden, kann es auf Grund zu geringer Leitungskapazitäten zu Druckunterschreitungen kommen. Die Kapazitäten werden nach Einführung der kontinuierlichen Betriebsweise angepasst. Trotz möglicher Druckdefizite wird die Versorgungssituation stetig verbessert. Ungeplante Leitungsverlegungen innerhalb der Druckzongrenzen erhöhen in jedem Fall die Netzkapazitäten.

Vorausgesetzt die Grenzen der Druckzonen werden bei zukünftigen Maßnahmen am Leitungsnetz respektiert, können ungeachtet der Zweckmäßigkeit der Maßnahmen die Grenzwerte des Versorgungsdrucks nicht über- oder unterschritten werden. Lediglich die Stagnation kann bei übermäßiger Erhöhung der Netzkapazitäten ein Problem darstellen. Das Systemkonzept stellt damit einen robusten Ansatz gegenüber improvisierten Netzerweiterungen dar.

Nicht zuletzt ermöglicht das Systemkonzept die sukzessive Einführung einer kontinuierlichen Versorgung in den Netzsektoren (s. Kap. 5.8).

### 5.5.4 Planung der Umstrukturierung in Béni Abbès

#### 5.5.4.1 Netzstruktur des bestehenden Wasserverteilungssystems

Das bestehende Wasserverteilungsnetz des Fallbeispiels sowie die Mängel des Systems sind ausführlich in Kapitel 4.2 und 4.3 beschrieben. Abbildung 5.4 zeigt ein Schema der Struktur des bestehenden Systems. Das Leitungsnetz ist gekennzeichnet durch eine komplexe Struktur mit zahlreichen Querverbindungen und parallelen Leitungen. Eine Einteilung von Druckzonen besteht nicht. Alle Behälter speisen in das hydraulisch kommunizierende Versorgungsnetz ein. Zudem existieren Verbindungen zwischen den Förderleitungen zur Befüllung der Behälter und dem Versorgungssystem. Hausanschlüsse sind mitunter direkt an die Förderleitungen angeschlossen. Dementsprechend ist kein eindeutiges Zubringersystem definiert (s. auch Kap. 4.3.3).

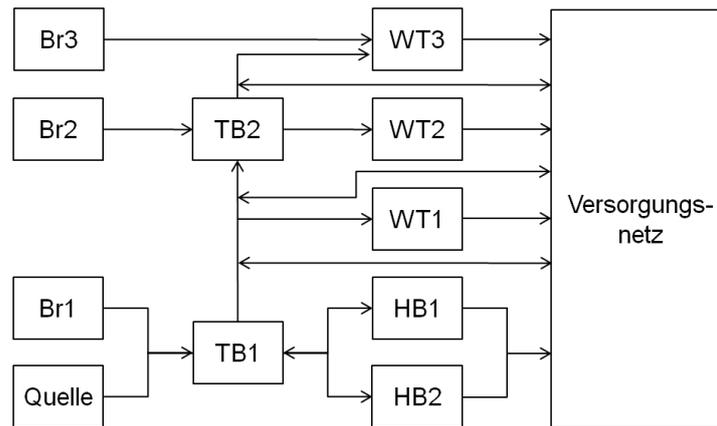


Abbildung 5.4: Schema des bestehenden Verteilungssystems

### 5.5.4.2 Netzstruktur des umstrukturierten Wasserverteilungssystems

In Abbildung 5.5 ist das geplante Systemkonzept dargestellt. Durch die Trennung der bestehenden Förderleitungen vom Versorgungsnetz wird ein Zubringersystem definiert. Rohwasser wird von der Quelle und dem Brunnen *Br1* in den Zwischenbehälter *TB1* gefördert. Über eine Druckleitung wird der Hochbehälter *HB2* beschickt. Über eine zweite Druckleitung wird Wasser in den Wasserturm *WT1* sowie den Zwischenbehälter *TB2* gefördert. In *TB2* fördern auch die Brunnen *Br2* und *Br3*. Von *TB2* wird das Wasser in den Wasserturm *WT2* gepumpt. Mit der gleichen Pumpe kann über eine weitere Zubringerleitung auch in den Wasserturm *WT3* gefördert werden.

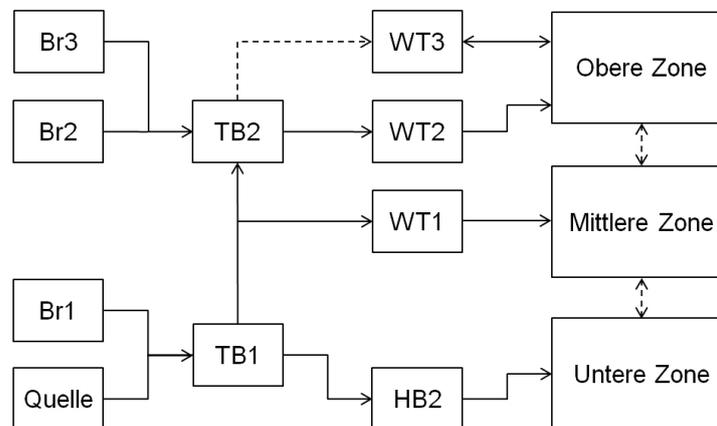


Abbildung 5.5: Schema des umstrukturierten Verteilungssystems

Den Behältern *HB2*, *WT1* sowie den Behältern *WT2* und *WT3* wird jeweils eine Druckzone zugeordnet. Zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit sind die Druckzonen durch definierte Leitungen miteinander verbunden, die im normalen

Betrieb durch Absperrschieber geschlossen sind. Der Wasserturm *WT3* ist im normalen Netzbetrieb als Gegenbehälter vorgesehen. Der baufällige Hochbehälter *HB1* wird stillgelegt. Auf Grund des relativ kleinen Volumens von ca. 95 m<sup>3</sup> wird der Behälter nicht unbedingt benötigt.

Für die Wahl der Druckzonen ist die Potentialdifferenz zwischen den Füllständen der bestehenden Behälter und dem Versorgungsgebiet maßgebend. Der maximale statische Druck in Béni Abbès beträgt ca. 70 m, der minimale ca. 22 m. Dem Hochbehälter *HB2* wird die so genannte *Untere Zone* zugeordnet, die die tiefer gelegenen Stadtteile im Saouratal umfasst. Außerdem bezieht das Kraftwerk sein Wasser über die Behälter *TB3* und *WT4* aus dieser Zone. Der Wasserturm *WT1* versorgt die *Mittlere Zone*. Diese Zone fasst hauptsächlich auf dem Plateau gelegene Stadtteile aber auch die an an den Talhängen gelegenen Gebiete zusammen. Dieser Zone ist auch das Krankenhaus mit dem Behälter *TB4* zugeordnet. Die nördlichen und damit am höchsten gelegenen Stadtteile auf dem Plateau stellen die von den Wassertürmen *WT2* und *WT3* versorgte *Obere Zone* dar.

Der mittlere statische Versorgungsdruck der Zonen ergibt sich aus der Differenz zwischen den mittleren Füllständen der Behälter und den mittleren Höhen der Druckzonen. Tabelle 5.5 zeigt die Werte für die gewählten Druckzonen in Béni Abbès (Klingel u. a., 2008). Auf Grund der relativ flachen topographischen Ausprägung des Stadtgebiets auf dem Plateau kann dort der Verlauf der Grenze flexibel gewählt werden. Die Grenze zwischen *Oberer* und *Mittlerer Zone* verläuft entlang der Hauptstraße, die Grenze zwischen der *Mittleren* und *Unteren Zone* orientiert sich an der Abbruchkante des Plateaus. Damit sind die Zonengrenzen vor Ort leicht erfassbar, was die in Kapitel 5.5 erwähnten Vorteile mit sich bringt. Den Verlauf der Druckzonengrenzen zeigt Abbildung 5.6.

Tabelle 5.5: Mittlere statische Versorgungsdrücke in den Druckzonen

Druckzone	Mittl. Füllstand	Mittl. Zonenhöhe	Mittl. stat. Druck
[–]	[m ü. NN]	[m ü. NN]	[m]
Obere Zone	545,2 ( <i>WT2</i> )	520,6	24,6
Obere Zone	546,1 ( <i>WT3</i> )	520,6	25,5
Mittl. Zone	538,0 ( <i>WT1</i> )	515,5	22,5
Untere Zone	521,5 ( <i>HB2</i> )	490,0	31,5

Die Druckzonen können durch das Schließen von Schiebern in hydraulisch unabhängige Sektoren unterteilt werden. Jeder Sektor kann über eine Hauptleitung von den anderen Sektoren unabhängig aus einem Behälter versorgt werden. Die *Obere Zone* kann in die fünf Sektoren *O1* bis *O5* unterteilt werden. Die Sektoren *O1* und *O2* können von *WT3* versorgt werden. In diesem Betriebsfall dient der Wasserturm *WT3* nicht als Gegenbehälter, sondern wird über das Zubringersystem befüllt. *WT2* ist zur Versorgung der Sektoren *O3*, *O4* und *O5* vorgesehen. Die vier Sektoren *M1* bis *M4* der *Mittleren Zone* werden alle aus *WT1* versorgt. In der *Unteren Zone* ist

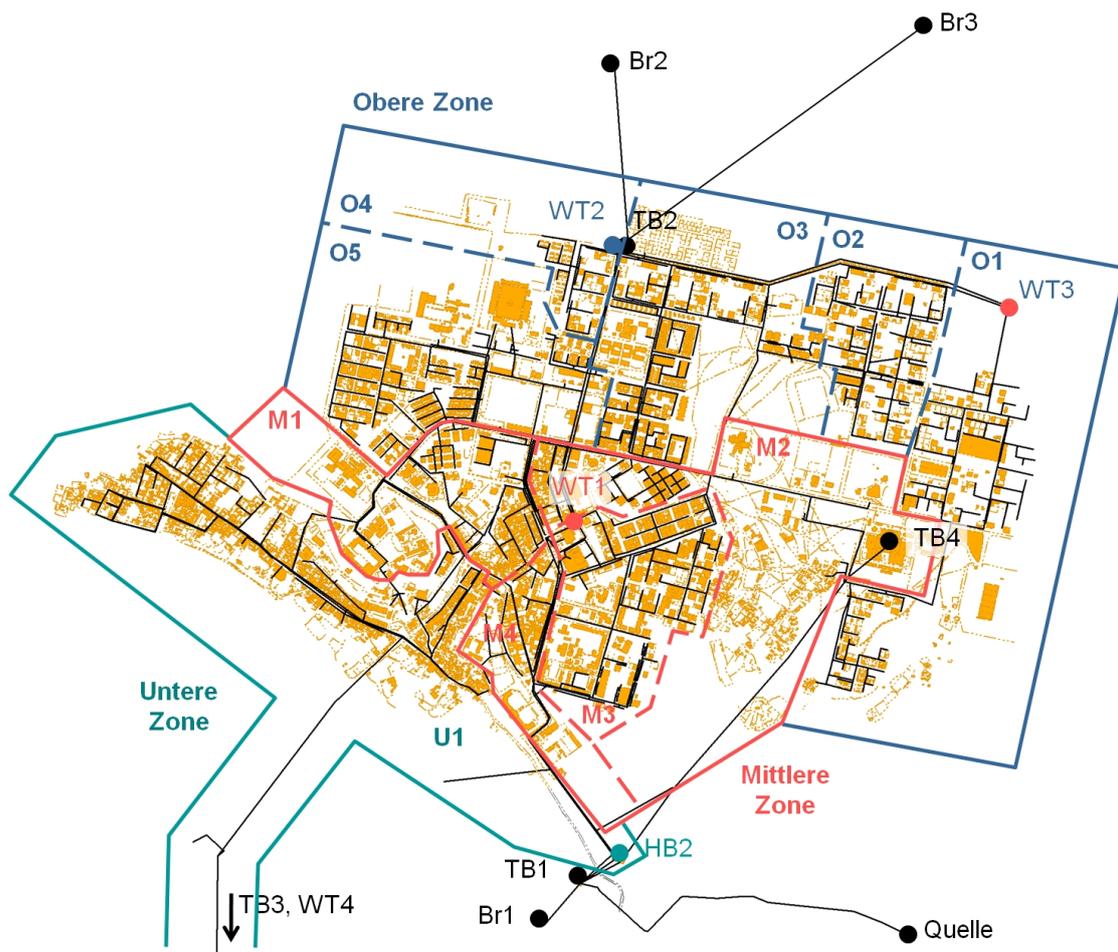


Abbildung 5.6: Das Verteilungsnetz mit den geplanten Druckzonen und Sektoren

ohne größeren baulichen Aufwand auf Grund der langgestreckten Form und der Lage des *HB2* keine Unterteilung in Sektoren möglich. Die Sektoren der Druckzonen sind schematisch in Abbildung 5.7 dargestellt.

Die Sektoren dienen zunächst der sukzessiven Einführung einer kontinuierlichen Versorgung, die näher in Kapitel 5.8 beschrieben ist. Der Sektor *O1* entspricht der in Kapitel 5.4.3 diskutierte Pilotzone. Im normalen Betrieb können die Sektoren zur Kontrolle der Mengenverteilung und damit für die Wasserverlustreduktion genutzt werden. Dazu sind an den Hauptleitungen, die die Sektoren versorgen, Messschächte vorgesehen, in denen Durchfluss- und Druckmessgeräte installiert werden können.

#### 5.5.4.3 Maßnahmenplanung zur Umstrukturierung des Wasserverteilungssystems

Entsprechend des in Kapitel 5.5.2 dargestellten Ansatzes berücksichtigt die hydraulische Auslegung des Versorgungsnetzes das mögliche Bevölkerungswachstum innerhalb der gegebenen Zonengrenzen. Das aktuelle Netz umfasst ca. 2.450 Haushalte

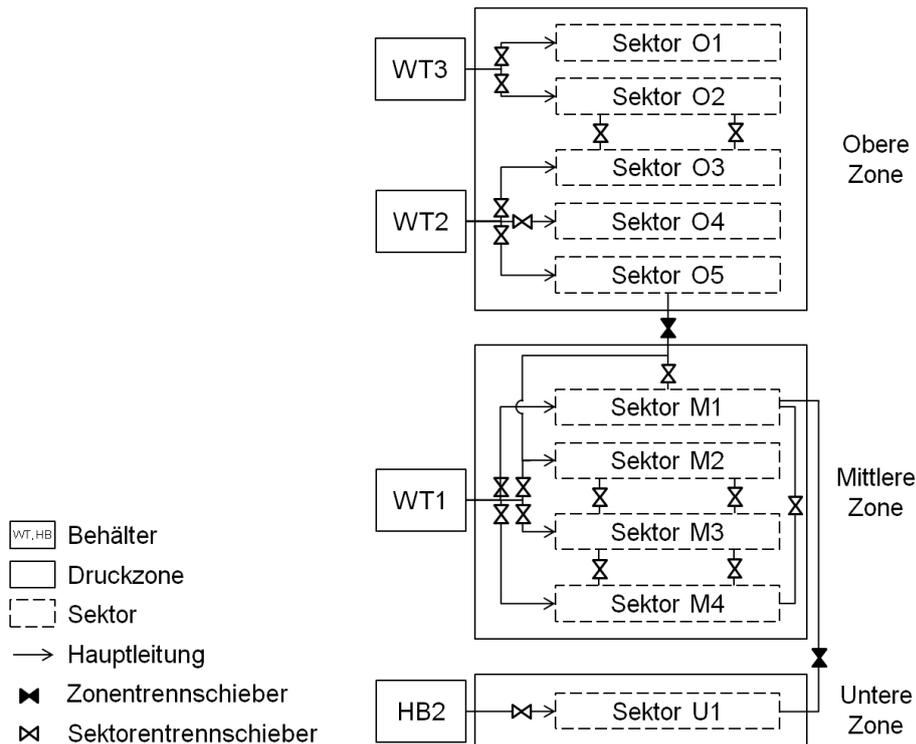


Abbildung 5.7: Schema der Druckzonen und Sektoren des umstrukturierten Versorgungsnetzes

mit insgesamt ca. 13.740 Einwohnern. Innerhalb der Druckzonen ist ein Zuwachs in der Größenordnung von ca. 310 Einheiten auf insgesamt 2.760 Haushalte möglich. Die potentielle Nachverdichtung wurde durch Ortsbegehungen und Gespräche mit den zuständigen Behörden ermittelt. Bei gleicher Personenzahl pro Haushalt (5,6 E/HA) ergibt sich eine maximale Gesamtbevölkerung in den Druckzonen von ca. 15.480 Einwohnern. Dies entspricht etwa der prognostizierten Bevölkerung im Jahr 2020 (s. Tab. 4.1).

Entsprechend Tabelle 5.3 kann diese Bevölkerung mit einem einwohnerbezogenen Tagesbedarf von ca. 99 - 119 l/E/d versorgt werden, sofern die Wasserverluste auf 25 % gesenkt werden. Die Pilotversuche haben gezeigt, dass kein höherer Wasserverbrauch zu erwarten ist (s. Tab 5.4). Die hydraulische Leistungsfähigkeit des Versorgungsnetzes ist auf diese Randbedingungen ausgelegt. Die Stundenfaktoren für die Bemessung des Leitungsnetzes basieren auf einer Verbrauchsganglinie bei kontinuierlicher Versorgung (Pietschmann u. a., 2006).

Mögliche zukünftige Ausdehnungen des Versorgungsgebiets werden als neue Druckzonen in das Systemkonzept einbezogen. Dies ist räumlich nur im Norden und Nordosten der Stadt auf dem Plateau möglich. Neue Druckzonen werden demnach von den Behältern WT2 und WT3 versorgt werden. Wenn von einer gerechten Versorgung ausgegangen wird, bedeuten neue Versorgungszone auf Grund der li-

mitierten Wasserressourcen lediglich eine Veränderung in der Wasserverteilung. Das aus bestehenden Leitungen definierte Zubringersystem ist für eine flexible Verteilung der Wasserressourcen ausreichend leistungsfähig.

Die Planung der notwendigen Umsetzungsmaßnahmen erfolgte nach dem Ansatz, die bestehende Infrastruktur soweit wie möglich zu nutzen. Werden Leitungen nicht mehr gebraucht, sind diese still zu legen. Um eine spätere ungeplante Nutzung zu verhindern, sind die Leitungen zu verfüllen. Nicht mehr genutzte Leitungen, die Zonen verbinden, sind zu demontieren. Fehlen Leitungen zur Umsetzung des geplanten Systemkonzepts, werden diese neu verlegt. Leitungen, die topologisch sinnvoll sind, aber eine ungenügende Kapazität aufweisen, werden ausgetauscht. Im Vergleich mit neu zu verlegenden Leitungen ist dabei der Aufwand geringer, weil die Bettung der Leitung bereits vorhanden ist. Außerdem sind zur Modifikation der Netzstruktur Leitungsverbindungen zu trennen, neue Leitungsverbindungen herzustellen sowie Absperrschieber und Messvorrichtungen einzubauen.

Tabelle 5.6 fasst den baulichen Aufwand zur Umsetzung des im vorigen Kapitel beschriebenen Systemkonzepts zusammen. Ca. 6,3 km der Leitungen des bestehenden Netzes werden nicht mehr benötigt. Dies entspricht bei einer Gesamtlänge des Netzes von ca. 62 km ca. 10 %. In dieser Betrachtung nicht berücksichtigt sind die Versorgungsleitungen innerhalb der Druckzonen, deren mögliche Redundanz zu einer weiteren beträchtlichen Reduzierung der benötigten Leitungen führen kann. Gleichzeitig werden neue Leitungen mit einer Gesamtlänge von ca. 4 km (ca. 6 %) benötigt. Die Lage der notwendigen neuen sowie der nicht mehr genutzten Leitungen zeigt Abbildung 5.8. Mit Ausnahme der neuen Hauptleitung zur *Unteren Zone* bzw. zu Sektor *U1* und der stillgelegten Zuleitung zum Krankenhaus sind die Maßnahmen eher punktuell ausgeprägt und konzentrieren sich auf die Zonengrenzen. Aus der Darstellung ist zudem ersichtlich, dass der Großteil des geplanten Versorgungsnetzes dem bestehenden entspricht.

Tabelle 5.6: Maßnahmen zur Umstrukturierung des Wasserverteilungssystems

<b>Maßnahme</b>	<b>Aufwand</b>
Demontierten von Leitungen	ca. 4.150 m
Stilllegen von Leitungen	ca. 2.175 m
Ersetzten von Leitungen	ca. 2.430 m
Verlegen neuer Leitungen	ca. 1.560 m
Verbinden von Leitungen	ca. 80 (ca. 120 m)
Trennungen von Leitungen	ca. 35
Absperrschieber	8
Großwasserzähler	7
Messschächte	13

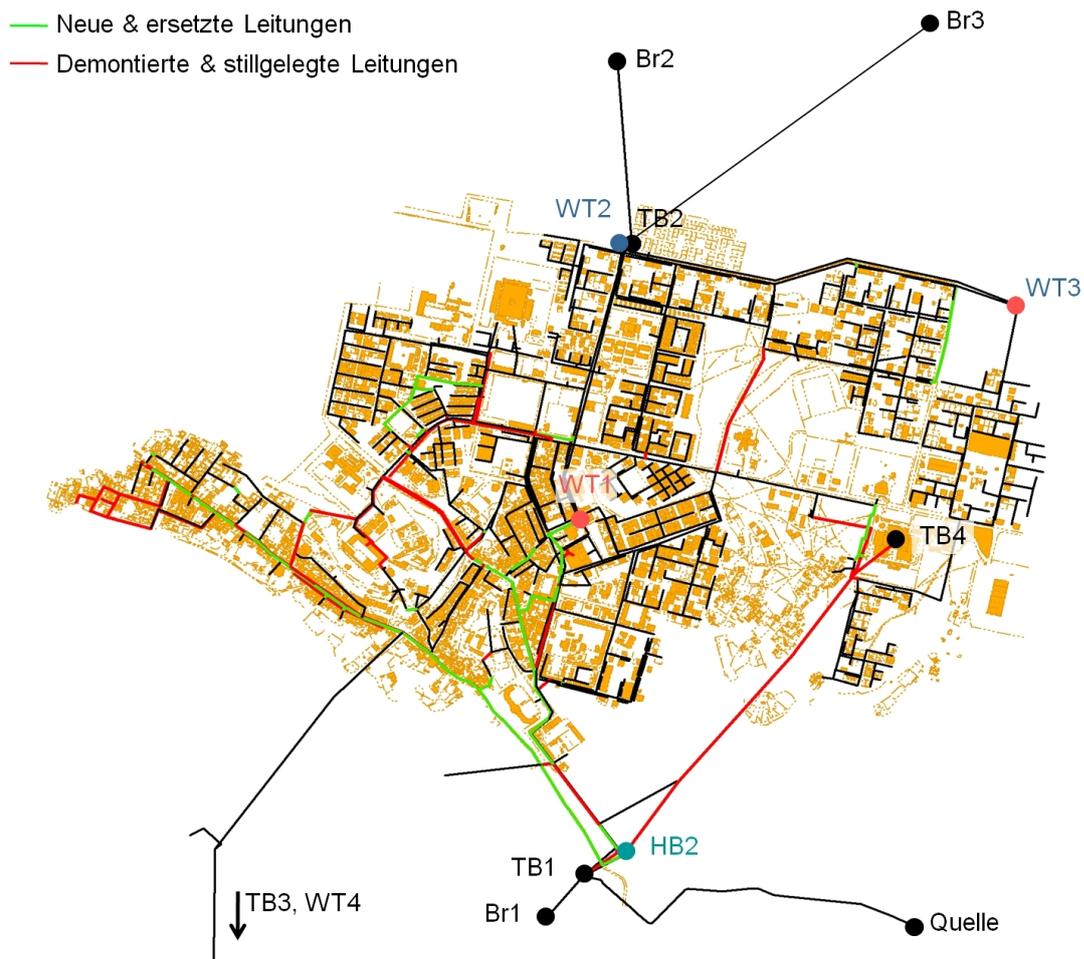


Abbildung 5.8: Maßnahmen zur Umstrukturierung des Wasserverteilungssystems

## 5.6 Sensibilisierung und Partizipation

### 5.6.1 Notwendigkeit

Über die erfolgreiche Umsetzung einer technischen Lösung entscheidet immer die Akzeptanz seiner Nutzer. Im Fall der zentralen Wasserversorgung geht der Wasserverbrauch in seiner örtlichen und zeitlichen Ausprägung als Lastfall in die Planung der Wasserverteilung ein. Gestaltet sich der Wasserverbrauch und das Verbraucherverhalten abweichend zu dem als Planungsparameter angenommenen, kann dies auf Grund veränderter Lastfälle zu Einschränkungen in der Funktionsfähigkeit des Systems führen.

Dies ist zunächst ein Problem der Bedarfsprognose aber auch der Akzeptanz der Abnehmer. Wird nach der Umstellung der Versorgung von intermittierend auf kontinuierlich von den Abnehmern weiterhin Wasser zwischengespeichert, hat dies eine höhere Wasserverschwendung sowie veränderte Lastfaktoren zur Folge. Muss für die Machbarkeit einer kontinuierlichen Versorgung der Wasserverbrauch reduziert wer-

den, z.B. im Rahmen eines Verbrauchsmanagements, ist der Betreiber u.a. auf den sparsamen Umgang mit Wasser durch die Abnehmer angewiesen (s. Kap. 5.2.2). Im Extremfall kann dies darin resultieren, dass eine kontinuierliche Betriebsweise nicht aufrecht erhalten werden kann (s. Kap. 4.5.4). In diesem Zusammenhang ist auch Wasserdiebstahl zu sehen, der durch die unkontrollierte Entnahme und den verursachten ökonomischen Schaden eine kontinuierliche Versorgung gefährdet.

Die Abnehmer sind daher unbedingt für das Thema Wasserverfügbarkeit und Wassernutzung zu sensibilisieren und in die Entscheidungsprozesse bei der Planung von Veränderungen in der Wasserversorgung mit einzubinden (Muyibi, 1992). Um die Aufmerksamkeit zu nutzen, die Baumaßnahmen mit sich bringen, bietet es sich an vor Beginn der Umsetzung der Umstrukturierungsmaßnahmen in einem Sektor bzw. im Versorgungsgebiet die betroffenen Einwohner über das Vorhaben zu informieren und sie zur Mitarbeit anzuhalten. Generell ist der Beginn von Informations- und Sensibilisierungsmaßnahmen so früh wie möglich anzustreben.

### 5.6.2 Sensibilisierung und Partizipation in Béni Abbès

Im Fallbeispiel Béni Abbès wird die Bevölkerung im Rahmen des Kooperationsprojekts seit Jahren über das Thema Wasser und Wassernutzung informiert. So wurden öffentliche Theaterstücke zum Thema erarbeitet und aufgeführt, eine Plakatkampagne durchgeführt und so genannte Pilotkomitees innerhalb der verschiedenen Interessensgruppen gebildet. Z.B. befasst sich ein vorwiegend aus Bauern bestehendes Komitee mit den Fragen der Wassernutzung zur Bewässerung des Palmenhains. Ein weiteres Komitee setzt sich aus Bewohnern des Pilotsektors (s. Kap. 5.4.3) zusammen. Die Pilotkomitees sind über die neuesten Entwicklungen und Entscheidungen informiert. Ihrerseits können die Komitees Informationen an die Bevölkerung oder von der Bevölkerung an den Wasserversorger weitergeben. Außerdem sind die Pilotkomitees bei der Durchführung bestimmter Maßnahmen, wie z.B. Umfragen, behilflich. Über eine Umfrage kann der Informationsstand der Verbraucher und deren Akzeptanz der geplanten Maßnahmen erhoben werden.

Eine von der AHT (2005) durchgeführte Umfrage in 435 Haushalten (ca. 17 %) in Béni Abbès ergab, dass 97 % der befragten Haushalte bereit wären, bei einer kontinuierlichen Versorgung verbrauchsabhängig zu zahlen. Momentan bezahlen ca. 88 % der Haushalte, während 12 % ihren Wasserverbrauch nicht bezahlen. Bezahlt wird momentan ausschließlich pauschal (s. Kap. 4.2.6). 98 % wären bereit, bei einer kontinuierlichen Versorgung ihre Hausbehälter abzuschaffen. Bei 2 % überwiegt Skepsis bzgl. der Versorgungssicherheit. Ca. 88 % gaben an, „viel“ Wasser zu verbrauchen und 76 % sind der Meinung mehr Wasser sparen zu können, insbesondere durch eine verbesserte Bewirtschaftung der Hausbehälter und eine Reduktion des eigentlichen Verbrauchs.

Die im Folgenden zusammengefassten Umfrageergebnisse lassen den Schluss zu, dass die Verbraucher in Béni Abbès gut informiert sind und eine kontinuierliche Versorgung weitgehend unterstützen würden:

- Ca. 88 % der Haushalte verbrauchen nach eigenen Angaben momentan „viel“ Wasser.
- Ca. 76 % der Haushalte sind der Meinung ihren Wasserverbrauch senken zu können.
- Ca. 88 % der Haushalte bezahlen momentan ihren Wasserverbrauch (pauschal), während 12 % nicht bezahlen.
- Ca. 97 % der Haushalte wären bereit bei einer kontinuierlichen Versorgung verbrauchsabhängig zu zahlen.
- Ca. 98 % der Haushalte wären bereit bei einer kontinuierlichen Versorgung ihre Hausbehälter abzuschaffen.

Im Vorfeld der in Kapitel 5.4.3 beschriebenen Pilotversuche wurden die Bewohner unter Einbindung des entsprechenden Pilotkomitees über die Versuche informiert und angehalten ihre Hausbehälter nicht mehr zu nutzen oder zu entleeren, Wasser nicht übermäßig zu verbrauchen und Leckagen zu melden. Alle Punkte wurden sehr gewissenhaft beachtet, was auf eine erfolgreiche Sensibilisierung hinweist.

## 5.7 Umsetzung der Umstrukturierung

### 5.7.1 Ganzheitliche und prozessorientierte Umsetzung

Die notwendigen Maßnahmen zur Umstrukturierung eines bestehenden Systems im Sinne des beschriebenen Systemkonzepts können, wie in Kapitel 5.2.4 und Abbildung 5.1 dargestellt, vor der Umstellung der Betriebsweise komplett oder prozessorientiert umgesetzt werden. Bei einer vollständigen Umsetzung der Maßnahmen können der Aufwand für die Vergabe der Planungs- und Umsetzungsarbeiten gebündelt und dadurch Kosten reduziert werden. Es ist jedoch von Vorteil, die Umsetzung der Maßnahmen aufzuteilen und zumindest die Maßnahmen in den Versorgungsnetzen der Sektoren erst sukzessive vor der Umstellung der Betriebsweise vorzunehmen. Diese Maßnahmen betreffen hauptsächlich die Grenzen sowie die Hauptleitungen der Sektoren. Deren Auslegung hängt maßgeblich vom schwer zu prognostizierenden Planungsparameter Wasserbedarf ab. Abgeschätzte Planungsparameter können durch das Monitoring in bereits kontinuierlich betriebenen Sektoren verifiziert werden (s. Kap. 5.8.2 und 5.4). Eine sukzessive Umsetzung der Maßnahmen in den Versorgungsnetzen ermöglicht die vorherige Anpassung der Maßnahmenplanung unter Berücksichtigung der verifizierten Parameter.

### 5.7.2 Umsetzung der Umstrukturierung in Béni Abbès

Im Fallbeispiel Béni Abbès wurde die Entscheidung getroffen, die Maßnahmen in einem Zug vollständig umzusetzen. Eine Aufteilung in Umsetzungslose ist immer mit einem erhöhten Aufwand für die Ausschreibung verbunden. In Anbetracht des insgesamt relativ überschaubaren Aufwands der Maßnahmen sowie des zeitaufwendigen Vergabeverfahrens in Algerien erscheint eine ganzheitliche Umsetzung sinnvoll.

Zudem ist größeres Gerät und Material in Béni Abbès nicht verfügbar. Durch die isolierte Lage der Stadt, der nächste Inlandsflughafen in Béchar ist drei Stunden Fahrt entfernt, ist der Transport von Gerät und Material sowie die Anreise von Fachleuten mit hohen Kosten verbunden.

Im Rahmen des Kooperationsprojekts wurde die Entwurfsplanung sowie die technischen Spezifikationen der finalen Variante erstellt. Die Dokumente der technischen Spezifikationen umfassen eine Aufstellung der Planungsgrundlagen, die Ausführungen der Einzelmaßnahmen, den hydraulischen Nachweis sowie Untersuchungen zur Steuerung des Zubringersystems. Die Detailplanung wurde von den algerischen Projektpartnern, der DHW in Béchar, ausgeschrieben. Das Vergabeverfahren wurde Mitte 2008 begonnen. Ende 2009 wurde schließlich ein lokales Ingenieurbüro beauftragt. Im April 2010 wurde die Detailplanung von der DHW als abgeschlossen akzeptiert und mit der Ausschreibung der Baumaßnahmen begonnen. Der Umsetzungsbeginn ist für frühestens Ende 2010 geplant.

Die lokale Vertretung der DHW in Béni Abbès führt unterdessen nach wie vor Netzmodifikationen durch. Allerdings wurde vereinbart, dass alle zukünftigen Maßnahmen im Einklang mit der Umstrukturierungsplanung zu stehen haben. Die mit dem Ingenieurbüro nicht koordinierten Arbeiten werden somit zumindest im Sinne des Systemkonzepts ausgeführt.

## 5.8 Umstellung der Betriebsweise

### 5.8.1 Sukzessive Vorgehensweise

Die Umstellung der Betriebsweise von intermittierend zu kontinuierlich erfolgt sukzessive in den Sektoren des Versorgungsnetzes. Dazu kann jeder Sektor entsprechend des Systemkonzepts hydraulisch unabhängig von einem Behälter versorgt werden. Der Betrieb des übrigen Netzes bleibt von der Umstellung unbeeinflusst. Dadurch lässt sich der Umstellungsprozess zeitlich flexibel durchführen und an die Verfügbarkeit von Personal und finanziellen Mitteln anpassen. Außerdem können die Erfahrungen aus Sektoren mit bereits umgestellter Betriebsweise genutzt werden, um Maßnahmen des Umstellungsprozesses oder ggf. die Planung anzupassen. Insbesondere der Planungsparameter Wasserbedarf kann so verifiziert werden. Dazu kann auch ein Pilotversuch dienen, mit dem u.U. der Umstellungsprozess als erster Schritt bzw. Sektor begonnen werden kann (s. Kap. 5.4).

Sofern noch nicht für das ganze System umgesetzt, sind die notwendigen Umstrukturierungsmaßnahmen vor der Umstellung im jeweiligen Sektor durchzuführen (s. Kap. 5.7). Im Vorfeld der Maßnahmen ist die Bevölkerung ausreichend zu informieren (s. Kap. 5.6). Im Sektor sind vor der Umstellung des Betriebs alle illegalen Anschlüsse so weit möglich zu entfernen oder zu legalisieren (McIntosh, 2003). Des Weiteren ist eine umfassende Ausrüstung der Haushalte mit Wasserzählern und der Hausbehälter mit Schwimmerschiebern vorzunehmen (McIntosh, 2003; Myers, 2003).

Der Sektor wird über das Schließen der Sektorentrennschieber eingerichtet. Ab

diesem Zeitpunkt sollte mit dem Monitoring der Einspeisung und Rohrnetzabgabe sowie mit Druckmessungen begonnen werden, um Vergleichswerte zur kontinuierlichen Betriebsweise zu erhalten. Nach der Umstellung der Betriebsweise sind zunächst Programme zur Wasserverlustreduktion durchzuführen. Diese können später in die routinemäßige Instandhaltung integriert werden. Außerdem wird die Auslegung des Versorgungsnetzes schrittweise geprüft sowie die Kapazitäten und die Netztopologie an die Erfordernisse angepasst. Das Informationsbild des Netzes wird durch bedarfsgerechte Erhebungen und Dokumentationen bei der Durchführung der genannten Maßnahmen progressiv verbessert (s. Kap. 5.3).

Es ist empfehlenswert, die Betriebsweise in weiteren Sektoren erst dann umzustellen, wenn sich der Betrieb der Sektoren mit kontinuierlicher Versorgung stabilisiert hat. Die o.g. Schritte zusammenfassend, ergibt sich folgender allgemeiner Ablauf:

1. Ggf. Anpassung der Planung basierend auf Erkenntnissen aus Sektoren mit kontinuierlicher Betriebsweise
2. Ggf. Umsetzung der notwendigen Umstrukturierungsmaßnahmen
3. Vorbereitende Maßnahmen im Sektor (Entfernung illegaler Anschlüsse, Ausrüstung mit Hauswasserzählern, Ausrüstung der Hausbehälter mit Schwimmerschieber)
4. Einrichten des Sektors (hydraulische Trennung vom übrigen Versorgungsnetz)
5. Beginn des Monitoring
6. Umstellung der Betriebsweise
7. Instandhaltung und Wasserverlustreduktion als fortwährender Prozess
8. Bedarfsorientierte Anpassung der Netzkapazitäten

Auf Aspekte der einzelnen Schritte wird im Folgenden näher eingegangen.

### 5.8.2 Monitoring und Überwachung

Vor der Umstellung der Betriebsweise in einem Sektor ist in diesem ein Monitoring der Wassereinspeisung sowie der Wasserentnahme durch die Verbraucher einzurichten. Das Monitoring dient der Ermittlung folgender Parameter vor und nach der Umstellung der Betriebsweise:

- Rohrnetzeinspeisung
- Rohrnetzabgabe
- Wasserverluste
- Verbrauchsganglinien

Damit liefert das Monitoring notwendige Daten für die folgenden grundlegenden Aufgaben:

- Überwachung des Betriebs
- Wasserverlustreduktion
- Verbrauchsmanagement
- Anpassung der Umstrukturierungsplanung

Für die Ermittlung der Rohrnetzabgabe und des Wasserverbrauchs ist der Sektor mit Hauswasserzählern auszurüsten. Im Falle eines geplanten Verbrauchsmanagements mit volumetrischer Abrechnung ist ein Ausrüstungsgrad von 100 % anzustreben. Dienen die Zähler alleine der Datenerhebung, genügt eine repräsentative Auswahl von Haushalten.

Bei kontinuierlicher Versorgung entspricht die Rohrnetzabgabe dem Wasserverbrauch. Zur Erhebung können Hauswasserzähler zwischen der Hausanschlussleitung und der Hausinstallation angeordnet sein. Die Durchfluss- und Druckbedingungen im Netz ermöglichen den Einsatz herkömmlicher Wasserzähler mit mechanischem Messprinzip (Flügelradzähler). Voraussetzung ist, dass die Hausbehälter entweder durch deren Ausrüstung mit Schwimmerschiebern immer vollgefüllt und dadurch hydraulisch nicht relevant sind, mit einem Bypass umgangen werden oder komplett abgeschafft sind. Für die Ermittlung der Verbrauchsganglinien sind entweder die kumulativen Hauswasserzähler über einen Zeitraum z.B. stündlich abzulesen oder mit Datenloggern, die neben der Menge die Zeit speichern, auszustatten.

Bei intermittierender Versorgung werden die Hausbehälter jedoch genutzt. Die Rohrnetzabgabe entspricht zumindest in der zeitlichen Ausprägung nicht dem Wasserverbrauch. Zur Erhebung der Rohrnetzabgabe ist ein Wasserzähler zwischen Hausanschlussleitung und Hausinstallation bzw. Hausbehälter zu installieren. Allerdings können herkömmliche Flügelradzähler auf Grund der auftretenden Druckstöße, der Zweiphasenströmungen und im Wasser mitgeführter Partikel nicht eingesetzt werden. Die Druckstöße und Partikel im Wasser beschädigen die Zähler und ein Wasser-Luft-Gemisch führt zu Messfehlern (s. auch Kap. 4.5.4). Hauswasserzähler mit dem Fluidoszillationsmessprinzip garantieren hingegen die Messgenauigkeit und Langlebigkeit unter den genannten Bedingungen. Für die Ermittlung des Wasserverbrauchs und der Verbrauchsganglinie ist ein Wasserzähler nach dem Hausbehälter einzubauen. Auf Grund der hydraulischen Bedingungen, die einer kontinuierlichen Versorgung entsprechen, können herkömmliche Wasserzähler eingesetzt werden. Abbildung 5.9 zeigt die Anordnung der Hauswasserzähler zur Ermittlung der Rohrnetzabgabe, des Wasserverbrauchs und der Verbrauchsganglinie.

Für die Messung der Rohrnetzeinspeisung sind Großwasserzähler oder Durchflussmessgeräte vorzusehen. Verbrauchs- und Einspeisemengen gehen in die Wasserbilanz ein, die die Grundlage der Leckagekontrolle und Wasserverlustreduktion darstellt (s. Kap. 5.8.3 und 2.5.4). Für eine korrekte Aufstellung der Wasserbilanz müssen die illegalen Wasserentnahmen entweder bekannt oder vollständig eliminiert sein. Bei intermittierender Versorgung wird zur Gegenüberstellung der Rohrnetzeinspeisung und Rohrnetzabgabe auch deren zeitliche Ausprägung verlangt. Die erhobenen Daten sind für die Analyse größerer Zeiträume zu speichern.

### 5.8.3 Instandhaltung und Wasserverlustreduktion

Durch die ständige Wasserführung im Rohrleitungsnetz steigen die realen Wasserverluste nach Einführung einer kontinuierlichen Versorgung zunächst unweigerlich an. Die Einführung der kontinuierlichen Versorgung muss daher mit intensiven Maß-

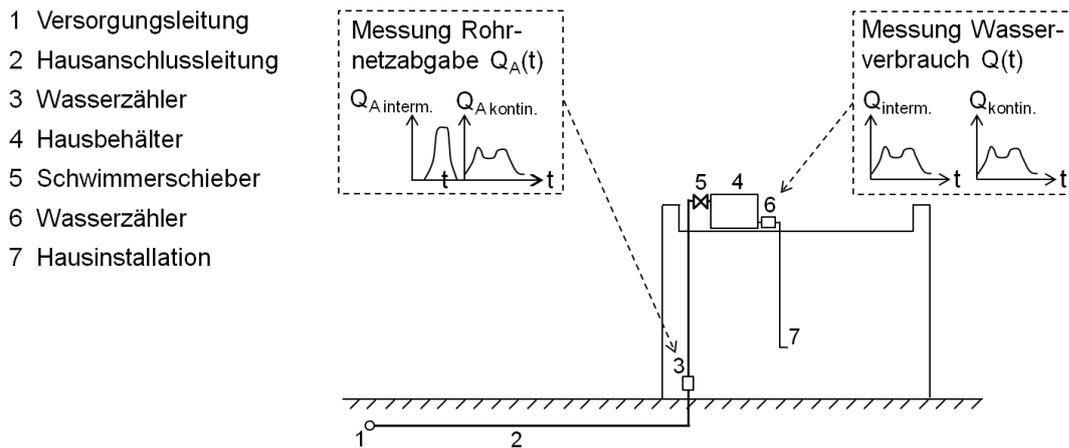


Abbildung 5.9: Anordnung der Hauswasserzähler zur Messung der Rohrnetzabgabe  $Q_A$  und des Wasserverbrauchs  $Q$

nahmen zur Wasserverlustreduktion einhergehen. Wie in Kapitel 4.5.4 diskutiert, ermöglicht erst die kontinuierliche Betriebsweise den effizienten Einsatz gängiger Leckageortungsverfahren. Die Methoden der Wasserverlustreduktion sind näher in Kapitel 2.5.4 beschrieben. Die Leckageortung und Wasserverlustreduktion sollten in eine routinemäßige Instandhaltung überführt werden. Auf die Methoden der Instandhaltung wird in Kapitel 2.5.3 eingegangen. Eine wichtige Grundlage für die Instandhaltungsmaßnahmen Wartung und Instandsetzung (Rehabilitation und nicht planbare Reparatur) stellt die Schadenstatistik dar.

Für den Aufbau einer Schadenstatistik sind die Schäden am Leitungsnetz zu charakterisieren und zu dokumentieren. In Kapitel 7.3 wird dazu eine standardisierte Vorgehensweise beschrieben. Das in Kapitel 6 dargestellte Datenmanagement-, Analyse- und Planungsinstrument umfasst Werkzeuge zur objektbezogenen Speicherung im Netzkataster sowie zur statistischen Analyse und Auswertung der erhobenen Schadensdaten. Die standardisierte Vorgehensweise und die Werkzeuge sind aufeinander abgestimmt.

Im Zuge der Wasserverlustreduktion und der routinemäßigen Instandhaltung, insbesondere bei der Reparatur, werden Leitungsabschnitte freigelegt. Dadurch besteht die Möglichkeit, die Systemdaten der Leitungsabschnitte ohne großen zusätzlichen Aufwand während der Durchführung dieser Maßnahmen zu verifizieren. Das im Netzkataster gespeicherte Informationsbild des Verteilungssystems wird dadurch sukzessive um die Versorgungsnetze der Sektoren erweitert. Auf die prozessorientierte Datenerhebung wird näher in Kapitel 5.3 bzw. in Kapitel 7.2 eingegangen.

#### 5.8.4 Anpassung der Kapazitäten des Versorgungsnetzes

Eine Anpassung der Kapazitäten des sektoriserten Versorgungsnetzes auf den Lastfall der kontinuierlichen Betriebsweise setzt umfassende Kenntnisse des bestehen-

den Versorgungsnetzes voraus. Diese sind aber erfahrungsgemäß unvollständig (s. Kap. 4.5.2) und eine Verifizierung und Aktualisierung des verfügbaren Datenbestands ist auf Grund der dazu notwendigen Zeit und Ressourcen meist nicht durchführbar. Die Versorgungsnetze der Sektoren werden daher bei der Umstrukturierung zunächst nicht berücksichtigt (s. Kap. 5.5.2). Die Umstrukturierung umfasst nur die Einrichtung von Zubringersystem, Druckzonen und Sektoren sowie die Hauptleitungen der Sektoren.

Die Versorgungsnetze der Sektoren werden sowohl je nach Bedarf als auch im Zuge routinemäßiger Netzmodifikationen, wie z.B. bei der Instandhaltung, an den neuen Lastfall angepasst. Hydraulische Defizite im Versorgungsnetz eines Sektors können über Messungen oder Kundenbeschwerden festgestellt werden. Zur Überprüfung des Versorgungsdrucks genügen temporäre Messungen, die 24 Stunden umfassen sollten. In Netzbereichen, in denen zu niedrige Drücke vorherrschen, sind die Leitungskapazitäten zu erhöhen. Zur Planung der Maßnahmen müssen nur die Netzdaten der betreffenden Bereiche gezielt erhoben werden. Bei der Überarbeitung der Versorgungsnetze sollten diese verästelt ausgeführt oder zumindest die Möglichkeit einer temporären Verästelung vorgesehen werden. Die Leckageortung und Überprüfung der Leistungsfähigkeiten ist in Verästelungsnetzen ungleich einfacher.

Zur Auslegung von Leitungsnetzen sind zahlreiche Ansätze in der Literatur bekannt (s. z.B. Agrawal u. a. (2007) oder Simpson (2000)). Auch das in Kapitel 6 beschriebene Instrument stellt eine Applikation zur kostenoptimalen Auslegung von Leitungsnetzen bei gegebenem Lastfall und unter Berücksichtigung bestehender Leitungen zur Verfügung (s. Kap. 6.4.5). Durch den Aufbau des Netzkatasters im beschriebenen Instrument ist der Datenbestand direkt für Analysen und Optimierungen verfügbar. Das Instrument verfügt darüber hinaus über weitere Anwendungen zur Analyse und Planung, wie z.B. die stationäre und zeitabhängige Simulation und die Graphendekomposition (s. Kap. 6.4.4 und 6.4.3).

## 5.9 Finanzielle Aspekte der kontinuierlichen Betriebsweise

Die Darstellung des Konzepts zur Einführung einer kontinuierlichen Betriebsweise in den vorhergehenden Kapiteln ist entsprechend der Zielsetzung auf den technischen Bereich beschränkt (s. Kap. 5.1). In diesem Kapitel werden abschließend einige finanzielle und institutionelle Aspekte der Einführung einer kontinuierlichen Betriebsweise, die einen direkten Bezug zur Umsetzung des Konzepts aufweisen, diskutiert.

Generell stellen mangelnde finanzielle Mittel für Investitionen sowie die ungenügende Deckung der Betriebskosten durch den Verkauf von Wasser eine bedeutende Hürde bei der Realisierung einer funktionierenden Wasserversorgung dar (Gadgil, 1998). Die Bereitstellung externer Mittel liegt meist nicht in der Hand des Wasserversorgers. Ist die nachhaltige Wasserversorgung über ein zentrales Verteilungssystem die Zielsetzung, müssen daher ausreichende Investitionsmittel, insbesondere zur

Finanzierung der Ertüchtigung eines bestehenden Systems, von Seiten der Stakeholder bereit gestellt werden.

Für eine kostendeckende Betriebsführung müssen auf politischer Ebene bzw. auf der Regulierungsebene die Voraussetzungen für eine autonome Tarifgestaltung der Wasserversorger geschaffen werden (Chea, 2007). Neben rein betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten stellt die Tarifgestaltung ein wichtiges Instrument des Verbrauchsmanagements dar, das lokale Gegebenheiten berücksichtigen muss und daher nicht von höherer Stelle vorgegeben werden kann. Die Tarifgestaltung als Methode des Verbrauchsmanagements kann für ein System z.B. in einem Pilotsektor ermittelt werden (s. Kap. 5.4).

Im Hinblick auf die Investitionskosten ist ein Vergleich der intermittierenden und kontinuierlichen Betriebsweise interessant. Allerdings ist solch ein Vergleich unter Vorbehalt zu sehen, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass ein Verteilungssystem bei beiden Betriebsweisen die gleiche Leistung erbringen kann. Dennoch lassen sich einige allgemeine Aspekte feststellen. Bei intermittierender Betriebsweise sind durch die größeren Belastungen des Systems die Instandhaltungskosten größer. Die realen Wasserverluste können effektiv nur bei kontinuierlichem Betrieb reduziert werden. Demnach sind die realen Wasserverluste und die damit verbundenen Kosten bei intermittierender Versorgung vergleichsweise größer. Durch den besseren Service ist bei kontinuierlicher Versorgung mit einer höheren Zahlungsbereitschaft zu rechnen. Außerdem ermöglicht eine kontinuierliche Versorgung eine effektive Kontrolle der Wasserentnahmen. Wasserdiebstahl und damit scheinbaren Wasserverluste sind demnach bei intermittierender Versorgung größer. Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass die intermittierende gegenüber der kontinuierlichen Betriebsweise mit mehr Kosten verbunden ist (McIntosh, 2003).

Myers (2003) stellt zudem fest, dass die Auslegung eines Systems auf eine intermittierende Betriebsweise auf Grund der notwendigen Systemkapazitäten höhere Kosten für die Infrastruktur mit sich bringt. Die Pumpkosten können durch ein gut ausgelegtes Zubringersystem, die Ausnutzung günstiger Tarife, Systemkonzepte mit Gegenbehältern oder innovativen energieeffizienten Ansätzen, z.B. zur Wassergewinnung oder zur dezentralen Energierückgewinnung, gesenkt werden. Beispielsweise stellt die Energieknappheit und der ineffiziente Systembetrieb für das regionale Wasserverteilungssystem Bribin auf Java in Indonesien die Hauptursache für Versorgungsunterbrechungen dar (Klingel u. a., 2009a). Ein innovatives Wasserkraftwerk zur Wassergewinnung und Wasserförderung ersetzt einen Großteil der ursprünglich benötigten, über Dieselgeneratoren oder das öffentliche Netz mit Energie versorgten Pumpen (Nestmann u. a., 2009).

Außerdem ist die intermittierende Versorgung auf der Verbraucherseite mit hohen Kosten verbunden, wie McIntosh (2003) feststellt. Die intermittierende Versorgung birgt die Notwendigkeit der Beschaffung zusätzlicher Infrastruktur in Form von Hausbehältern und privaten Pumpen durch die Verbraucher. Für den Betrieb von privaten Pumpen wird kostenintensive Energie benötigt. Außerdem muss oft ein Haushaltsmitglied zur Überwachung der Versorgungsperioden und zur Befüllung der Hausbehälter abgestellt werden. Dies trifft insbesondere arme Bevölkerungsteile,

die sich keine Schwimmerventile oder genügend große Behälter leisten können. Die Abstellung eines Haushaltsmitglieds resultiert wiederum in Verdienstaufschlägen des Haushalts. Oft sehen sich Verbraucher gezwungen zu bestechen, um überhaupt mit Wasser versorgt zu werden. Für arme Verbraucher kann dies einen immensen finanziellen Aufwand und damit deren Ausbeutung darstellen. Genügt die bereit gestellte Wassermenge nicht dem Bedarf, sind die Verbraucher außerdem auf mit Mehrkosten verbundene sekundäre Wassergewinnungen, z.B. private Brunnen, oder den Zukauf von Wasser, z.B. aus Tankwagen oder in Flaschen, angewiesen. Bei intermittierender Versorgung kann eine einwandfreie Wasserqualität nicht gewährleistet werden. Die Behandlungskosten wasserübertragener Krankheiten oder die mit einer Krankheit verbundenen Verdienstaufschläge stellen weitere finanzielle Belastungen für den Verbraucher dar. Aus ökonomischer Sicht sind die unsichere Versorgungssituation und die finanziellen Belastungen durch eine intermittierende Versorgung für den häuslichen und industriellen Verbraucher ein generelles Hemmnis für die wirtschaftliche Entwicklung des Versorgungsgebiets.

# 6 Integriertes Datenhaltungs-, Analyse- und Planungsinstrument

## 6.1 Zielsetzung und Überblick

Auf Grund von Instandhaltungsarbeiten und Netzerweiterungen unterliegt das technische System Wasserverteilungsnetz ständigen dynamischen Veränderungen (Rocher, 2000). Detaillierte und aktuelle Systemkenntnisse sind daher für alle technischen und betrieblichen Maßnahmen und letztendlich für eine nachhaltige Wasserverteilung unabdingbar. In den entwickelten Ländern werden seit Jahren Werkzeuge wie Geoinformationssysteme und hydraulische Modelle zur Analyse, Planung und Betriebsunterstützung zentraler Wasserverteilungssysteme erfolgreich eingesetzt (Trifunovic und Vairavamoorthy, 2008). Um Redundanzen und Widersprüche in der Datenbasis zu vermeiden, ist es dabei von Vorteil die Systemdaten in einem zentralen Netzkataster zu pflegen und zu aktualisieren.

Wie die in Kapitel 4 zunächst spezifisch für das dargestellte Fallbeispiel Béni Abbès analysierten und dann verallgemeinert dargestellten Mängel in der Datenhaltung und Netzplanung zeigen, werden im Gegensatz zu den entwickelten Ländern diese Werkzeuge in Entwicklungsländern nur selten effizient eingesetzt. Im Falle einer ineffizienten Nutzung sind meist die Werkzeuge und ihre Vorteile nicht bekannt oder werden nicht erkannt. Als Konsequenz werden digitale Datenhaltungen, z.B. in einem Netzkataster, gar nicht geführt. Sind solche Werkzeuge bekannt, sind die Erwartungen an mögliche, automatisiert ermittelte Ergebnisse sehr hoch. Im Widerspruch dazu steht ein mitunter ungenügendes theoretisches Wissen, das zur Interpretation modellbasierter Berechnungsergebnisse notwendig ist. Folglich stellen Defizite in der Ausbildung oder in der Verfügbarkeit von adäquat ausgebildetem Personal den zweiten Grund für die ineffiziente oder falsche Umsetzung und Anwendung solcher Werkzeuge dar. Die dritte Ursache ist der Umstand, dass die Werkzeuge, wenn genutzt, üblicherweise getrennt mit jeweils einer eigenen Datenbasis implementiert sind. Dies führt gewöhnlich zu Redundanzen und Widersprüchen in den Datengrundlagen und zu aufwändigen und komplizierten Datentransferprozessen.

Mängel in der Datenhaltung führen unweigerlich zu einer mangelhaften Netzplanung und damit zu einer eingeschränkten Umsetzung angepasster Systemkonzepte (s. Kap. 4 und 5). D.h. im Umkehrschluss, eine funktionierende Datenhaltung und die Verfügbarkeit adäquater Planungswerkzeuge sind Voraussetzungen für die Umsetzung angepasster Systemkonzepte und für die Einführung eines nachhaltigen technischen Betriebs.

Die Koppelung des Netzkatasters, des Geoinformationssystems und des hydraulischen Modells sowie die Anpassung des daraus resultierenden integrierten Werkzeugs an die für Entwicklungsländer typischen technischen und sozioökonomischen Gegebenheiten schaffen für die oben beschriebene Problematik Abhilfe. Des Weiteren sind für die nachhaltige Nutzung des Werkzeugs die notwendige Datenerhebung und Aktualisierung zu gewährleisten.

Dieses Kapitel beschreibt die Konzeption und Umsetzung eines neuen, an die Anforderungen in Entwicklungsländern angepassten Datenmanagement-, Analyse- und Planungsinstruments für Wasserverteilungssysteme<sup>1</sup>. Das integrierte Instrument umfasst Werkzeuge zur Datenaufbereitung und Modellierung, zur Datenhaltung sowie zur Analyse der Systemdaten und Berechnung des hydraulischen Systemverhaltens. Um die Nachhaltigkeit der Anwendung zu gewährleisten, sind mit dem integrierten Instrument standardisierte Arbeitsprozesse für die notwendige Datenerhebung und Datenaktualisierung verknüpft.

Die Konzeption des integrierten Instruments sowie der verknüpften Arbeitsprozesse basiert auf den Erkenntnissen der in Kapitel 4 dargestellten Mängelanalyse und bietet einen Lösungsansatz für die dort genannte Problematik der Datenhaltung sowie eine praktikables Werkzeug für die Netzanalyse und -planung. Damit stellt das integrierte Instrument ein adäquates Hilfsmittel zur Planung und Umsetzung eines angepassten Systemkonzepts und einer kontinuierlichen Betriebsweise dar (s. Kap. 5). Das integrierte Instrument wurde zunächst für die Anwendung im Fallbeispiel Béni Abbès entwickelt, wo es als zentrale Datenhaltung implementiert ist und zur Planung der Einführung einer kontinuierlichen Betriebsweise eingesetzt wird.

Im Weiteren wird zunächst in Kapitel 6.2 die Programmarchitektur des aus verschiedenen Komponenten bestehenden integrierten Instruments dargestellt. In den darauf folgenden Kapiteln werden die einzelnen Komponenten und die Realisierung ihrer Integration (s. Kap. 6.3 bis Kap. 6.7) beschrieben. Die Funktionalitäten des resultierenden Werkzeugs fasst das abschließende Kapitel 6.8 zusammen. Die Anwendung des integrierten Instruments im Fallbeispiels Béni Abbès wird ebenfalls in Kapitel 6.8 kurz umrissen. Auf detaillierte Darstellungen der Anwendungen im Fallbeispiel wird dort verwiesen. Die verknüpften Arbeitsprozesse sowie deren Umsetzung in Béni Abbès sind in Kapitel 7 dargestellt. Zudem ist das integrierte Instrument, die verknüpften Arbeitsprozesse sowie dessen Anwendung in mehreren Artikeln beschrieben (Klingel und Guth, 2009; Klingel und Deuerlein, 2008; Klingel u. a., 2007a).

## 6.2 Programmarchitektur

Das integrierte Instrument besteht aus verschiedenen Komponenten. Zum einen wurden bereits existierende Komponenten, die für sich eigenständige Anwendungen darstellen, angepasst oder erweitert und integriert. Zum anderen wurden Anwendungen

---

<sup>1</sup>Das Werkzeug wird im Folgenden kurz integriertes Instrument genannt.

sowie die Schnittstellen und Funktionen der eigentlichen Integration neu entwickelt und implementiert.

Bestehende Hauptkomponenten, die angepasst oder erweitert integriert wurden, sind eine Geodatenbank, das GIS-Programmpaket ArcGIS<sup>2</sup>, das hydraulische Analysemodell KANET<sup>3</sup> und die hydraulische Simulationssoftware EPANET<sup>4</sup>.

Alle Daten werden in einer relationalen Datenbank gespeichert. Für die Datenspeicherung wird das *geodatabase*-Konzept von ArcGIS genutzt, das eine Bearbeitung und Visualisierung der Daten in der ArcGIS Applikation *ArcMap* ermöglicht. Allgemeine Raumdaten können mit den Funktionalitäten von ArcGIS verwaltet und analysiert werden. Für die Verwaltung der Systemdaten eines Wasserverteilungsnetzes wurden neue Funktionen entwickelt. Die Funktionen für das Systemdatenmanagement, die Funktionen von KANET sowie weitere, neu entwickelte Funktionen für die Datenaufbereitung und Modellierung kommunizieren mit der Datenbank und *ArcMap* über neu entwickelte Schnittstellen. Die Integration von EPANET ist über die direkte Kommunikation mit KANET realisiert. Die Benutzeroberfläche von *ArcMap* wurde um Werkzeuge und Dialoge der integrierten Komponenten (Wasserverteilungssystem-Fachschaale) erweitert.

Abbildung 6.1 zeigt eine schematische Übersicht der Programmarchitektur. Die Komponenten sind als Dynamic Link Libraries (DLLs)<sup>5</sup> in die Programmarchitektur integriert. Die Funktionen der Komponenten können über eine in der Programmiersprache Visual Basic umgesetzten ActiveX Dynamic Link Library angesprochen werden. Zur EPANET-DLL werden die Daten über die KANET-DLL transferiert. Die Funktionen der ActiveX-DLL sind als Befehle implementiert, welche die ArcGIS Bibliothek *ArcObjects* für die Kommunikation mit den anfragenden Applikationen benutzen. Damit dient die auf *ArcObjects* basierende ActiveX-DLL als Schnittstelle zwischen der Datenbank, der Benutzeroberfläche von *ArcMap* und den DLLs der einzelnen Anwendungskomponenten.

Das integrierte Instrument ermöglicht damit die Verwaltung und Analyse allgemeiner Raumdaten mit den Funktionalitäten von ArcGIS, effiziente Datenaufbereitung und Modellierung mit den hierfür entwickelten Werkzeugen, die Verwaltung der Daten des Verteilungssystems und objektbezogene Informationsausgaben über die integrierte Wasserverteilungssystem-Fachschaale sowie die Analyse der Netztopologie und die Berechnung des hydraulischen Systemzustands über die Funktionalitäten des Modells KANET. Außerdem können über die integrierte Version des Programms EPANET die Systemdaten in das EPANET-Datenformat exportiert und Rechenzeiten bei der Ermittlung des hydraulischen Systemzustands optimiert werden.

In den nächsten zwei Kapiteln werden zunächst die für die Konzeption des inte-

<sup>2</sup>ArcGIS wird von der Firma ESRI Deutschland GmbH entwickelt.

<sup>3</sup>KANET ist eine Entwicklung des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie.

<sup>4</sup>EPANET wird von der US-Umweltbehörde Environmental Protection Agency (EPA) entwickelt und ist als *Open Source*-Projekt frei verfügbar.

<sup>5</sup>Dynamic Link Library (DLL) bezeichnet allgemein eine dynamische Bibliothek, die aus Programmcode, Daten und Ressourcen bestehen kann.

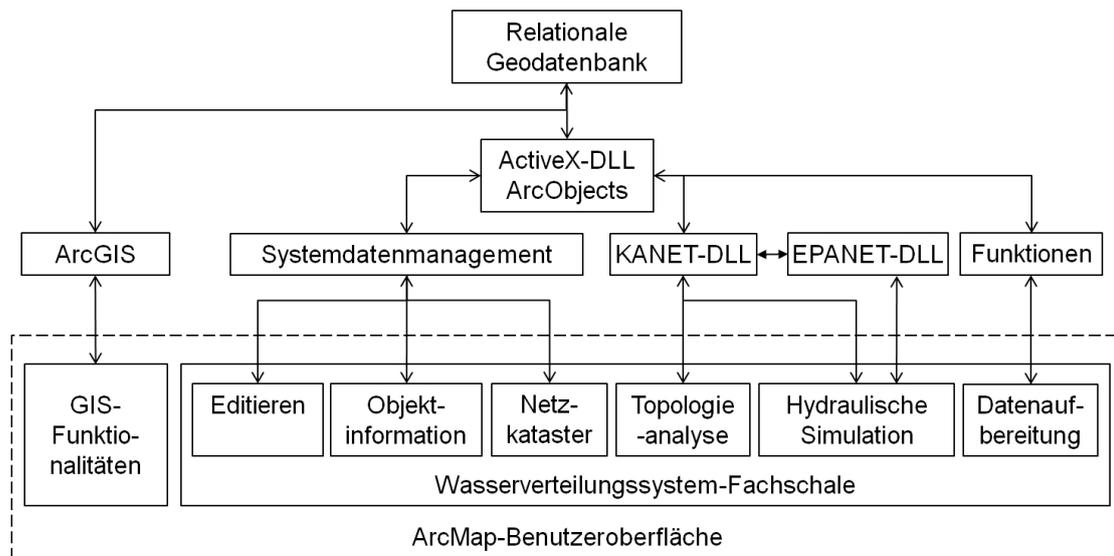


Abbildung 6.1: Programmarchitektur

grierten Instruments notwendigen theoretischen Hintergründe und Funktionalitäten der Hauptkomponenten ArcGIS und KANET dargestellt (s. Kap. 6.3 und 6.4). Anschließend wird die Integration der beiden Komponenten sowie die Realisierung der zentralen Datenhaltung beschrieben (s. Kap. 6.5). Die für das Verständnis notwendigen Grundlagen der Modellierung sind in Kapitel 3 dargestellt. Kapitel 6.6 beschreibt die Integration von EPANET, Kapitel 6.7 die neu entwickelten Werkzeuge zur Datenaufbereitung und Modellierung sowie deren Integration als eigenständige Applikationen. Kapitel 6.8 gibt einen Überblick über die Werkzeuge des integrierten Instruments.

## 6.3 Das Geoinformationssystem ArcGIS

### 6.3.1 Die Produktfamilie ArcGIS

Unter dem Begriff ArcGIS werden verschiedene, aufeinander abgestimmte GIS-Produkte der weltweit vertretenen Firma ESRI zusammengefasst. Die in den folgenden Abschnitten und Kapiteln dargestellten Erläuterungen beziehen sich auf die Version ArcGIS 9.2. Eigennamen und Bezeichnungen, die sich ausschließlich auf ArcGIS beziehen, sind im folgenden kursiv gedruckt.

Die eigentlichen Arbeitsplatzanwendungen sind unter dem Begriff *ArcGIS Desktop* zusammengefasst. *ArcGIS Desktop* ist entsprechend des jeweiligen Funktionsumfangs in den Lizenztypen *ArcInfo* mit voller Funktionalität, *ArcEditor* und *ArcView* als Basisversion erhältlich. Die *ArcGIS Desktop*-Produkte verfügen über die Applikationen *ArcMap* und *ArcCatalog*. *ArcMap* unterstützt die Visualisierung, die raumbezogene Datenanalyse sowie das Editieren von Geodaten und verknüpfter Sachdaten.

*ArcCatalog* ist die Anwendung für das Verwalten der Geodaten. Als Erweiterung zu den standardmäßig enthaltenen Funktionalitäten der Desktop-Anwendungen ist z.B. für die Bearbeitung und Visualisierung dreidimensionaler Objekte die Anwendung *ArcScene* erhältlich. In Ergänzung dazu ist mit dem *ArcReader* eine reine Auskunftslösung zur Visualisierung von Geodaten frei verfügbar.

*ArcObjects* ist eine Bibliothek von GIS-Funktionen, die die Grundlage aller Desktop-Anwendungen darstellt. Das *ArcObjects* Objektmodell kann als integraler Bestandteil von *ArcGIS Desktop* zu dessen Anpassung oder Weiterentwicklung verwendet werden.

ArcGIS sieht in der Regel eine Datenspeicherung in relationalen Datenbanken, wie z.B. eine Microsoft Access Datenbank, vor. Es ist aber auch möglich Dateien, wie z.B. *shape*-Dateien, zu verwenden. Für Serveranwendungen ermöglicht und verwaltet *ArcSDE* den Zugriff verschiedener Arbeitsplätze mit Desktop-Anwendungen (*ArcReader*, *ArcView*, *ArcEditor* oder *ArcInfo*) auf eine serverbasierte Geodatenbank. Ab der Version 9.2 ist *ArcSDE* in die Lizenztypen der Desktop-Anwendungen integriert.

Im Folgenden werden die ArcGIS-Komponenten näher erläutert, die für das in dieser Arbeit beschriebene integrierte Instrument relevanten sind. Weitere detaillierte Informationen zu den ArcGIS-Produkten finden sich auf der Webseite der Firma ESRI (Deutsche Vertretung: [www.esri.de](http://www.esri.de)) und in der Fachliteratur, z.B. bei Ormsby u. a. (2004).

### 6.3.2 Das Objektmodell *ArcObjects*

*ArcObjects* ist eine umfangreiche Bibliothek, die aus einer Vielzahl von Funktionen für die Entwicklung von GIS-Anwendungen besteht. *ArcObjects* stellt die Grundlage von ArcGIS dar. *ArcObjects* wurde als Microsoft Component Object Model (COM) Technologie entwickelt. Bestehende ArcGIS-Applikationen können unter Verwendung von *ArcObjects* verändert und erweitert werden. Außerdem können auf der COM Technologie basierende Neuentwicklungen in ArcGIS integriert werden. Im Folgenden wird kurz die COM Technologie erläutert.

Das Component Object Model (COM) der Firma Microsoft stellt einen Standard für die Kommunikation binärer Dateien dar. Binäre Dateien werden als Komponenten bezeichnet, die bestimmte Eigenschaften und Schnittstellen besitzen. Die voneinander unabhängige Entwicklung der Komponenten und ihre Fähigkeit, standardisiert Informationen auszutauschen, ermöglicht flexible Programmentwicklungen, bei denen die Komponenten als Bausteine genutzt werden. Das COM ist objektorientiert und besteht daher aus Klassen, Objekten und Klienten. Klassen werden als Server, meist DLLs, zusammengefasst, die den Klienten die Erstellung von Objekten aus dessen Klassen ermöglichen. Der Server stellt dem Klienten Funktionen zur Verfügung. Dabei kann der Server gleichzeitig auch Klient eines anderen sein. Bei der COM Technologie sind die Schnittstellen, d.h. die Definition der Eigenschaften und Methoden sowie deren Parameter, ein eigener, von der eigentlichen Implementierung getrennter Datentyp. Einmal definiert, werden die Schnittstellen nicht mehr

verändert. Damit können sich die Klienten unabhängig von der Umsetzung und Weiterentwicklung der Eigenschaften und Methoden an einer Schnittstelle orientieren.

*ArcObjects* stellt also eine Sammlung von COM Servern dar, die dem Nutzer (Klienten) eine Vielzahl an Eigenschaften und Methoden für die GIS-Entwicklung zur Verfügung stellen. Der Umfang von *ArcObjects* ist im Rahmen dieser Arbeit nicht repräsentativ darzustellen. Deshalb wird auf die existierende Literatur und auf das Hilfesystem *ArcGIS Developer Help* verwiesen. Höck und Manegold (2006) beschreiben z.B. detailliert *ArcObjects* sowie dessen Basis, die COM Technologie. Die auch im Internet verfügbare *ArcGIS Developer Help*<sup>6</sup> gibt eine Einführung in die GIS-Entwicklung mit *ArcObjects* und beschreibt die ArcGIS-Architektur mit insgesamt 66 Bibliotheken für die ArcGIS-Plattform und *ArcGIS Desktop*.

### 6.3.3 Datenkonzept

Die drei grundlegenden Arten der Abbildung realer, raumbezogener Daten werden von *ArcGIS Desktop* unterstützt:

- Abbildung geometrischer Objekte als Vektordaten
- Abbildung flächenhafter Elemente als Rasterdaten
- Abbildung einer Fläche als TIN

In ArcGIS werden geometrische Objekte als *feature classes*, Rasterdaten als *raster datasets* und trianguläre irreguläre Netzwerke als *TIN datasets* modelliert. Sachdaten sowie die Eigenschaften von Geometrieobjekten (*attributes*) werden in Tabellen (*tables*) verwaltet. Die Vektor-, TIN- und Rasterdaten können mit Sachdaten verknüpft sein. Die einzelnen Datentypen sind näher im Kapitel 2.5.5.2 beschrieben. Die Umsetzung von Vektorobjekten und Sachdaten im Datenkonzept von ArcGIS ist im Folgenden erläutert. Auf die detaillierte Darstellung der *raster datasets* und *TIN datasets* wird verzichtet.

**Features:** In ArcGIS werden geometrische Objekte, d.h. Vektordatenelemente, ganz allgemein als Geometrieobjekte (*features*) bezeichnet. Ein *feature* wird zunächst nur über die Form und Lage definiert. Features können die drei Grundformen (*simple features*) Punkt, Linie oder Polygon besitzen. Des Weiteren existieren die Objekttypen Multipunkt, Beschriftung, Dimension und Multifläche. Ihre Bedeutungen sind in Tabelle 6.1 erläutert. Die Geometrie der *features* wird im Wesentlichen durch die Koordinaten der Stützpunkte (*vertices*) und die durch die Stützpunkte aufgespannten Segmente (*segments*) definiert. Die Segmente können dabei geradlinig oder über Parameter definierte Kurven sein. Für ihre Definition im dreidimensionalen Raum können Stützpunkte, zusätzlich zu den Koordinaten, Höheninformationen (*z-values*) besitzen.

---

<sup>6</sup>URL der *ArcGIS Developer Help*: [http://resources.esri.com/help/9.3/arcgisdesktop/com/vb6\\_start.htm](http://resources.esri.com/help/9.3/arcgisdesktop/com/vb6_start.htm)

Tabelle 6.1: Die ArcGIS Geometrieobjekte (*features*)

Objekttyp	Bezeichnung	Beschreibung
Punkt	<i>point feature</i>	Punkte sind Objekte mit Raumbezug, die zu klein sind um als Linien oder Polygone dargestellt zu werden
Linie	<i>line feature</i>	Linienobjekte haben einen Anfangs- und Endpunkt und können Stützpunkte besitzen
Polygon	<i>polygon feature</i>	Polygone stellen Flächen dar, indem Linien mit gleichem Anfangs- und Endpunkt die Flächenelemente umfassen
Multipunkt	<i>multipoint feature</i>	Multipunktobjekte stellen im Gegensatz zu Punktobjekten eine Sammlung von Punkten dar
Beschriftung	<i>annotation feature</i>	Beschriftungsobjekte stellen Textobjekte mit Lage und Form dar
Dimension	<i>dimension feature</i>	Dimensionsobjekte sind spezielle Beschriftungsobjekte, die die Distanz zwischen Objekten oder die Länge von Objekten darstellen
Multifläche	<i>multipatch feature</i>	Multiflächen beschreiben die Oberflächen diskreter, dreidimensionaler Objekte

**Feature classes:** *Features* mit gleichem Geometrietyp und identischer Eigenschaftsstruktur werden in Objektklassen (*feature classes*) zusammengefasst (s. Abb. 6.2). *Feature classes* enthalten also neben den geometrischen Informationen die Eigenschaften der gleichartigen *features*. Die *features* einer *feature class* und ihre Eigenschaften (*attributes*) sind dabei in Tabellen organisiert. In der Tabelle stellt jedes *feature* ein Objekt (eine Zeile der Tabelle) mit einer eindeutigen Bezeichnung (*object ID*), der Geometrieinformation (*shape*) und einer unbegrenzten Anzahl von Eigenschaften dar.

**Feature datasets:** Ein *feature dataset* fasst *feature classes* mit gleichem Raumbezug und gleicher Ausdehnung zusammen (s. Abb. 6.2). Die *feature classes* können dabei unterschiedliche Geometrietypen besitzen. *Feature datasets* können für die Datenorganisation, ähnlich eines Ordners in Microsoft Windows, für die Verwaltung von Zugriffsrechten auf die Daten des *feature datasets* oder für die Modellierung logischer Zusammenhänge der zusammengefassten *feature classes* genutzt werden. Für die Modellierung logischer Zusammenhänge verfügt ArcGIS über die Konzepte Topologie (*topology*), Netzwerkdaten (*network dataset*), geometrisches Netzwerk (*geometric network*) und Oberflächendaten (*terrain dataset*).

Das Konzept der *topologies* verknüpft *features* logisch. Durch die logische Verknüpfung können Datenkonsistenz gewährleistet, das Editieren vereinfacht und logische Beziehungen modelliert werden. Z.B. kann die Geometrie verschiedener Objekte verknüpft werden. Wird ein *feature* oder ein Stützpunkt eines *feature* verändert, werden die Koordinaten aller logisch verknüpften *features* oder deren Stützpunkte analog verändert. Das Konzept der *network datasets* wird für die Flussmodellierung in Netzen verwendet. Dazu sind drei Elemente notwendig. Kanten (*edges*) stellen die Verbindungsstrecken zwischen Verzweigungen (*junctions*) dar. Dabei werden die Kanten als *line feature classes* und die Verzweigungen als *point feature classes* abgebildet. Informationen und Regeln über Flüsse einer Ressource im Netz und die damit verbundenen Kosten können optional in so genannten *turns* modelliert werden. Das Konzept der *geometric networks* ermöglicht die Modellierung realer Netzwerke, wie z.B. Gas- oder Wasserversorgungsnetze, für Konnektivitäts- und Flussanalysen. Ähnlich eines *network dataset* wird das Netz aus Kanten und Verzweigungen modelliert. Die Konnektivität wird über die Eigenschaften der abbildenden *features* und die Topologie des Netzes definiert. Das Konzept der *terrain datasets* stellt keine Modellierung einer Oberfläche als TIN oder Raster im eigentlichen Sinn dar. Vielmehr wird ein bestehendes TIN mit Regeln für die effiziente, z.B. maßstabsabhängige Darstellung referenziert.

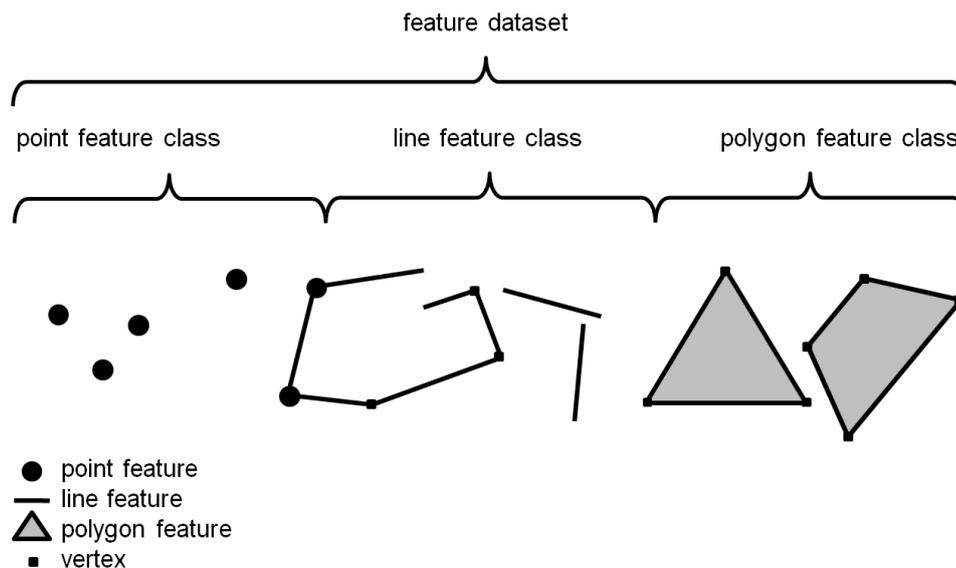


Abbildung 6.2: Das Konzept der features, feature classes und feature datasets

**Tables:** Sachdaten und Daten von *feature classes* werden in Tabellen organisiert. Die Tabellen basieren auf dem Konzept relationaler Daten. Aufbau und Organisation der Tabellen lassen die Auswertung der Tabellen über relationale Funktionen und Befehle (z.B. über die Datenbanksprache SQL) zu. Die Tabellen bestehen aus Zeilen, die alle die gleichen Spalten haben. Für jede Spalte ist ein Datentyp (Zahl,

Text, Datum, Binärinformationen für Symbole (BLOB) oder Bezeichnungsformate (GlobalID und GUID)) definiert. Die Tabelle einer *feature class* enthält neben den Attributspalten eine Spalte, in der die Geometrie (Form und Lage) der *features* gespeichert ist.

Weitere, detaillierte Informationen zu den Geometrieobjekten und Sachdaten in ArcGIS sind auf der Internetseite der *ArcGIS Desktop Help*<sup>7</sup> und in der Fachliteratur, z.B. bei Zeiler (1999), zu finden.

### 6.3.4 Das Datenbankformat *geodatabase*

Von der Firma ESRI wurden drei Formate für die Verwaltung von Vektordaten entwickelt (Geoinformatik GmbH, 2005). Das *Coverage*-Format speichert die Raum- und Sachinformationen sowie Topologien von Objekten. Die Objekte werden dabei mit *feature classes* abgebildet. Die Topologie beschreibt die Beziehung der Objekte. Ein zweites Format ist das so genannte *shapefile*, das aus mehreren Dateien besteht. In *shapefiles* können die Raum- und Sachinformationen von *simple feature classes* (Klassen mit *point*, *line* und *polygon features*) gespeichert werden. Das *shapefile* hat sich zum Standard für den Austausch von Geodaten entwickelt. Eine relativ neues Datenformat (seit Version 8), oder vielmehr Datenkonzept, ist die *geodatabase*.

Die *geodatabase* ist ein objektorientiertes, relationales Datenbankformat, das Serverlösungen und Arbeitsplatzlösungen (*personal geodatabase*) unterstützt. Für die Umsetzung einer Serverlösung sind generell relationale Datenbanksysteme (z.B. Oracle oder Microsoft SQL Server) geeignet. Eine *personal geodatabase* wird als Microsoft Access Datenbank angelegt. In einer *geodatabase* können *feature classes*, *raster datasets* und *tables* verwaltet werden. *Feature classes* können dabei ähnlich einer Ordnerstruktur in *feature datasets* organisiert werden. Die Datensätze werden in der Datenbank in Tabellen gespeichert. Jede Zeile einer Tabelle stellt ein Objekt dar. Z.B. stellt bei einer *feature class* jede Zeile ein *feature* dar. Eindeutige Bezeichnungen (IDs), die Geometrien sowie die Attribute der Objekte sind in den Spalten der Tabelle gespeichert.

### 6.3.5 *ArcGIS Desktop* und die Applikationen *ArcCatalog* und *ArcMap*

*ArcGIS Desktop* basiert wie alle ArcGIS Produkte auf *ArcObjects* und ist in den Lizenztypen *ArcInfo*, *ArcEditor* und *ArcView* erhältlich, wobei *ArcView* die Basisversion darstellt. Für das im Folgenden beschriebene integrierte Instrument ist der Typ *ArcView* ausreichend. Deshalb werden die hier dargestellten Eigenschaften von *ArcGIS Desktop* auf den Lizenztyp *ArcView* beschränkt. *ArcGIS Desktop* besteht aus

<sup>7</sup>URL der *ArcGIS Desktop Help*: <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>

den zwei Arbeitsplatzanwendungen *ArcCatalog* für die Organisation und Verwaltung sowie *ArcMap* für die Visualisierung, Editierung und Analyse von Geodaten.

**ArcCatalog:** *ArcCatalog* stellt die Applikation für die Verwaltung raumbezogener Daten dar. *Feature classes* können definiert und in *feature datasets* organisiert werden. In *ArcCatalog* werden die Attribute und deren Datentyp und Bezeichnung, der Raumbezug (Koordinatensystem bzw. Projektion) und die Ausdehnung der *feature classes* festgelegt. Des Weiteren können *shapefiles*, *raster datasets* und *TIN datasets* angelegt und verwaltet sowie Daten exportiert und importiert werden. Darüber hinaus steht mit der integrierten *ArcToolbox* eine Sammlung von Funktionen zur Analyse und Bearbeitung von Geodaten zur Verfügung. Abbildung 6.3 zeigt die Benutzeroberfläche von *ArcCatalog*. Weitere Informationen und Hintergründe zur Applikation *ArcCatalog* werden z.B. von Liebig und Mummert (2008a) und der Geoinformatik GmbH (2005) gegeben.

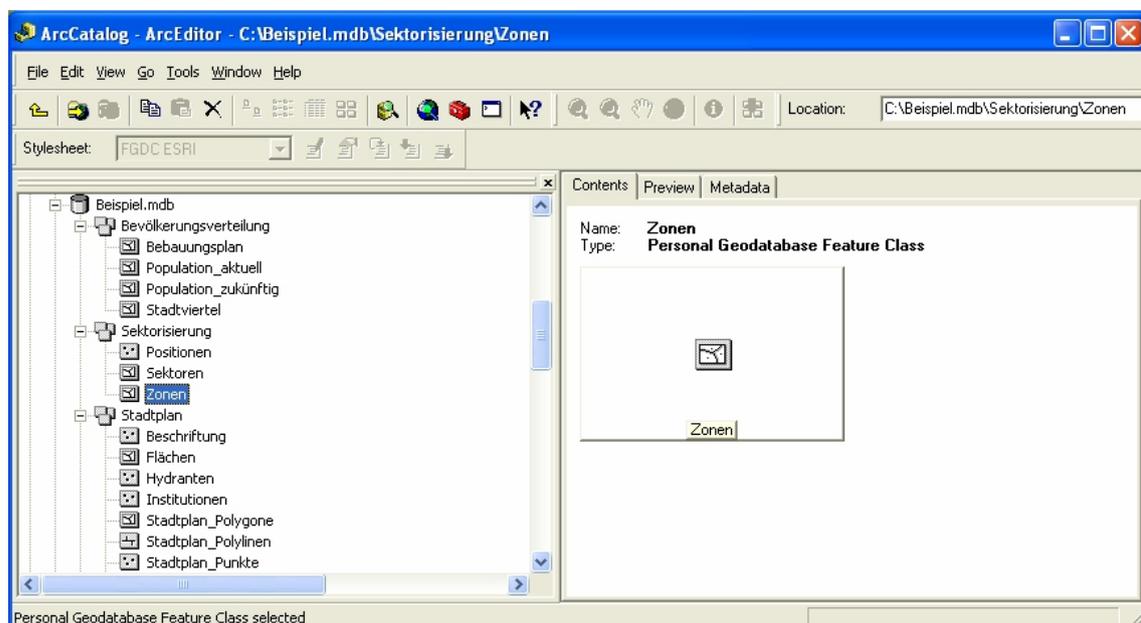


Abbildung 6.3: Benutzeroberfläche von *ArcCatalog*

**ArcMap:** *ArcMap* stellt die zentrale Anwendung von ArcGIS dar. Eine Vielzahl von Funktionen ermöglicht

- die benutzerdefinierte Datenvisualisierung (Layout),
- die Editierung der eingebundenen Daten,
- die Analyse der eingebundenen Daten sowie
- das Exportieren und Drucken von erstellten Layouts.

Die Benutzeroberfläche von *ArcMap* besteht aus einer Hauptmenüleiste mit grundlegenden Funktionen sowie einer Vielzahl themenbezogener Werkzeugleisten,

einem Inhaltsfenster, in dem die Darstellung der Daten organisiert wird, sowie dem eigentlichen Datenfenster, in dem Daten visualisiert werden. Wie in *ArcCatalog* ist auch in *ArcMap* die *ArcToolbox* für die Analyse raumbezogener Daten integriert. Abbildung 6.4 zeigt die Benutzeroberfläche von *ArcMap* mit der Hauptmenüleiste, den Inhalts- und Datenfenstern sowie zwei eingebundenen Werkzeugleisten (Standardfunktionen und Navigationswerkzeuge).

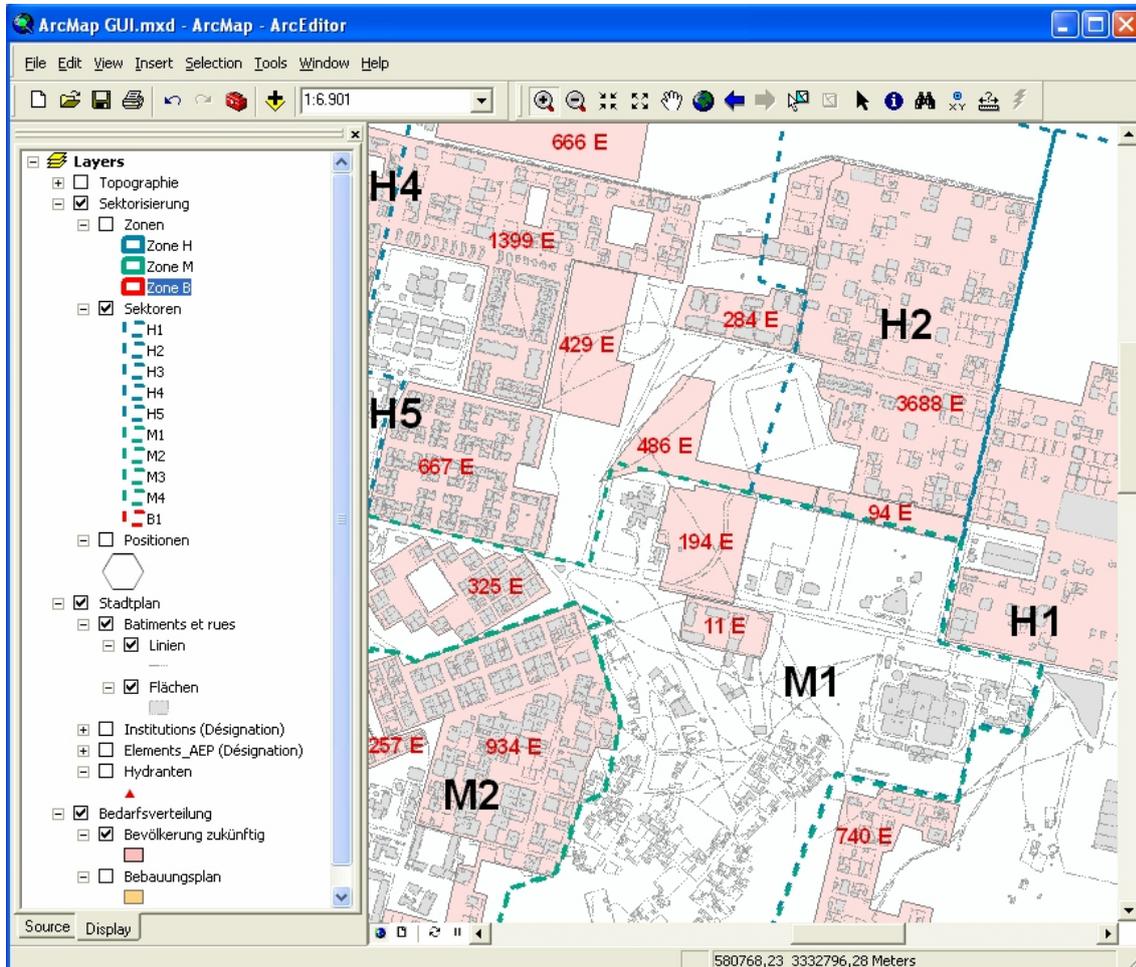


Abbildung 6.4: Benutzeroberfläche von *ArcMap*

Daten können aus unterschiedlichen Datenquellen, z.B. aus verschiedenen *geodatabases* oder *shapefiles*, eingebunden werden. Die eingebundenen Daten können unabhängig von den Datenquellen in Ebenen (*layer*) organisiert und visualisiert werden. Die Geometrie und Lage der eingebundenen Elemente sind gegeben. Die Darstellung, z.B. die Farbe, Transparenz und Linienstärke, kann benutzerspezifisch gewählt werden.

Des Weiteren können Attribute der Elemente als Texte visualisiert werden. In Abbildung 6.4 werden z.B. die Bezeichnung der Sektoren sowie die Anzahl der Einwohner angezeigt. Die Struktur der Ebenen ist im Inhaltsfenster dargestellt und kann

dort geändert werden. Die Einbindung der Daten sowie deren Darstellung kann als *ArcMap*-Projekt<sup>8</sup> gespeichert werden.

Für die Erstellung eines Layouts stehen dem Nutzer eine eigene Ansicht und zahlreiche Werkzeuge zur Verfügung. In einem Datenrahmen kann der in einer Druckvorlage zu verarbeitende Bereich der eingebundenen Daten festgelegt werden. Zusätzlich können Titel, Legenden, Maßstabsleisten, Nordpfeil, Planstempel, Logos und Kartenrahmen erstellt und platziert werden. Das entworfene Layout kann gedruckt oder in andere Dateiformate exportiert werden. Die Funktionalitäten sind im Einzelnen in der Fachliteratur, z.B. von Liebig und Mummenthey (2008a) und Ormsby u. a. (2004), beschrieben.

*ArcMap* verfügt des Weiteren über umfangreiche Funktionen zur Geoverarbeitung. Durch bestimmte, als Werkzeuge zur Verfügung stehende Operationen werden aus eingebundenen Geo- und Sachdaten neue Informationen bzw. Daten entwickelt. Daten können dabei über ihren Raumbezug verknüpft und analysiert werden. Über die Verknüpfung von Attributdaten können Sachdaten einen Raumbezug erlangen, d.h. Geodaten erzeugt werden. Die Geoverarbeitung stellt zusammen mit dem Datenmanagement die Kernfunktionalität eines GIS dar und hebt dieses von reinen Konstruktions- und Visualisierungswerkzeugen wie z.B. CAD-Programmen ab. Liebig und Mummenthey (2008b) beschreiben ausführlich die Geoverarbeitung mit *ArcMap*.

Außerdem können mit *ArcMap* die Geometrie und Lage von Elementen sowie deren Attribute verändert, Elemente sowie deren Attribute gelöscht und neue Elemente kreiert werden. Elemente können dabei direkt mit den entsprechenden Werkzeugen editiert oder im Zuge einer Operation der Geodatenverarbeitung (s.o.) bearbeitet werden.

## 6.4 Das hydraulische Modell KANET

### 6.4.1 Überblick

Die hydraulische Modellierungssoftware KANET ist eine Entwicklung des IWG. Das Programmpaket KANET ermöglicht die Abbildung eines realen Verteilungsnetzes als rechenfähiges Knoten-Stränge-Modell und umfasst Applikationen zur Analyse sowie zur kostenoptimalen Auslegung des abgebildeten Systems.

KANET dient zunächst der Forschung des Instituts im Bereich der Modellierung und wird zu diesem Zwecke ständig weiterentwickelt. Die Entwicklungen werden in nationalen und internationalen Forschungs- und Industrieprojekten eingesetzt um einen Praxistransfer zu gewährleisten. Umgekehrt liefern die Fragestellungen und Erfahrungen aus der Praxis wichtige Impulse für die Forschung und Entwicklung. Die heute in KANET implementierten Anwendungen können hinsichtlich ihrer mathematischen Lösungsansätze in drei Gruppen gegliedert werden:

---

<sup>8</sup>Die Projektdateien besitzen die Endungen \*.mxd.

1. Applikationen, die auf der Berechnung des hydraulischen Gleichgewichts basieren (Simulation)
2. Applikationen zur Ermittlung kostenoptimaler Netze (Optimierung)
3. Applikationen zur Analyse des Netzgraphen (Graphendekomposition)

Zur ersten Gruppe sind die stationäre und zeitabhängige Simulation und die Berechnung der Leistungsfähigkeit von Hydranten zu zählen (Klingel u. a., 2009a; Deuerlein u. a., 2005). Es ist sowohl die bedarfs- als auch die druckabhängige Simulation möglich. Gegebene Parameter sind bei diesen Aufgaben das Netz mit seinen Eigenschaften sowie die Potentiale an den Einspeiseknoten. Berechnet werden die Variablen Drücke und Flüsse an den Knoten bzw. in den Strängen (s. Kap. 3.7).

Für die kostenoptimale Auslegung geplanter Netze sind verschiedene Algorithmen aus dem Gebiet des Operations Research implementiert (Cembrowicz u. a., 2004; Cembrowicz, 1988). Gegeben sind hierbei ein vermaschter Netzgraph, die Mindestdrücke an den Knoten, die Bedarfswerte sowie eine Auswahl verfügbarer Leitungen mit zugehörigen Durchmessern, Kosten und Rauheiten. Berechnet werden kostenoptimale Durchmesserkombinationen unter Einhaltung der gegebenen Randbedingungen für einen Spannbaum des Graphen. Der verästelte Netzgraph kann in einem zweiten Schritt entsprechend der Möglichkeiten durch den gegebenen vermaschten Graphen kostenoptimal als vermaschter Graph ausgeführt werden.

Für die Identifizierung der Maschen, Brücken und Bäume eines gegebenen Netzgraphen ist in KANET eine Applikation zur Dekomposition eines Graphen implementiert (s. Kap. 3.3). Der Applikation liegen rein graphentheoretische, d.h. von der Systemhydraulik unabhängige, Ansätze zu Grunde (Deuerlein, 2008).

Die notwendigen Daten des hydraulischen Modells bzw. der Modelle werden in einer relationalen Datenbank (Microsoft Access) mit vorgegebener Struktur abgelegt. Eine graphische Benutzeroberfläche für Microsoft Windows ermöglicht die Visualisierung, Datenverarbeitung und Ausführung der verschiedenen Berechnungsapplikationen. Die Benutzeroberfläche sowie alle Applikationen sind in einer ausführbaren Datei gespeichert. Beim Öffnen eines Projekts werden alle Daten einmalig in den Arbeitsspeicher geladen und das Graphenmodell erstellt. Über die Oberfläche ausgeführte Funktionen der Applikationen werden direkt abgearbeitet. Mögliche Änderungen im Datenbestand werden erst beim Speichern in die Datenbank geschrieben.

Im Folgenden wird zunächst auf Kapitel 3.4 Bezug nehmend die Umsetzung des Modellierungskonzepts und der Datenstruktur in KANET beschrieben. Anschließend werden das implementierte Graphenmodell und die Applikation zur Zerlegung des Netzgraphen sowie die Applikationen zur Simulation und Optimierung dargestellt.

### **6.4.2 Umsetzung des Modellierungskonzepts und der Datenbankstruktur**

Im Folgenden ist die logische Struktur des in KANET umgesetzten Modellierungskonzepts mit dem Netzgraphen als Basis beschrieben. Die Darstellung orientiert sich

am logischen Aufbau und den Begrifflichkeiten der Datenbankstruktur und nicht an der objektorientierten Struktur des eigentlichen Quellcodes. Die Darstellung des umgesetzten Modellierungskonzepts und der Datenstruktur beschränkt sich auf das für das Verständnis des integrierten Instruments Notwendigste.

**Datenstruktur und Datenspeicherung:** Analog zu dem in Kapitel 3.4 dargestellten allgemeinen Modellierungskonzept wird die Topologie eines Netzes in KANET als Digraph abgebildet. Die Elementmengen der Knoten und Stränge des Digraphen bilden die Basis der Datenstruktur und stellen jeweils eine Klasse dar. Elemente einer Klasse sind über eine eindeutige Bezeichnung und zugewiesene Attribute definiert. Dabei können die Attribute wiederum eine eigene Klasse darstellen. D.h., alle weiteren Eigenschaften des Modells sind den Knoten und Strängen als hierarchisch organisierte Attribute zugeordnet. Ausnahmen bilden die allgemeinen Berechnungsparameter, die keine Eigenschaft des abzubildenden Systems darstellen und in eigenen Klassen organisiert sind. Klassen sind in der Struktur der relationalen Datenbank als Tabellen umgesetzt. Die Zeilen der Tabellen repräsentieren die Elemente, die Spalten die Attribute der Elemente. Die Attributspalten beinhalten entweder den Wert des Attributs oder im Fall einer zugehörigen untergeordneten Attributklasse die Bezeichnung des Elements. Abbildung 6.5 verdeutlicht beispielhaft das Prinzip der Datenbankstruktur. In der Abbildung sind lediglich die wichtigsten Tabellen für eine stationäre Simulation dargestellt. Tabellen für die zeitabhängige Simulation und die Optimierung sowie die Tabellen der allgemeinen Berechnungsparameter sind nicht abgebildet. Klingel u. a. (2005b) beschreiben die Datenstruktur umfassend.

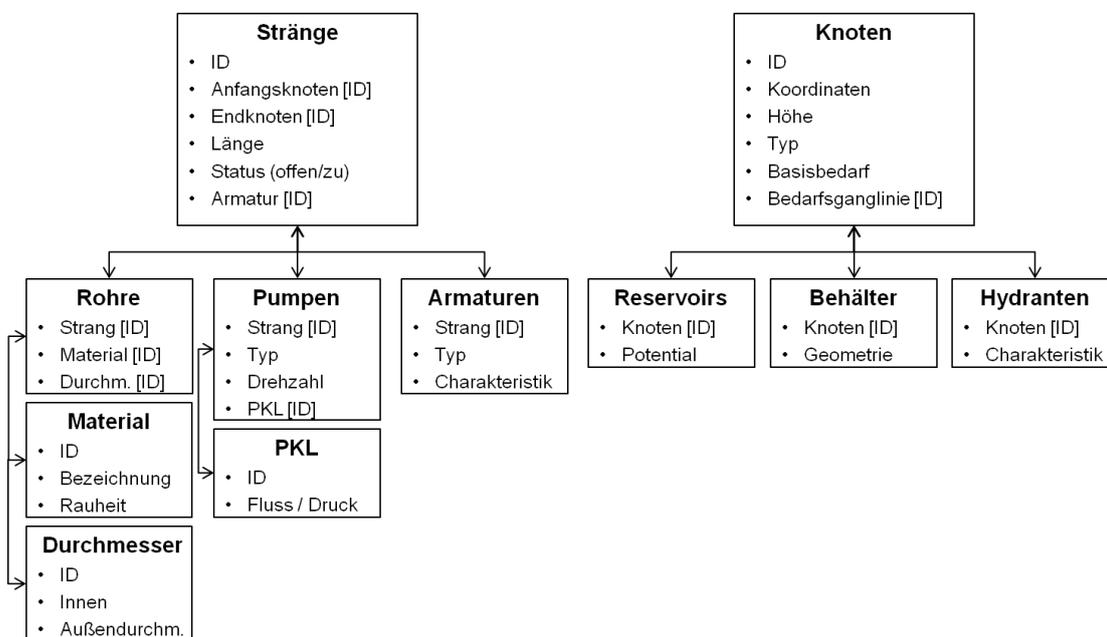


Abbildung 6.5: Ausschnitt aus der Datenbankstruktur von KANET

KANET benutzt das relationale Datenbankformat Microsoft Access. Beim Anlegen eines Projekts wird die benötigte Tabellenstruktur erstellt, indem eine leere Datenbank mit vorgegebener Struktur kopiert wird. In einer Datenbank können mehrere Netze abgelegt sein. Üblicherweise sind diese Netze Szenarien eines Systems. Die unterschiedlichen Datensätze werden in den gleichen Tabellen gespeichert und durch eine eindeutige Nummerierung unterschieden.

**Stränge:** Stränge stellen homogene Leitungsabschnitte oder Armaturen dar und definieren mit den zugeordneten Anfangs- und Endknoten den Netzgraphen (s. Kap. 3.4.1 und 3.4.3). Im Unterschied zu anderen Modellen sind die physikalischen Eigenschaften der Leitungen in KANET nicht den Strängen als Attribute zugeordnet. Um bei der Optimierung die kostenoptimalen Kombinationen von Leitungsdatensätzen (bestehend aus Material, Durchmesser und Rauheit) für gegebene Netzgraphen (bestehend aus Knoten und Strängen) berechnen zu können, sind diese Eigenschaften in einer eigenen Klasse zusammengefasst (s. Kap. 6.4.5 und Abb. 6.5, *Rohre*). Das Attribut Leitungslänge muss nicht gleich der Koordinatendifferenz der Anfangs- und Endknoten sein (s. Kap. 3.4.3).

Ihr Status ist den Strängen als Attribut zugeordnet. Ein Strang kann folgende Zustände haben:

- offen
- geschlossen
- zeitabhängig geschlossen (zeitabhängiger Schieber, TDV)
- druckabhängig geschlossen (druckabhängiger Schieber, PDV)

Die Steuervorgaben für das zeit- bzw. druckabhängige Schließen sind wiederum in untergeordneten Klassen definiert. Weiter können Stränge in KANET folgende Armaturen repräsentieren, deren Charakteristika ebenfalls in einer untergeordneten Klasse definiert sind (s. Abb. 6.5, *Armaturen*):

- Druckminderer (PRV)
- Druckunterstützer (PSV)
- Druckunterbrecher (PBV)
- Rückschlagklappe (CHV)
- Durchflusskontrollschieber (FCV)
- Drosselschieber (TCV)

Die Funktionsweise und die Modellierung von Kontrollarmaturen sind näher in Kapitel 2.3.5 bzw. Kapitel 3.4.5 beschrieben.

**Knoten:** Knoten definieren in KANET zunächst zusammen mit den Strängen die Netztopologie (s. Kap. 3.4.1). Des Weiteren stellen Knoten Veränderungen im Verlauf eines Leitungsabschnitts, Wassereinspeisungen und Wasserentnahmen sowie Behälter dar (s. Kap. 3.4.3 und 3.4.4). Dementsprechend existieren folgende Knotentypen, die als Attribut angegeben werden und in weiteren Tabellen definiert sind:

- Zwischenknoten
- Bedarfsknoten
- Hydrant/Sprinkler
- Einspeiseknoten
- Einspeiseknoten mit Druckerhöhung
- Behälter
- Reservoir

Außerdem sind die Bezeichnungen eines konstanten Bedarfsskalierungsfaktors und einer Bedarfsganglinie Attribute der Bedarfsknoten. Die Koeffizienten und Exponenten der Hydranten und Sprinkler sind in einer eigenen Klasse definiert. Ebenso sind Sohlhöhen, Totraumvolumina, Mindestvolumina, maximale Volumina, Füllstände zu Beginn eines Simulationszeitraums und maximale Wasserspiegel der Behälter sowie das Potential und ggf. eine Ganglinie des Potentials der Reservoirs in eigenen Klassen definiert.

### 6.4.3 Graphenmodell

In Ergänzung zu den in Kapitel 3.3 und 3.4 dargestellten Grundlagen wird in diesem Kapitel das in KANET implementierte Graphenmodell zur Zerlegung des Netzgraphen beschrieben. Das Graphenmodell erfüllt drei wichtige Funktionen (Deuerlein und Klingel, 2007):

**Effizienz der Simulationsrechnung:** Die Zerlegung des Netzgraphen in seine Komponenten wird programmintern für eine effizientere Berechnung des hydraulischen Gleichgewichts genutzt.

**Verbessertes Datenmanagement:** Die nutzergesteuerte Bearbeitung einzelner Zusammenhangskomponenten des Gesamtnetzes wird ermöglicht. Dies erleichtert das Datenmanagement.

**Analyse des Netzgraphen:** Die Graphendekomposition bietet die Möglichkeit der Analyse des Netzgraphen. Topologische Zusammenhänge, Versorgungsbereiche, nicht versorgte Komponenten und Schwachstellen können unabhängig von der Systemhydraulik erkannt werden. Bei Systemen, deren Betriebsweise nur schwer oder nicht im Modell nachzuvollziehen ist, bietet die Graphendekomposition daher eine erste Möglichkeit der Netzanalyse. Dies ist vor allem bei intuitiv und intermittierend betriebenen Systemen relevant. Weiter können z.B. Auswirkungen auf die Versorgungssituation ermittelt werden, die sich aus veränderten Schieberstellungen und damit aus veränderten Graphen ergeben.

Die Graphendekomposition folgt einer Sequenz von Einzelschritten. Im Folgenden werden diese grundlegenden Schritte für ein besseres Verständnis der Anwendungs-

möglichkeiten erläutert (s.o.). Für eine umfassende Darstellung der graphentheoretischen Umsetzung der Schritte wird auf Deuerlein (2008) verwiesen.

Im ersten Schritt wird der Zusammenhang des gegebenen erweiterten Graphen ermittelt. Die Komponente, die den virtuellen Referenzknoten enthält, wird als Hauptkomponente identifiziert. Komponenten, die nicht den Referenzknoten enthalten, besitzen keine Einspeiseknoten und sind damit nicht versorgt. Dabei sind evtl. geschlossene Stränge zu berücksichtigen. Abbildung 6.6 zeigt einen beispielhaften erweiterten Graph  $E$  mit dem virtuellen Strang  $V_1$  und dem Referenzknoten  $R$ . Die Knoten  $K_1$  und  $K_3$  stellen Einspeiseknoten (z.B. Reservoir und Behälter) dar. Wäre der Strang  $S_{13}$  geschlossen oder nicht vorhanden, würde der Graph in eine Hauptkomponente  $E_{HK}$  und eine nicht versorgte Komponente  $E_{NV} = \{K_{11}, S_{14}, K_{12}, S_{15}, K_{13}, S_{16}, K_{14}\}$  zerfallen.

Im zweiten Schritt wird die aus vermaschten und verästelten Subgraphen bestehende Hauptkomponente in Wald und Kern zerlegt. Dazu wird der Graph in einfach-zusammenhängende (*one-connected*) und zweifach-zusammenhängende (*biconnected*) Komponenten zerlegt. Der Wald mit Brücken stellt dabei die einfach-zusammenhängenden Komponenten dar. Die Maschen sind die zweifach-zusammenhängenden Komponenten. Mehrfach vermaschte Komponenten des Graphen werden zweifach-zusammenhängende Blöcke genannt. Brücken und zweifach-zusammenhängende Komponenten bilden den so genannten einfachen Kern (*two-core* oder *simple core*) des Graphen. In Abbildung 6.6 sind die Stränge des Waldes gestrichelt und die Stränge des Kerns durchgezogen dargestellt.

Im dritten Schritt wird der so genannte Blockgraph ermittelt, der eine weitere Vereinfachung des einfachen Kerns des Graphen darstellt. Dabei werden die Blöcke des einfachen Kerns durch jeweils einen Blockknoten ersetzt. Brücken bleiben bestehen. D.h. der Blockgraph besteht aus den Blockknoten, den Artikulationsknoten des Kerns, den Strängen der Brücken sowie Verbindungen der Blockknoten mit den Artikulationsknoten. In Abbildung 6.7 ist der Blockgraph der Hauptkomponente  $E_{HK}$  des Graphen  $E$  aus Abbildung 6.6 bei geschlossenem Strang  $S_{13}$  dargestellt. Der Blockgraph besteht aus den Blockknoten  $B_1$ ,  $B_2$  und  $B_3$ , den Artikulationsknoten  $K_3$ ,  $K_5$  und  $K_6$ , der Brücke  $S_7$ , dem Referenzknoten  $R$  sowie den entsprechenden Verbindungen.

#### 6.4.4 Berechnung des hydraulischen Gleichgewichts

Der in KANET implementierte Algorithmus gestattet die Berechnung des hydraulischen Gleichgewichts eines Wasserverteilungssystems unter Berücksichtigung beliebiger Kontrollarmaturen (s. Kap. 3.7.3.5). Die von Deuerlein (2002) entwickelte und implementierte Formulierung der Berücksichtigung von Kontrollarmaturen als Optimierungsaufgabe garantiert im Gegensatz zu bekannten heuristischen Verfahren eine sichere Konvergenz (s. Kap. 3.7.4).

Die Simulation ist analog zum Variationsprinzip von Birkhoff (1963) als nichtlineare Minimierungsaufgabe des System-*Content* mit den Maschenkorrekturflüssen als Variablen der streng konvexen Zielfunktion (maschenbezogenes Verfahren) formu-

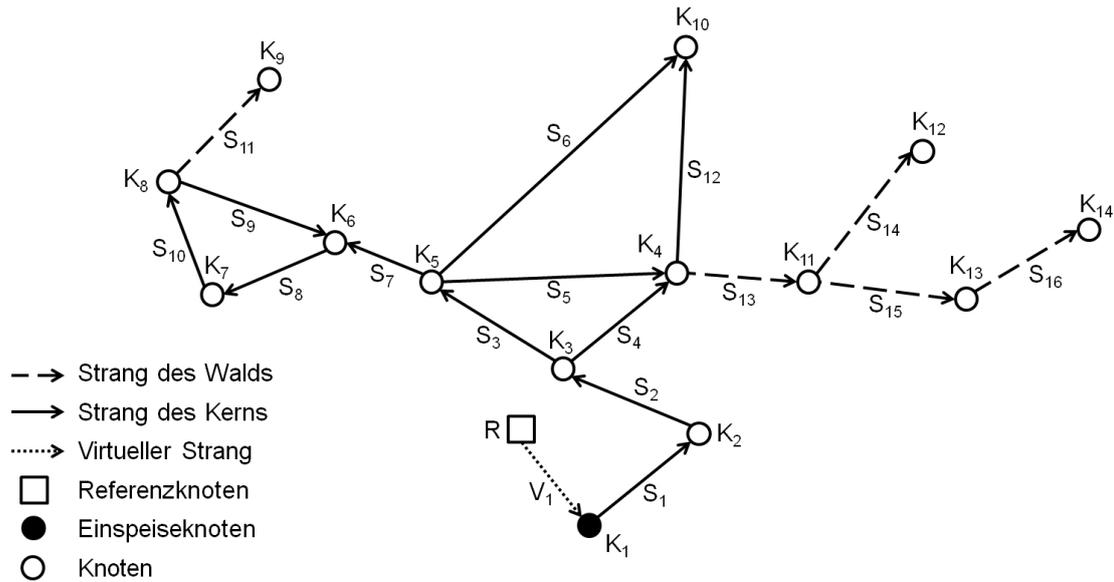


Abbildung 6.6: Beispielhafter erweiterter Graph  $E$

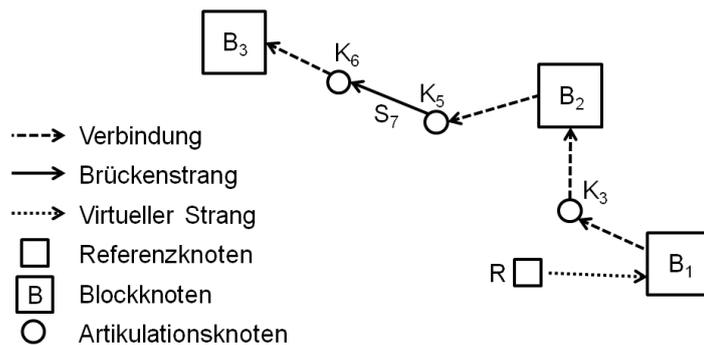


Abbildung 6.7: Blockgraph der Hauptkomponente  $E_{HK}$  des Graphen  $E$  bei geschlossenem Strang  $S_{13}$

liert (s. Kap 3.7.4). Deuerlein hat das mathematische Modell um eine Formulierung des Widerstandsgesetzes als eine allgemeine subdifferenzielle Beziehung erweitert (s. Gl. 3.15). Diese mathematisch geschlossene Formulierung ermöglicht die Berücksichtigung der mehrdeutigen Abbildungen des hydraulischen Verhaltens flusskontrollierender Armaturen und druckabhängiger Entnahmen bei der Ermittlung des hydraulischen Gleichgewichts. Die Berücksichtigung der mehrdeutigen Abbildungen führt zu Nebenbedingungen in der oben erwähnten Minimierungsaufgabe. Zur Lösung der Aufgabe werden Methoden der nichtlinearen Optimierung unter Nebenbedingungen eingesetzt. Nähere Ausführungen finden sich bei Deuerlein (2002) sowie Deuerlein u. a. (2009). Weiter hat Deuerlein (2002) die Berücksichtigung so genannter rückgekoppelter Armaturen (Druckminderer, Druckunterstützer, Pumpen mit Solldruck-

vorgaben) als Nash-Gleichgewicht zwischen den sich überschneidenden parametrischen Minimierungsaufgaben von System-*Content* und hydrostatischem Potenzial formuliert. Für die beschriebenen Aufgaben sind die Existenz und Eindeutigkeit der Lösung gegeben. Eine Konvergenz ist damit garantiert. Eine Zusammenfassung des in KANET implementierten Ansatzes findet sich bei Deuerlein u. a. (2003).

### 6.4.5 Berechnung kostenoptimaler Netze

KANET verfügt über Applikationen zur Auslegung eines Verteilungsnetzes. Es können kostenoptimale Durchmesser, Pumpdruckhöhen und Zuordnungen der Einspeisemengen für einen gegebenen Netzgraphen ermittelt werden. Minimal zulässige Versorgungsdrücke und Fließgeschwindigkeiten, Standorte von Pumpen und Behältern, bereits verlegte Rohre, die zu verwendenden Leitungen und deren Durchmesser und Kosten, der Planungshorizont sowie der interne Zinssatz werden berücksichtigt. Vier Berechnungsfälle, für die jeweils ein Lösungsalgorithmus implementiert ist, werden unterschieden:

**TreeOpt:** Für ein gegebenes Verästelungsnetz werden mit einem Linearen Programm (LP) die kostenoptimalen Durchmesser berechnet.

**TreeAll:** Für einen gegebenen vermaschten Graphen mit einer begrenzten Zahl an Spannbäumen werden alle Spannbäume ermittelt und mit einem LP die kostenoptimalen Durchmesser berechnet. Der Vergleich der Lösungen (lokale Minima) ergibt die optimale Lösung (globales Minimum). Der Graph beschreibt dabei z.B. die Trassierungsmöglichkeiten.

**TreeGen:** Ist die vollständige Enumeration auf Grund der Zahl der Spannbäume eines gegebenen vermaschten Graphen nicht möglich, werden die mit einem LP zu berechnenden kostenoptimalen Durchmesser der Spannbäume mit einem Genetischen Algorithmus (GA) ermittelt. Basierend auf bereits optimierten Spannbäumen, werden Spannbäume ermittelt und optimiert. Der iterative Prozess resultiert in einem lokalen Minimum.

**FlowGen:** Für einen gegebenen vermaschten Graphen wird die Flussverteilung mit einem weiteren GA optimiert. Die jeweilige Auslegung des Netzes für die gewählte Flussverteilung wird mit einem LP durchgeführt. Das Resultat ist ein lokales Minimum. Ein vermaschtes Netz kann grundsätzlich alleine mit FlowGen ausgelegt werden. Meist ist jedoch eine Folge von TreeGen und FlowGen effizienter.

Die vier Fälle sind in Tabelle 6.2 zusammengefasst. Auf eine detaillierte Darstellung der Algorithmen wird verzichtet und auf die entsprechende Literatur verwiesen (Cembrowicz u. a., 2004, 1996; Cembrowicz, 1988).

Tabelle 6.2: Algorithmen für die Netzoptimierung

Algorithmus	Gegeben	Ansatz	Lösung
TreeOpt	Verästelter Graph, genau ein Spannbaum	LP	Graph, globales Minimum
TreeAll	Vermaschter Graph, geringe Anzahl Spannbäume	LP	Spannbaum, globales Minimum
TreeGen	Vermaschter Graph, große Anzahl Spannbäume	GA & LP	Spannbaum, lokales Minimum
FlowGen	Vermaschter Graph	GA & LP	vermaschter Graph, lokales Minimum

## 6.5 Integration von ArcGIS und KANET

### 6.5.1 Überblick

In diesem Kapitel wird die eigentliche Integration des hydraulischen Modells KANET und des Geoinformationssystems ArcGIS beschrieben. Die Integration ermöglicht das Management und die Bereitstellung der Systemdaten (Netzkataster) sowie die hydraulische und graphentheoretische Netzanalyse (hydraulisches Modell) in einer Applikation. Die einheitliche Datenbasis garantiert die größtmögliche Aktualität des hydraulischen Modells und verhindert Redundanzen und Widersprüche im Datenbestand. Durch den Raumbezug der Systemdaten ermöglicht das GIS als Grundlage der Integration deren Analyse und Verarbeitung mit Werkzeugen und Methoden der Geoverarbeitung.

Die Integration erfordert auf Grund der gegenüber dem hydraulischen Modell erweiterten Anforderungen eine Anpassung des Modellierungskonzepts sowie eine erweiterte Datenstruktur. Für das Management der Systemdaten sind in *ArcMap* dafür entwickelte Funktionen integriert. Die Daten werden in der zentralen Geodatenbank in der Form abgelegt, die vom hydraulischen Modell sowie von den Netzkatasterfunktionalitäten benötigt wird. *ArcMap* kommuniziert über den eigentlichen Kern des Instruments, der auf *ArcObjects* basierenden ActiveX-DLL, mit einer DLL-Version von KANET.

Im Folgenden wird zunächst die Wahl der Datenspeicherung und die erweiterte Datenstruktur erläutert. Anschließend wird auf die Umsetzung des Managements der Systemdaten eingegangen. Die angepasste Benutzeroberfläche von *ArcMap*, die Werkzeuge für das Datenmanagement und die Netzanalyse sowie deren Anwendung sind in Kapitel 6.8 dargestellt.

### 6.5.2 Erweiterte Datenstruktur und Datenspeicherung

Sowohl KANET als auch ArcGIS unterstützen die Datenspeicherung in einer relationalen Datenbank. Dies ermöglicht die Zusammenführung der Datengrundlagen

beider Applikationen in einer zentralen Datenbank. Die Datenbank kann sowohl eine Arbeitsplatzlösung in Form einer *personal geodatabase* als auch eine Serverlösung sein. Die Arbeitsplatzlösung ist mit Microsoft Access umgesetzt. In einer Serverlösung kann die Datenbankstruktur in einem beliebigen relationalen Datenbanksystem verwirklicht werden. Allerdings ist die Serverapplikation *ArcSDE* für die Kommunikation zwischen ArcGIS und Datenbank notwendig.

Im hydraulischen Modell sind alle Elemente eines Verteilungssystems entweder den Knoten oder den Strängen des Netzgraphen zugeordnet. Da bei der Zuordnung Aspekte der Modellierung für eine Rohrnetzberechnung im Vordergrund stehen, sind z.T. reale punktuelle Objekte, wie Schieber oder Pumpen, den Strängen zugeordnet und somit als ein längliches Objekt abgebildet. Die genaue Lageinformation spielt dabei keine Rolle und geht verloren. Diese Abstraktion ist für die hydraulische Modellierung zulässig, genügt aber nicht den Anforderungen an ein Netzkataster, das u.a. die Elemente eines Wasserverteilungsnetzes mit ihrer Lage abbilden soll (s. Kap. 3.4 und 2.5.5.3). Hinsichtlich der notwendigen Datenstruktur für die Integration sind daher zwei Kategorien von Daten zu unterscheiden. Systemdaten, die das hydraulische Modell benötigt und zusätzliche Systemdaten zur Visualisierung im integrierten Netzkataster (s. Kap. 6.4.2). Allgemeine Geodaten können wie in den Kapiteln 6.3.4 und 6.3.5 beschrieben frei organisiert und in ein *ArcMap*-Projekt eingebunden werden. In einer Datenbank können weiterhin mehrere Netze (Szenarien) verwaltet werden. Die Erweiterung der Datenstruktur von KANET ist im Folgenden kurz beschrieben.

**Knoten, Stränge und Rohre:** Rohre, Stränge und Knoten des hydraulischen Modells weisen einen Raumbezug auf und werden im Netzkataster analog zum hydraulischen Modell als Leitungen bzw. Änderungen im Leitungsverlauf dargestellt. Zusätzlich zu allen vom Modell benötigten Daten werden die von ArcGIS für die Darstellung benötigten Geometrieinformationen (*shape*-Informationen) als Attribute in den entsprechenden Tabellen gespeichert.

**Armaturen und Pumpen:** Armaturen (Schieber sowie fluss- und druckkontrollierende Armaturen) und Pumpen sind im Modell den Strängen zugeordnet. Zur Darstellung im Netzkataster sind daher zusätzliche Daten notwendig, die in eigenen Tabellen abgelegt werden. Die Position wird als Abstand vom Anfangsknoten des zugeordneten Strangs gespeichert. Das Symbol wird entsprechend des Winkels zwischen Strang und Horizontalen verdreht visualisiert. Über die Zuordnung zum Strang wird bei einer Modifizierung des Strangs das Symbol automatisch mit verschoben. Für Schieber wird zusätzlich der Status gespeichert. Dies ermöglicht zum einen eine Visualisierung des aktuellen Status, zum anderen können mehrere Schieber einem Strang zugeordnet werden. Der Status des Strangs ergibt sich aus den Zuständen aller zugeordneten Schieber. Dies resultiert in einer Reduktion der Knoten und Stränge und damit in geringeren Rechenzeiten.

**Schadensregister und Datenerhebung:** Die Datenstruktur ermöglicht eine objektbezogene Erweiterung für weiterführende Funktionalitäten. In Kapitel 7 sind die Arbeitsprozesse zur standardisierten Datenerhebung für den Aufbau und die Aktualisierung einer Datenbasis sowie zur standardisierten Dokumentation von Netzschäden beschrieben. Die Schadensinformationen sind den Strängen zugeordnet und werden in einer eigenen Tabelle verwaltet. Analog sind Informationen zur Datenerhebung den Knoten zugeordnet und werden in einer weiteren Tabelle gespeichert.

**Textinformationen und Bilder:** Abgebildete Systemelemente können mit Textinformationen und Bildern verknüpft werden. Die Texte bzw. Bilder werden in separaten Ordnern als einzelne Textdateien (\*.txt) bzw. Bilddateien (\*.jpg) gespeichert. Über den Dateinamen und die Bezeichnung des Elements wird die Verknüpfung zwischen den Elementen und den Dateien hergestellt.

Abbildung 6.8 zeigt in Ergänzung zu Abbildung 6.5 ausschnittsweise die Datenbankstruktur des integrierten Instruments. Die Tabellen der Datenbankstruktur von KANET sind um die Shape-Informationen erweitert. Außerdem ist die Struktur um zusätzliche Tabellen mit Informationen für die Darstellung im Netzkataster sowie Tabellen für das Schadensregister und die Dokumentation der Netzdatenerhebungen ergänzt.

### 6.5.3 Management der Systemdaten

Die im vorigen Kapitel beschriebene Datenstruktur erfordert eine regulierte Verarbeitung und Speicherung der Systemdaten. Alle Systemdaten werden daher mit eigens hierfür entwickelten Funktionen verarbeitet. Die Funktionen sind in einer Bibliothek zusammengefasst und stehen in Form einer Werkzeugleiste (Wasserverteilungssystem-Fachschale) in der *ArcMap*-Oberfläche zur Verfügung (s. Abb. 6.1 und 6.12). Bei der Erstellung und Modifizierung der Knoten und Stränge, d.h. der Leitungen des Netzes, mit dem entsprechenden Editierwerkzeug werden sowohl die notwendige Topologie für das hydraulische Modell als auch die Geometrieinformation für die Geoverarbeitung erzeugt. Analog werden Attributwerte mit dem Editierwerkzeug und dem Informationsdialog eingegeben oder verändert. Ein Editieren der Daten mit den Standard-GIS-Funktionalitäten ist unterbunden. Fehlende Daten werden über logische Prüfungen automatisiert ermittelt und über Dialoge abgefragt. Dadurch ist die Konsistenz der im vorigen Kapitel beschriebenen Datenbankstruktur garantiert. Eine Übersicht der Werkzeuge gibt Kapitel 6.8.

## 6.6 Integration des hydraulischen Modells EPANET

Die Integration des hydraulischen Modells EPANET ermöglicht die Berechnung des hydraulischen Systemzustands mit dem in EPANET implementierten Lösungsansatz von Todini und Pilati (1987) sowie den Export in das EPANET-Dateiformat

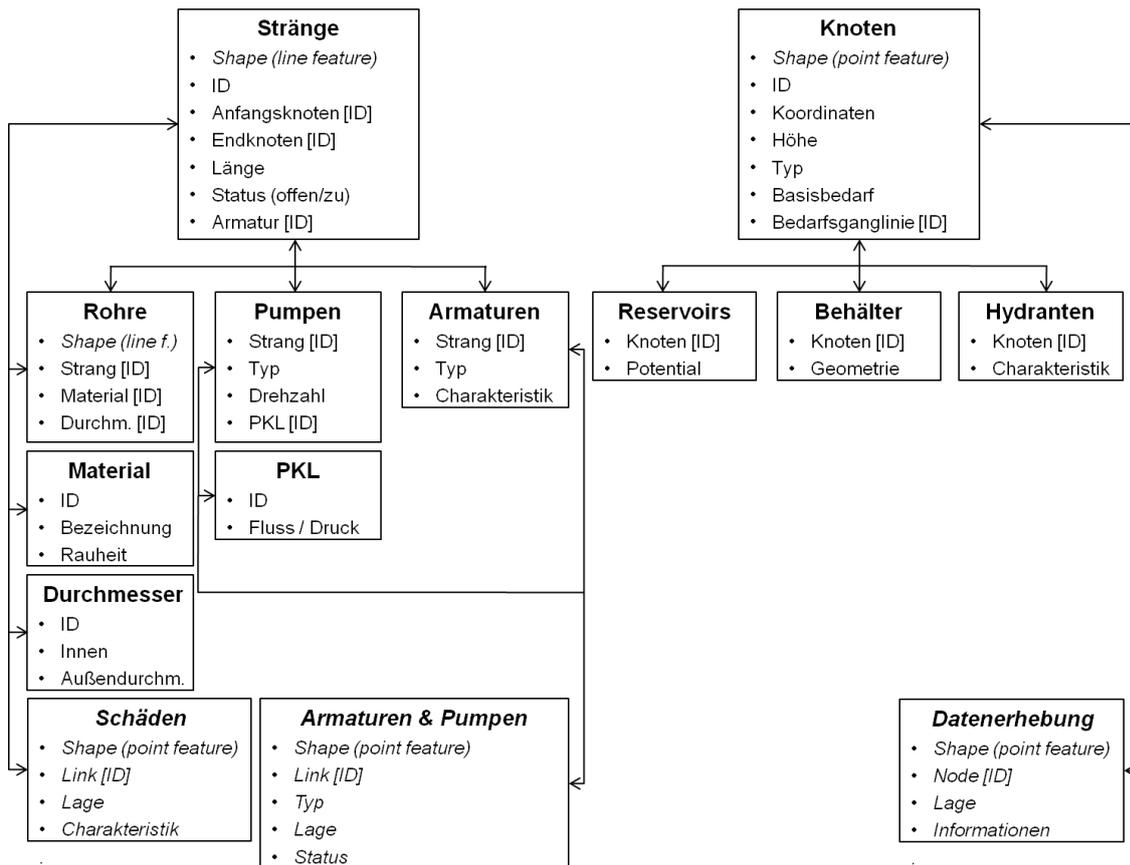


Abbildung 6.8: Ausschnitt aus der Datenbankstruktur des integrierten Instruments

(\*inp). Bei weniger komplexen, hauptsächlich verästelt ausgebildeten Netzen benötigt der Lösungsalgorithmus von EPANET gegenüber dem von KANET weniger Rechenzeit. Allerdings ist vor allem bei Netzen mit Kontrollarmaturen eine Konvergenz des EPANET-Ansatzes nicht garantiert (s. Kap. 3.7.4). Die Idee, EPANET zur Berechnung der Waldkomponenten und KANET zur Berechnung der Kernkomponente des Netzgraphen zu verwenden, verspricht eine Kombination der Vorteile beider Ansätze, wurde jedoch bisher noch nicht umgesetzt.

Für die Berechnung des hydraulischen Systemzustands mit EPANET werden die System- und Berechnungsdaten von der KANET-DLL an die integrierte EPANET-DLL übergeben. Die KANET-DLL setzt sukzessive die Parameter für die Berechnung der Zeitschritte des Simulationszeitraums. Nach der Berechnung eines Zeitschritts werden die Ergebnisse von der KANET-DLL abgefragt. Sind alle Zeitschritte abgearbeitet, werden die Ergebnisse zur Visualisierung übergeben. Durch die direkte Kommunikation über DLL-Befehle ist es möglich Daten zwischen der KANET-DLL und der EPANET-DLL zu transferieren, ohne dass eine Eingabedatei (\*inp) benötigt wird. Allerdings kann über die EPANET-DLL eine Inputdatei geschrieben werden. Damit stellt die EPANET-DLL die Exportfunktion zu EPANET dar. Für den Import von EPANET-Dateien ist eine eigene Schnittstelle integriert. Da die

meisten hydraulischen Modelle über eine Schnittstelle zu EPANET verfügen, ist der Import und Export von und zu den gängigen Softwarepaketen gewährleistet.

## 6.7 Werkzeuge zur Datenaufbereitung

### 6.7.1 Überblick

Zur Unterstützung der Modellierung, insbesondere der Datenaufbereitung (data pre-processing), stehen weitere Applikationen zur Verfügung. Die Applikationen sind als eigenständige, *ArcObjects* nutzende Funktionen in ArcGIS integriert und in einem Menüpunkt der Wasserverteilungssystem-Fachschaale zusammengefasst (s. Kap. 6.2 und 6.8). Die in Kapitel 6.7.2 und 6.7.3 dargestellten Applikationen ermöglichen die automatische oder semi-automatische Generierung eines Netzgraphen aus nicht konsistenten Punkt- und Linienobjekten. Kapitel 6.7.4 beschreibt ein Werkzeug zur automatisierten Zuordnung von Bevölkerungs- bzw. Bedarfswerten zu den Bedarfsknoten des Modells.

### 6.7.2 Import von Punktmengen als Knoten

Punktobjekte, die in der Form Name, X-Koordinate, Y-Koordinate in einer Textdatei oder einer Tabelle (Microsoft Excel) vorliegen, können in *ArcMap* zwar temporär importiert und dargestellt, aber nicht als *point features* gespeichert werden. Meist liegen die Lageinformationen der Knoten jedoch nicht als *point features* vor, sondern werden in der o.g. Form, z.B. aus analogen Plänen, erarbeitet. Eine neue Applikation ermöglicht den Import und die Speicherung der Daten in der Knoten-Tabelle.

### 6.7.3 Erstellung des Netzgraphen

Stehen bei der Modellierung digitale Netzdaten, z.B. aus CAD-Programmen, zur Verfügung, weisen diese meist nicht die topologischen Anforderungen an den Netzgraphen oder die notwendige Konsistenz auf. Neben nicht konsistenten Daten sind die im Folgenden gelisteten Probleme typisch:

1. Die Lage eines Knotens stimmt nicht exakt mit der Lage des Anfangs- oder Endpunkts des zugehörigen Strangs überein.
2. Die Lage eines Strangendes stimmt nicht exakt mit Lage des zugeordneten Knotens überein.
3. Einem Strangende ist kein Knoten zugeordnet.
4. Linienelemente sind keine Stränge, d.h. nicht bei jeder Veränderung im Verlauf einer Leitung endet der Strang.
5. Die Linien oder Punkte sind nicht eindeutig bezeichnet.
6. Anfangs- und Endknoten sind nicht als Attribute den entsprechenden Strängen zugeordnet.

Abbildung 6.9 zeigt beispielhaft digitale Netzdaten, die die o.g. topologischen Unzulänglichkeiten aufweisen (obere Grafik). In der gleichen Abbildung ist zum Vergleich der Datensatz topologisch korrekt abgebildet (untere Grafik). Die Fehler sind in der oberen Grafik gestrichelt eingekreist. Die Nummerierung der Fehler bezieht sich auf die Nummerierung der oben dargestellte Auflistung.

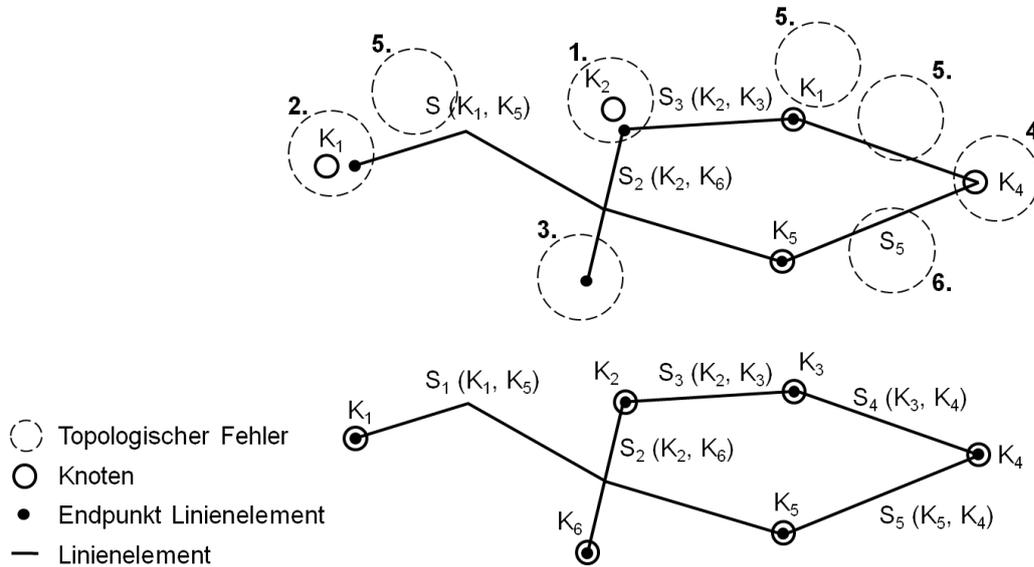


Abbildung 6.9: Topologisch unzulängliche (*oben*) und korrekte (*unten*) Rohdaten eines Netzgraphen

Die Applikation benötigt zur Erstellung eines Netzgraphen eine *point feature class* und eine *line feature class* als Eingangsdaten. Folgende Aktionen werden bei der Erstellung durchgeführt:

1. Endpunkte der *line features*, deren Lage nicht mit der eines *point feature* übereinstimmen, werden auf die Lage des *point feature* verschoben, sofern die Entfernung zum *point feature* innerhalb einer vorgegebenen Toleranz liegt.
2. Nicht existierende *point features* an den Endpunkten sowie Verzweigungen der *line features* werden generiert.
3. Befindet sich ein *point feature* unter Berücksichtigung einer Toleranz auf einem durchgehenden *line feature*, wird das *line feature* in zwei *line features* gesplittet.
4. *Point features*, die nicht einem Endpunkt eines *line feature* zugeordnet werden können, werden kontrolliert gelöscht.
5. Die *point* und *line features* werden in die Knoten- und Stränge-Tabellen übernommen.
6. Die Attribute Anfangs- und Endknoten werden für jeden Strang ermittelt und in die Stränge-Tabelle geschrieben.

## 6.7.4 Zuordnung von Wasserbedarfswerten

### 6.7.4.1 Aufgabenstellung

In Entwicklungsländern liegen häusliche Wasserbedarfswerte auf Grund mangelhafter Abrechnung oder ungenügender Aufzeichnung häufig nicht direkt mit örtlichem Bezug vor. Meist liegen Informationen zur Bevölkerungsverteilung und -dichte, in der Regel in Form flächenbezogener Daten, vor oder können ermittelt werden. Zusätzlich sind mitunter Gebäudegrundflächen aus Stadtplänen verfügbar. Um die Modellgröße zu verringern, werden außerdem u.U. nicht alle Hausanschlüsse in einem Modell als einzelne Bedarfsknoten umgesetzt. Ein Bedarfsknoten repräsentiert dementsprechend mehrere Häuser oder ein Einzugsgebiet. Demnach muss für die Ermittlung der Knotenbedarfswerte der Einzugsbereich der Bedarfsknoten ermittelt werden. Der Wasserbedarf eines Knotens kann dann aus der Bevölkerungszahl des Einzugsbereichs und dem mittleren einwohnerbezogenen Tagesbedarf abgeleitet werden (s. Kap. 2.4.3.1).

Die Verteilung der Bedarfswerte und ggf. der Wasserverluste auf die Knoten hat einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität des Modells. Zudem kann eine ineffiziente Ermittlung der Verteilung mit einem erheblichen Zeitaufwand verbunden sein. Eine automatisierte digitale Ermittlung der Verteilung ermöglicht eine effiziente Arbeitsweise und Flexibilität bzgl. möglicher Parameteränderungen.

### 6.7.4.2 Ansatz

Durch den räumlichen Bezug ist eine Umsetzung der Aufgabe in einem GIS zweckmäßig. Aus den im vorigen Kapitel beschriebenen Anforderungen und den gegebenen Voraussetzungen ergibt sich ein mehrstufiger Ansatz:

1. Ermittlung der Einzugsbereiche der Bedarfsknoten
2. Ermittlung der Bevölkerungszahl pro Einzugsbereich
3. Ermittlung des Wasserbedarfs pro Knoten

Zur Ermittlung der Einzugsbereiche bieten sich die so genannten Voronoi-Diagramme (auch Thiessen-Polygone) an. Wird aus der Menge der Bedarfsknoten ein Voronoi-Diagramm entwickelt, liegt in jeder Fläche des Diagramms genau ein Knoten. Jede Fläche definiert sich dadurch, dass der euklidische Abstand jeden Flächenpunkts zum Knoten in der Fläche kleiner ist, als der euklidische Abstand zu jedem anderen Knoten. D.h. der zu einem Punkt einer Fläche nächstgelegene Knoten, ist der Knoten innerhalb der Fläche. Die Flächen des Voronoi-Diagramms werden im Weiteren Einzugsgebiete genannt. Punkte, die von zwei Knoten gleich weit entfernt sind, ergeben die Bisektoren, im Weiteren Einzugsgebietsgrenzen genannt. Sie stellen das eigentliche Voronoi-Diagramm dar.

Zur Ermittlung von Voronoi-Diagrammen stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Ein konstruktiver Ansatz ist die Ermittlung der Mittelsenkrechten auf die Linien einer Delaunay-Triangulation, die aus einer Knotenmenge gebildet wird (s.

Kap. 2.5.5.2). Die Mittelsenkrechten entsprechen den Einzugsgebietsgrenzen. Ansätze, die sich für eine programmiertechnische Umsetzung eignen sind z.B. der Sweep-Algorithmus (Fortune, 1986) und das *Teile und Herrsche*-Verfahren (Shamos, 1975). *ArcObjects* stellt ebenfalls eine Funktion zur Verfügung, die das Erstellen eines Voronoi-Diagramms für eine Punktmenge ermöglicht.

Gewöhnliche Voronoi-Diagramme basieren jedoch alleine auf der zu Grunde gelegten Punkt- bzw. Knotenmenge. Das Einzugsgebiet eines Knotens wird auf Grund der euklidischen Abstände der Flächenpunkte zum Knoten bestimmt. Vorgegebene Gebietsgrenzen, die einem Netzteil ein bestimmtes Wohngebiet zuordnen oder Hindernisse, wie z.B. ein Flusslauf, eine Eisenbahnlinie oder eine Stadion, werden nicht berücksichtigt. Dies führt mitunter zu einer falschen Ermittlung der Einzugsgebiete. Die Konsequenz sind falsch zugeordnete Bedarfswerte im Modell. Der berechnete hydraulische Systemzustand ist dementsprechend mit Fehlern behaftet. Einer korrekten Ermittlung der Einzugsgebiete muss statt des euklidischen Abstands der kürzeste Pfad zwischen Flächenpunkten und Knoten unter Berücksichtigung der Grenzen zu Grunde liegen. Demnach müssen bei der Ermittlung der Voronoi-Diagramm zur Erfüllung der Anforderungen folgende Nebenbedingungen berücksichtigt werden:

- Vorgegebene, ggf. konkave (nicht-konvexe und einfache) Grenzen (Grenzpolygone), die Löcher beinhalten können, werden berücksichtigt.
- Punkte innerhalb der Grenzen werden denjenigen Knoten zugewiesen, zu denen der Pfad unter Berücksichtigung der gegebenen Grenzen am kürzesten ist.

Abbildung 6.10 zeigt schematisch Voronoi-Diagramme, die ohne bzw. unter Berücksichtigung der aufgestellten Nebenbedingungen erstellt wurden. In der linken Grafik

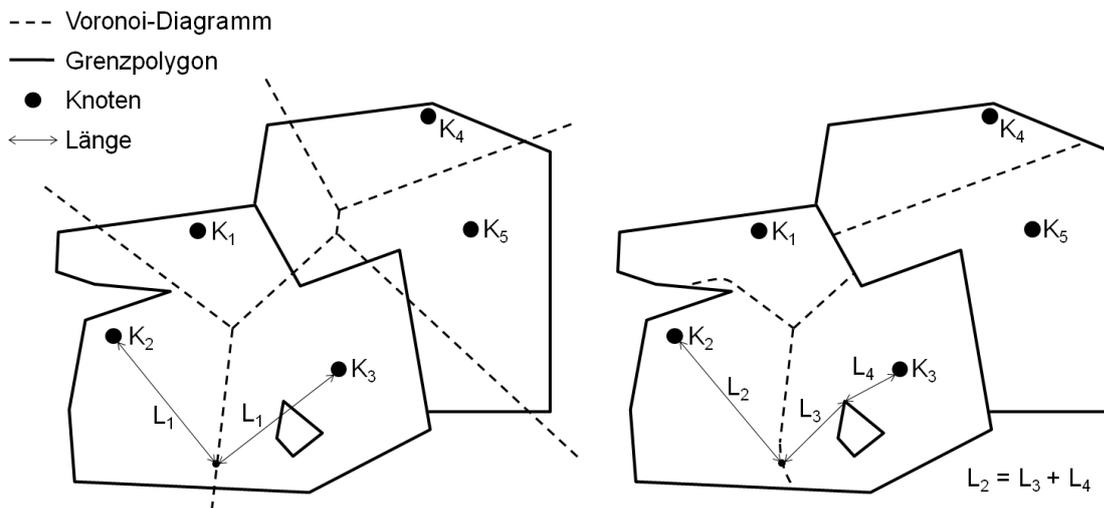


Abbildung 6.10: Voronoi-Diagramm ohne (*links*) und unter (*rechts*) Berücksichtigung von Grenzen

der Abbildung wird das Grenzpolygon nicht berücksichtigt. Folglich laufen die Bi-

sektoren des Voronoi-Diagramms an den Rändern gegen unendlich und den Knoten werden fälschlicherweise Flächen zugeordnet, die jenseits einer Grenze liegen. Z.B. werden den Knoten  $K_1$  und  $K_3$  Flächen zugeordnet, die auf Grund des Grenzpolygons nur in den Einzugsgebieten der Knoten  $K_4$  und  $K_5$  liegen können. Außerdem wird durch die Abbildung ersichtlich, dass Knoten fälschlicherweise Flächen zugeordnet werden, weil nicht-konvexe Abschnitte des Grenzpolygons oder Löcher bei der Ermittlung des kürzesten Pfades der Flächenpunkte zu einem Knoten nicht berücksichtigt werden. Z.B. ist dem Knoten  $K_2$  eine Fläche zugeordnet, die bei Berücksichtigung der Grenzen dem Knoten  $K_1$  zugeordnet sein muss. Dem Knoten  $K_3$  ist eine Fläche zugeordnet, die auf Grund des Loches näher am Knoten  $K_2$  liegt.

Verschiedene Autoren haben das Problem bereits behandelt. Keiner der bekannten Ansätze berücksichtigt jedoch uneingeschränkt alle geforderten Nebenbedingungen. Der Ansatz von Aronov (1987) z.B. berücksichtigt keine Löcher und Papadopoulou und Lee (1998) berücksichtigen Löcher nur unter bestimmten gegebenen Bedingungen. Der begrenzten Anwendbarkeit gewöhnlicher Voronoi-Diagramme für die Aufgabenstellung sowie dem momentanen Wissensstand wird deshalb mit einem neuen Ansatz Rechnung begegnet, der die oben gelisteten Nebenbedingungen berücksichtigt (Guth, 2009). Dieser Ansatz, und damit der erste Schritt des Verfahrens, ist im nächsten Kapitel beschrieben. Für die Ermittlung der Bevölkerungszahlen und der Wasserbedarfswerte können Funktionen der Geodatenverarbeitung genutzt werden. Durch die Umsetzung des Werkzeugs als ArcGIS-Applikation stehen die dazu notwendigen Grundfunktionen weitestgehend bereits zur Verfügung (s. Kap. 6.7.1). In Kapitel 6.7.4.4 ist die Umsetzung ausführlich dargestellt.

### 6.7.4.3 Ermittlung der Knoteneinzugsflächen mit Voronoi-Diagrammen unter Berücksichtigung von Grenzen

Im ersten Schritt des als Applikation im integrierten Instrument umgesetzten Verfahrens zur Verteilung der Wasserbedarfswerte werden die Einzugsgebiete der Bedarfsknoten ermittelt. Eingangsdaten sind die Bedarfsknoten und die Grenzpolygone. Das Ergebnis sind die Einzugsgebiete der Bedarfsknoten. Im Folgenden ist der Ansatz zur Ermittlung der Einzugsgebiete und dessen Umsetzung zusammenfassend dargestellt. Guth (2009) beschreibt den implementierten Algorithmus sowie dessen Validierung ausführlich.

**Aufgabenstellung:** Für eine gegebene Menge an Erzeugerpunkten (hier die Bedarfsknoten) und gegebene Grenzen (hier die Grenzpolygone, die ggf. Löcher enthalten) werden Voronoi-Diagramme erstellt, die alle Punkte innerhalb der Grenzen über Einzugsgebiete denjenigen Erzeugerpunkten innerhalb der Grenzen zuordnen, zu denen der Pfad zwischen Punkt und Erzeugerpunkt am kürzesten ist.

**Lösungsansatz:** Um die Erzeugerpunkte werden konzentrische Kreise gebildet. Die Schnittpunkte der Kreise mit gleichen Radien innerhalb eines Grenzpolygons ergeben die Einzugsgebietsgrenzen der Voronoi-Diagramme. Der kleinste angenommene

Radius für die konzentrischen Kreise ist der halbe Abstand zwischen den Erzeugerpunkten derjenigen Kreise, die geschnitten werden. Der maximale Radius richtet sich nach der maximalen Distanz eines Erzeugerpunktes zu einem Punkt des Grenzpolygons, sofern dieser vom Erzeugerpunkt „sichtbar“ ist. Der Radienabstand zwischen Minimum und Maximum wird vorgegeben.

Um nichtkonvexe Grenzpolygone zu berücksichtigen, werden diejenigen Knickpunkte der Polygone, die in das Polygon „hineinragen“ (Außenwinkel des Knickpunkts kleiner als der Halbkreiswinkel) als so genannte nachgeordnete Erzeugerknoten definiert. Diesen nachgeordneten Erzeugerpunkten werden additive Konstanten zugewiesen, die dem Abstand zwischen nachgeordnetem Erzeugerpunkt und nächstgelegenen Erzeugerpunkt entsprechen. Die Radien der konzentrischen Kreise um die nachgeordneten Erzeugerpunkte werden um die jeweilige additive Konstante gemindert. Bei Löchern wird analog verfahren, mit dem Unterschied, dass die Innenwinkel an den Knickpunkten geprüft werden.

Prinzipiell werden alle Kreise um die Erzeugerpunkte und nachgeordneten Erzeugerpunkte im vorgegebenen Radienbereich miteinander geschnitten. Die Schnittpunkte der Kreise zweier benachbarter Erzeugerpunkte werden als Punkte der Einzugsgebietsgrenzen berücksichtigt, sofern ein direkter Pfad ohne Knickpunkte vom Schnittpunkt zu beiden Erzeugerpunkten (Erzeugerknoten ist vom Schnittpunkt „sichtbar“) existiert und der Schnittpunkt innerhalb des Grenzpolygons liegt. Liegt der Schnittpunkt innerhalb des Grenzpolygons und ein Erzeugerknoten ist nicht „sichtbar“ (das nichtkonvexe Grenzpolygon verhindert die Sichtbarkeit), werden die Schnittpunkte der Kreise um den „sichtbaren“ Erzeugerpunkt und der Kreise um den nachgeordneten Erzeugerpunkt des „nicht sichtbaren“ Erzeugerpunkts berücksichtigt. Aus den berücksichtigten Schnittpunkten werden Polylinien gebildet. Zusammen mit den entsprechenden Abschnitten der Grenzpolygone ergeben sich die Polygone der Einzugsgebietsgrenzen.

Abbildung 6.11 zeigt schematisch das Prinzip. Abgebildet sind zwei Erzeugerpunkte  $K_1$  und  $K_2$ . Durch das nichtkonvexe Grenzpolygon ergibt sich ein nachgeordneter Erzeugerpunkt  $K_{2n}$ . Die strichpunktierte, schwarze Linie deutet die Grenze des „sichtbaren“ Bereichs des Erzeugerpunkts  $K_2$  an. Die konzentrischen Kreise um die Erzeugerpunkte sind für ausgewählte Radien angedeutet. Die Schnittpunkte der Kreise gleicher Radien um die Erzeugerpunkte ergeben im „sichtbaren“ Bereich die Punkte der Einzugsgebietsgrenze (schwarze Vierecke). Im „nicht sichtbaren“ Bereich des Erzeugerpunktes  $K_2$  ergeben die Schnittpunkte der Kreise um den Erzeugerpunkt  $K_1$  und den nachgeordneten Erzeugerpunkt  $K_{2n}$  die Punkte der Einzugsgebietsgrenze (schwarze Rauten). Dabei ist bei den Radien der Kreise um  $K_{2n}$  jeweils die Minimierung um die additive Konstante berücksichtigt. Kreise, die geschnitten werden, haben in der Abbildung die gleiche Farbe.

**Umsetzung in ArcGIS:** Der oben beschriebene Lösungsansatz ist mit Hinblick auf die Implementierung in ArcGIS als Algorithmus umgesetzt. Der implementierte Algorithmus ist als Bibliothek in die ArcGIS-Applikation integriert. Die Bibliothek

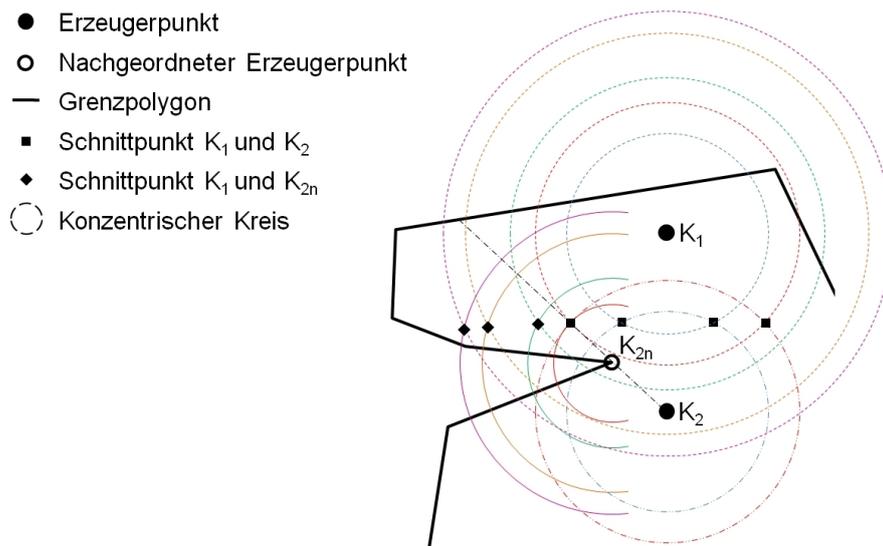


Abbildung 6.11: Lösungsansatz zur Ermittlung der Voronoi-Diagramme unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen

erfordert Grenzpolygone, die ggf. Löcher aufweisen können, und Erzeugerpunkte als Eingangsdaten. Die Grenzpolygone müssen in einer *polygon feature class* als *polygon features* und die Erzeugerpunkte in einer *point feature class* als *point features* zur Verfügung stehen. Der Algorithmus arbeitet die *polygon features* mit den darin liegenden *point features* einzeln ab. Das Ergebnis, die berechneten Einzugsgebietsgrenzen (*polygon features*), werden in einer weiteren *polygon feature class* abgespeichert und stehen für die nächsten Schritte (s. nächstes Kap.) zur Verfügung. Abbildung 6.14 zeigt eine Knotenmenge und ein Grenzpolygon sowie das zugehörige Voronoi-Diagramm, das mit der Applikation ermittelt und mit ArcGIS visualisiert wurde.

#### 6.7.4.4 Ermittlung der Bevölkerungszahlen und der Wasserbedarfswerte der Bedarfsknoten

Im zweiten Schritt des Verfahrens wird die gegebene Bevölkerung auf die Bedarfsknoten verteilt. Die aus dem ersten Schritt bekannten Flächengrößen der Einzugsgebiete der Bedarfsknoten (*polygon features*) sowie die gegebene Bevölkerungsverteilung sind dabei Eingangsdaten. Die Bevölkerungsverteilung liegt in Form von Flächendaten (*polygon feature class*) vor. Jeder Teilfläche (*polygon feature*) ist eine Bevölkerungszahl als Attribut zugewiesen. Zwei Ansätze ermöglichen die Ermittlung der Personenzahl eines jeden Einzugsgebiets und damit der Bedarfsknoten:

**Personen pro Flächeneinheit:** Die als Polygone vorliegende Bevölkerungsverteilung wird über den räumlichen Bezug mit den Polygonen der Einzugsgebiete überlagert. Entsprechend der Anteile der sich räumlich überschneidenden Flächen der

Einzugsgebiete und der Bevölkerungspolygone werden den Einzugsgebieten Personenzahlen zugewiesen.

**Personen pro Gebäudegrundflächeneinheit:** Liegen zusätzlich zu der Bevölkerungsverteilung Informationen zu Gebäudegrundflächen vor, kann eine größere Genauigkeit bei der Verteilung der Bevölkerung auf die Bedarfsknoten erreicht werden. Stadtpläne mit Gebäudegrundflächen sind mit relativ geringem Aufwand aus Satellitenbildern mit Hilfe der Geodatenverarbeitung generierbar. Die Grundflächen der Gebäude können dabei in GI-Systemen als Flächenobjekte und somit in ArcGIS als *polygon feature class* dargestellt werden. Für jedes Polygon der Bevölkerungsverteilung wird die Gesamtfläche der innerhalb des Polygons liegenden Gebäudegrundflächen ermittelt. Unbewohnte Gebäude (Administration, Schulen, Kriechen usw.) bleiben dabei unberücksichtigt. Die Personenanzahl des Bevölkerungspolygons wird den Gebäudeobjekten entsprechend ihrer Grundfläche anteilig zugewiesen. Dabei kann über ein den Gebäudeobjekten zugeordnetes Attribut die Anzahl der Stockwerke berücksichtigt werden. Über den räumlichen Bezug werden die Gebäudeobjekte innerhalb der Einzugsgebiete ermittelt. Die Personenzahl der Einzugsgebiete ergibt sich aus der Summe der sich darin befindenden Gebäudeobjekte.

Im letzten Schritt des Verfahrens werden die Basisbedarfswerte der Knoten ermittelt. Der vorgegebene einwohnerbezogene Tagesbedarf wird mit der den Bedarfsknoten zugewiesenen Personenzahlen multipliziert. Der sich ergebende Wasserbedarf wird den Bedarfsknoten als Basisbedarf zugewiesen.

## 6.8 Funktionalität und Anwendung

### 6.8.1 Benutzeroberfläche

Die in den vorigen Kapiteln beschriebenen Funktionen sind als Werkzeuge, zusammengefasst in einer Werkzeugleiste - die Wasserverteilungssystem-Fachschale -, in die Benutzeroberfläche von *ArcMap* integriert. Beim Öffnen einer Datenbank mit der entsprechenden Funktion wird automatisch eine angepasste Struktur des Netzkatasters im Inhaltsfenster aufgebaut. Die Struktur eingebundener allgemeiner Geodaten bleibt erhalten und wird ergänzt. Dem Benutzer stehen die vollständige Funktionalität von ArcGIS, die Funktionen der Wasserverteilungssystem-Fachschale sowie eine angepasste Benutzeroberfläche in den Sprachen Deutsch, Französisch und Englisch zur Verfügung.

Abbildung 6.12 zeigt die Oberfläche von *ArcMap* mit der Menüleiste, dem Inhaltsfenster, den *ArcMap*-eigenen Werkzeugleisten *Standard* und *Navigation* sowie der Wasserverteilungssystem-Fachschale. Die wichtigsten Werkzeuge der Fachschale fasst das nächste Kapitel zusammen.

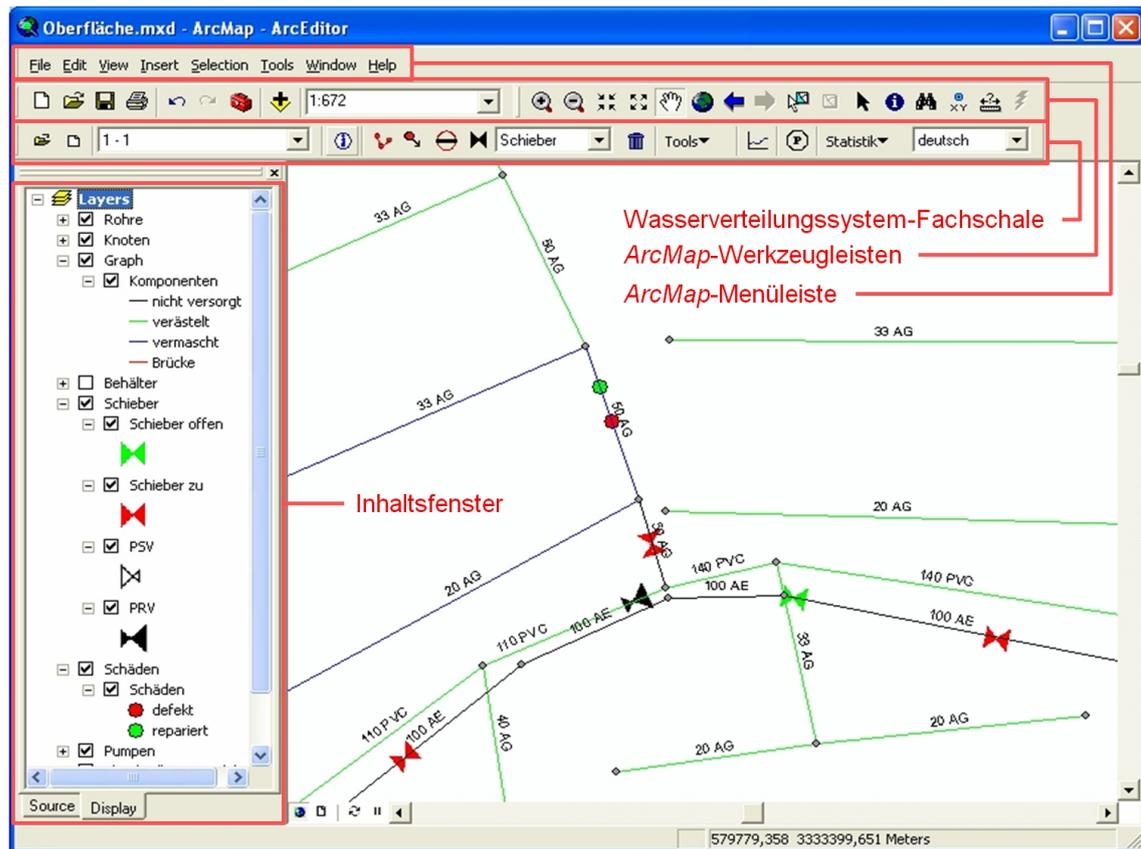


Abbildung 6.12: ArcMap-Oberfläche mit Wasserverteilungssystem-Fachschaale

## 6.8.2 Werkzeuge

Neben der vollen Funktionalität von ArcGIS stehen dem Anwender des integrierten Instruments mit der Wasserverteilungssystem-Fachschaale Werkzeuge zur Datenhaltung, zur Datenaufbereitung sowie zur Analyse und Planung zur Verfügung. In Tabelle 6.3 sind die Werkzeuge der Fachschaale aufgeführt. In der Tabelle wird außerdem der Zweck der Werkzeuge kurz erläutert und auf ausführliche Darstellungen der theoretischen Hintergründe der Werkzeuge verwiesen. Die wichtigsten Funktionalitäten der Fachschaale aus Anwendersicht sind in den folgenden Kapiteln zusammengefasst. Für die Darstellung der Funktionalität von ArcGIS wird auf die Fachliteratur verwiesen, z.B. Ormsby u. a. (2004) oder Liebig und Mumenthey (2008a) und Liebig und Mumenthey (2008b).

## 6.8.3 Datenhaltung im Netzkataster

Zur Aktualisierung und Erweiterung des Netzkatasters stehen dem Anwender verschiedene Editierwerkzeuge zur Verfügung. Der *Editierdialog* dient dem Zeichnen neuer Leitungen im Netzkataster und der Angabe der Leitungs- bzw. Knoteneigenschaften (Material, Durchmesser, Rauheit, Höhe der Anfangs- und Endknoten). Die

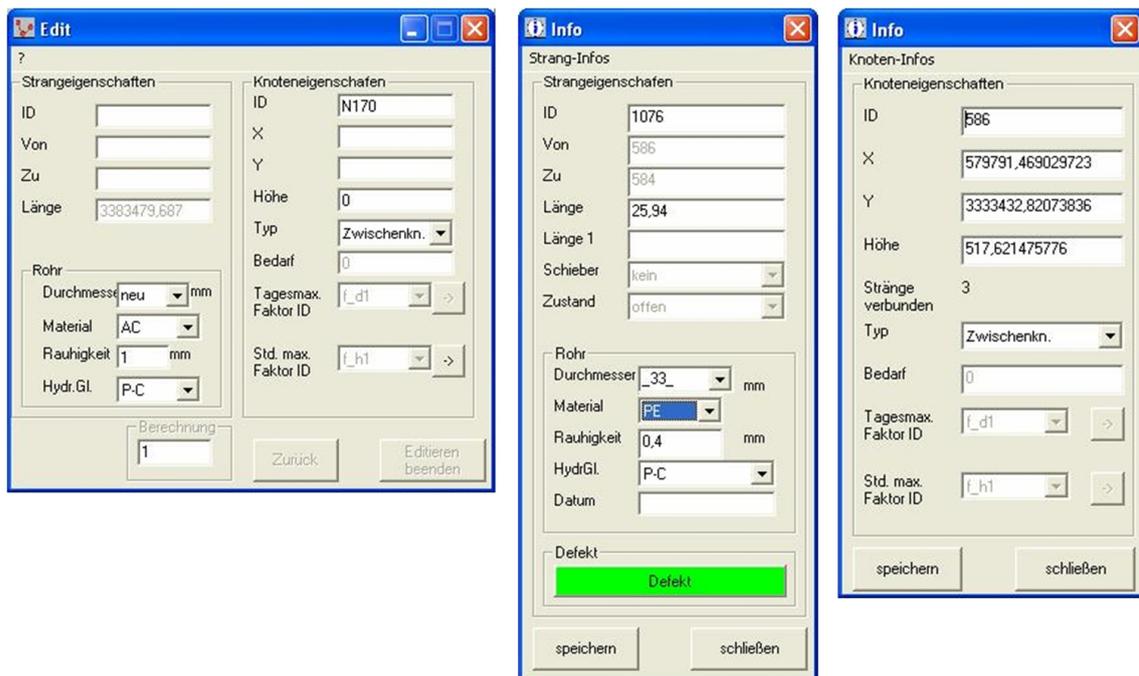
Tabelle 6.3: Die wichtigsten Werkzeuge der Fachschale

<b>Werkzeug</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Theorie</b>
<i>Öffnen</i>	Öffnen einer Datenbank	Kap. 6.5.2
<i>Neues Projekt</i>	Anlegen eines neuen Projekts	Kap. 6.5.2
<i>Szenario</i>	Auswahl des Szenarios	Kap. 6.5.2
<i>Informationsdialog</i>	Abfrage/Änderung der Elementattribute	Kap. 6.5.3
<i>Editierdialog</i>	Erstellung von Knoten und Strängen	Kap. 6.5.3
<i>Verschieben</i>	Verschieben von Knoten und Strängen	Kap. 6.5.3
<i>Zusammenfügen</i>	Vereinigung zweier Stränge zu einem Strang	Kap. 6.5.3
<i>Armaturen</i>	Einfügen einer Pumpe oder Armatur	Kap. 6.5.3
<i>Löschen</i>	Löschen eines Elements	Kap. 6.5.3
<i>Modell</i>	Menü mit Werkzeugen zur Datenaufbereitung und Netzanalyse	Kap. 6.7, 6.4 und 6.6
<i>Längsprofil</i>	Anzeige eines Längsprofils mit Drucklinie	
<i>Erhebungspunkt</i>	Eingabe der Erhebungsdaten	Kap. 7.2
<i>Statistik</i>	Menü für die Netz- und Schadenstatistik	Kap. 7.3.4
<i>Sprachauswahl</i>	Auswahl der Sprache (De, Fr, En)	

Eingabe neuer Armaturen und Pumpen erfolgt mit einem weiteren Werkzeug (*Armaturen*). Die Eigenschaften der Leitungen und Knoten sowie der Armaturen und Pumpen können mit dem *Informationsdialog* abgefragt und geändert werden. Zur Modifikation bestehender Systemelemente im Netzkataster können die Werkzeuge *Verschieben*, *Zusammenfügen* und *Löschen* genutzt werden. Die für die hydraulische Modellierung notwendige Topologie wird, wie in Kapitel 6.5.3 beschrieben, bei der Erstellung oder Modifikation von Systemelementen im Netzkataster automatisch erzeugt. Abbildung 6.13 zeigt den *Editierdialog* sowie die *Informationsdialoge* der Knoten und Stränge.

Zur Koordination des Datenerhebungsprozesses können mit dem Werkzeug *Erhebungspunkt* Knoten, an denen Daten erhoben wurden, als Erhebungspunkte definiert werden. An diesen Knoten steht ein zusätzlicher Dialog zur Verfügung, mit dem die erhobenen Daten, Photos und Vermessungsskizzen gespeichert sowie die Qualität bzw. Vollständigkeit der Daten vermerkt werden kann (s. Abb 7.6). Für eine Analyse des Fortschritts können die Erhebungspunkte im Netzkataster visualisiert werden (s. Abb 7.3). Die Anwendung des Werkzeugs im Rahmen der Katasteraktualisierung ist ausführlich in Kapitel 7.2 beschrieben.

Für die objektbezogene Speicherung von Schadensdaten kann im Informationsdialog der Stränge ein zusätzlicher Dateneingabedialog geöffnet werden (s. Abb. 6.13 und 7.9), der auf das Erhebungsformular abgestimmt ist. Die Vorgehensweise zur Charakterisierung und Dokumentation von Schäden ist umfassend in Kapitel 7.3 dargestellt. Die gespeicherten Schäden sowie der Status der Reparatur können im Netzkataster angezeigt werden (s. Abb. 6.12). Für die statistische Auswertung der

Abbildung 6.13: *Editierdialog* sowie *Informationsdialog* der Stränge und Knoten

Schadensdaten steht im Menü *Statistik* der Fachschale eine Applikation zur Verfügung (s. Abb. 7.10). Im gleichen Menü können statistische Werte des Wasserverteilungsnetzes, z.B. die gesamte Leitungslänge oder die verbauten Materialien und Durchmesser, abgefragt werden.

#### 6.8.4 Datenaufbereitung und Modellierung

Zur Aufbereitung verfügbarer Rohdaten, die nicht den topologischen Anforderungen der hydraulischen Modellierung (Knoten-Strang-Beziehung) genügen, stehen im Menü *Modell* Applikationen zum Import von Punktmengen als Knoten und zur automatisierten Erstellung eines Netzgraphen aus einer Punkt- und Linienmenge zur Verfügung.

Die aufwändige und komplexe Verteilung von Wasserbedarfswerten auf die Knoten kann mit einer weiteren, im Menü *Modell* verfügbaren Applikation effizient und präzise gelöst werden. Dabei werden den Knoten über Einzugsgebiete Personenzahlen zugeordnet. Die Wasserbedarfswerte der Knoten ergeben sich aus dem einwohnerbezogenen Tagesbedarf und der zugeordneten Personenzahl. Die Einzugsgebiete werden mit einem Voronoi-Diagramm ermittelt. Zur Ermittlung der Personenzahlen in den Einzugsgebieten stehen zwei Verfahren zur Auswahl. Die Personenzahl kann entweder über die Bevölkerungsverteilung oder über die Gebäudeverteilung im Versorgungsgebiet ermittelt werden. Für die Auswahl der Berechnungsoptionen und die Angaben der Eingangsdaten steht ein Dialog zur Verfügung. Die Zuordnung der Bedarfswerte erfolgt automatisch. Die Einzugsgebiete können mit der Benut-

zeroberfläche des integrierten Instruments visualisiert werden. Abbildung 6.14 zeigt die Visualisierung der Knoten, der Gebäudeobjekte sowie der Knoteneinzugsgebiete eines Versorgungsgebiets.

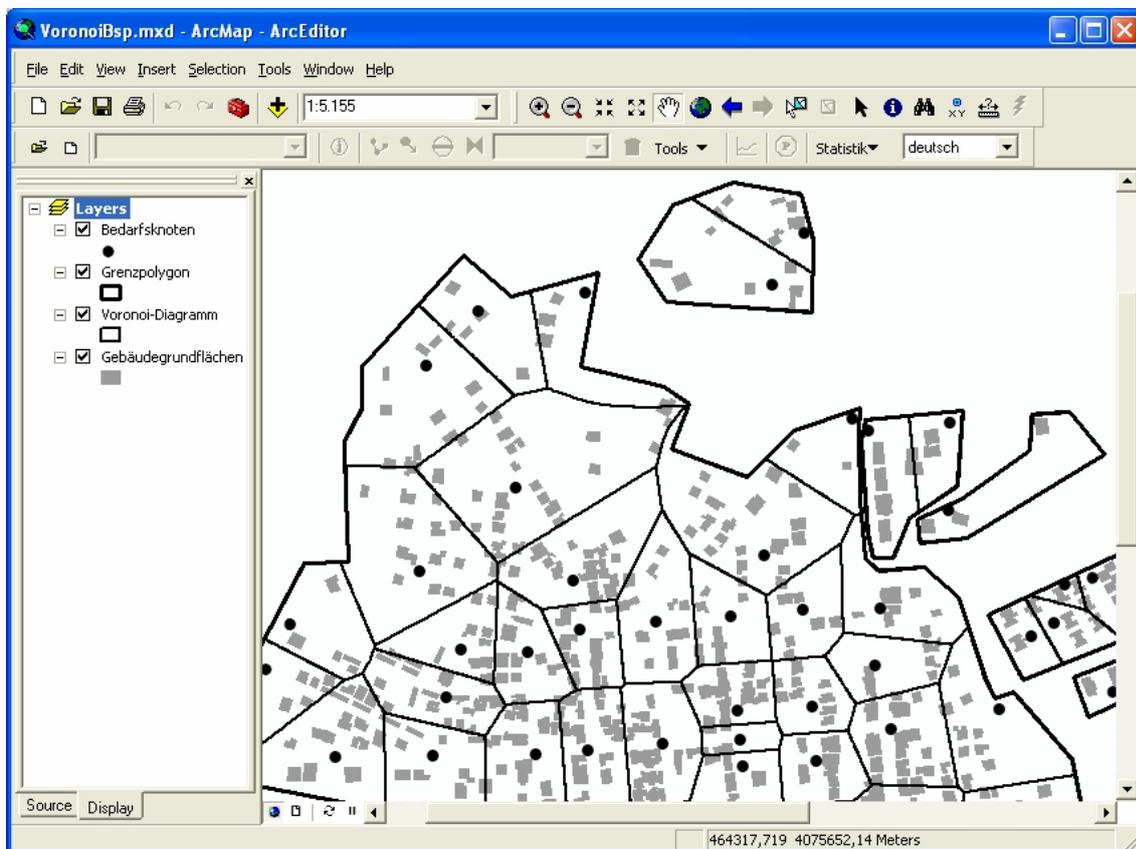


Abbildung 6.14: Visualisierung der Knoten, Gebäudeobjekte sowie der mit der Applikation ermittelten Knoteneinzugsgebiete (Voronoi-Diagramm)

### 6.8.5 Analyse und Planung

Im Menü *Modell* der Fachschale stehen mehrere Applikationen zur hydraulischen Analyse des modellierten Wasserverteilungsnetzes zur Verfügung. Ein Dialog für Simulationsrechnungen ermöglicht die Einstellung der Berechnungsparameter und die Ausführung der Simulation. In den Informationsdialogen der Stränge und Knoten stehen nach einer Berechnung zusätzliche Dialoge zur Visualisierung der Ergebnisse zur Verfügung. Für die Knoten können Druck- und Potentialdiagramme angezeigt werden. Für jeden Strang kann der Durchfluss, der Druckhöhenverlust und die Fließgeschwindigkeit in einem Diagramm dargestellt werden. Weitere Diagramme für die Pumpen (Leistungsbedarf, Betriebspunkt), Behälter (Wasserspiegel, Fluktuation) und Armaturen (Zustand) stehen zur Verfügung. Abbildung 6.15 zeigt den Ergebnisdialog des Knotendrucks bei einer zeitabhängigen Simulation.

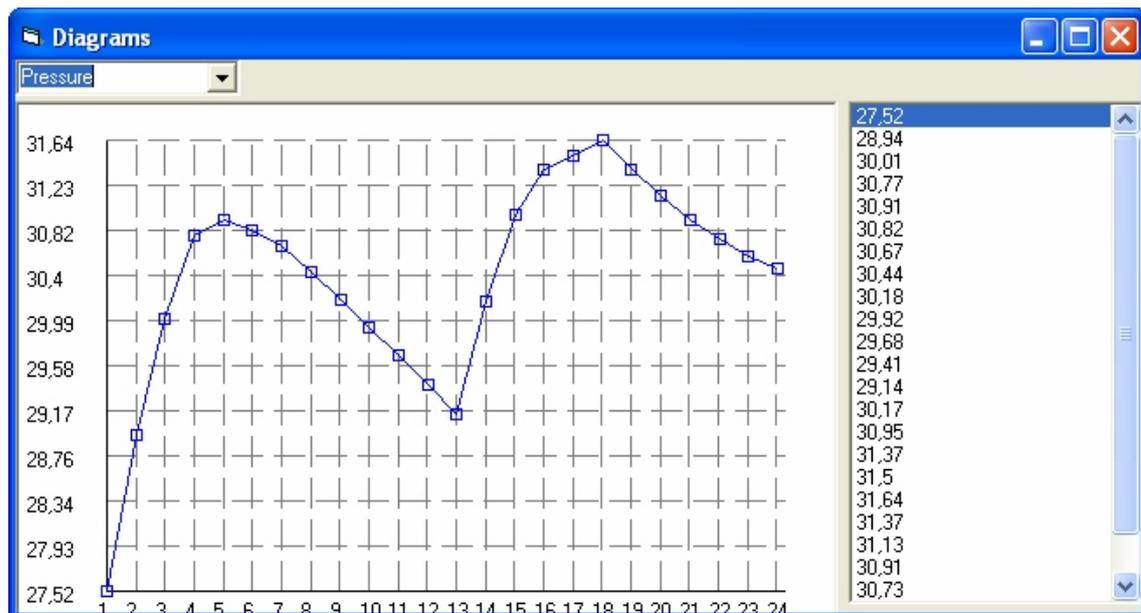


Abbildung 6.15: *Ergebnisdialog* (Druck am Knoten) einer Simulationsrechnung

Die Topologie des modellierten Netzes kann mit der Applikation zur Graphen-dekomposition analysiert werden. Abbildung 6.12 zeigt neben der Visualisierung einiger Systemelemente die mit dem Graphenmodell ermittelten Maschen, Brücken und nicht versorgten Netzbereiche.

### 6.8.6 Anwendung in Béni Abbès und Übertragbarkeit

Das integrierte Instrument wurde zunächst für die Anwendung im Fallbeispiel Béni Abbès entwickelt. Im Rahmen des Kooperationsprojekts wurde das Instrument genutzt, um die verfügbare Datengrundlage zu digitalisieren und ein Netzkataster aufzubauen (s. Kap. 5.3). Außerdem wurde das Instrument zur Analyse des bestehenden Netzes (s. Kap. 4.3) und zur Planung der Umstrukturierung eingesetzt (s. Kap. 5.5.4). In Verbindung mit den in Kapitel 7 beschriebenen Arbeitsprozessen wurde das Instrument schließlich als zentrale Datenhaltung in der lokalen Organisation der Wasserversorgung implementiert (s. Kap. 7.4). Für die Aktualisierung und Nutzung des integrierten Instruments wurde Personal identifiziert und in mehreren Schulungsblöcken ausgebildet. Für die tägliche Nutzung in Béni Abbès wurden die Funktionalitäten des Instruments in einem ausführlichen Nutzerhandbuch beschrieben (Klingel u. a., 2009b).

Durch die konkrete Anwendung des Instruments zum Aufbau des Netzkatasters und zur Umstrukturierungsplanung noch in der Entwicklungsphase konnte der tatsächliche Bedarf an Funktionalitäten ermittelt und optimal umgesetzt werden. Auch stellte die über mehrere Jahre begleitete Anwendung des Instruments durch die algerischen Projektpartner zur Aktualisierung des Netzkatasters eine wichtige Refle-

xion aus Sicht der Nutzer dar, die für die Anpassung des Werkzeugs genutzt wurde. Damit konnte ein an die Bedarfsituation und an die lokalen strukturellen und sozio-ökonomischen Gegebenheiten angepasstes Werkzeug entwickelt werden. Nach Abschluss der Schulungsmaßnahmen konnte durch die weitere beratende Begleitung der Projektpartner im Rahmen des Kooperationsprojekts die Praxistauglichkeit des Instruments im Fallbeispiel festgestellt werden (s. auch Kap. 7.4).

Die Anwendung des Instruments ist jedoch nicht auf Béni Abbès beschränkt. Der Großteil der Werkzeuge ist unabhängig der Systemspezifika einsetzbar. Eine Anpassung der in der Datenbank hinterlegten Attribute, wie z.B. verwendete Leitungsmaterialien oder Schadenscharakteristika, auf weitere Systeme ist problemlos durch den Anwender möglich. Lediglich die auf die Arbeitsprozesse angepassten Werkzeuge zur Koordination und Visualisierung der Datenerhebungen wurden speziell für die Anforderungen in Béni Abbès entwickelt. Bei Wasserversorgern ähnlicher Ausprägung und Anforderungen ist die Anwendung aber ohne Einschränkungen möglich.

Der finanzielle Aufwand zur Beschaffung des Instruments als Arbeitsplatzlösung ist vergleichsweise gering. Zunächst wird ein Computer mit dem Betriebssystem Microsoft Windows benötigt, der das Programm ArcGIS unterstützt. Die Lizenzgebühren für *ArcGIS Desktop* in der Basisversion *ArcView* sowie für das Datenbankprogramm Microsoft Access fallen zwingend an. Allerdings ist Microsoft Access im Office-Paket von Microsoft bereits enthalten. Die Wasserverteilungssystem-Fachschale wurde im Rahmen des Kooperationsprojekts der DHW als ausführbare Installationsdatei zur freien Verfügung übergeben. Es ist angedacht, die Installationsdatei sowie ggf. den Programmcode als Open-Source-Projekt im Internet frei zugänglich zu machen.



# 7 Standardisierte Arbeitsprozesse zur Datenhaltung und Modellierung

## 7.1 Zielsetzung und Überblick

Für den nachhaltigen, funktionierenden Betrieb eines Systems sind Daten in adäquater Qualität (Aktualität, Genauigkeit, Vollständigkeit) unerlässlich. Dies gilt auch für jegliche Planung und Durchführung von Maßnahmen zur Ertüchtigung nicht oder nur eingeschränkt funktionsfähiger Verteilungssysteme und damit auch für die Umsetzung des in Kapitel 5 beschriebenen Konzepts. In vielen Entwicklungsländern sind die verfügbaren Daten von Wasserverteilungssystemen jedoch ungenügend (s. Kap. 4). Zur Verbesserung der Situation muss zunächst eine verlässliche Datenbasis aufgebaut werden.

Für ein nachhaltiges Datenmanagement sind neben der Verfügbarkeit angepasster Technologien deren Einbindung in die lokale Organisationsstruktur sowie die Ausbildung und Motivation der beteiligten Fachkräfte entscheidend (Thibodeaux, 2005). Kapitel 6 behandelt ein flexibel einsetzbares Werkzeug für die Datenhaltung und Systemanalyse. Kapitel 7 behandelt auf dieses Werkzeug abgestimmte Arbeitsprozesse zur Erhebung der Systemdaten, zur Aktualisierung des Netzkatasters und zum Aufbau einer Schadensdatenbank.

Wie das im vorigen Kapitel beschriebene integrierte Instrument basiert die Entwicklung der Arbeitsprozesse auf der in Kapitel 4 dargestellten Mängelanalyse. Die Arbeitsprozesse wurden zunächst für die Organisation und Kapazitäten des Wasserversorgers im Fallbeispiel Béni Abbès entwickelt und dort umgesetzt (Klingel u. a., 2009b). Gemeinsam mit den zuständigen Behörden wurde die Integration der Arbeitsprozesse in die bestehende Organisation der Wasserversorgung erarbeitet und Verantwortlichkeiten definiert. Die beteiligten Fachkräfte wurden in mehrwöchigen Schulungen aufgabenspezifisch ausgebildet und bei der Ausübung ihrer Aufgaben begleitet (IWG, 2009). Die Arbeitsprozesse sind dem Fallbeispiel entsprechend für kleine und mittlere Wasserversorger ausgelegt und hier zunächst in verallgemeinerter Form dargestellt. Für eine Übertragung auf andere Systeme müssen die Prozesse an die jeweilige Organisation angepasst werden. Die prinzipielle Vorgehensweise sowie die Einbindung des integrierten Instruments gelten hingegen allgemein.

In Kapitel 7.2 ist der entwickelte Arbeitsprozess zur Schaffung und Pflege eines Netzkatasters beschrieben. Der beschriebene Prozess umfasst alle Arbeitsschritte von der Koordination über die Datenerhebung im Feld bis zur Datenverwaltung. Das Netzkataster wird im integrierten Instrument, das über entsprechende Werk-

zeuge zur Verwaltung der Daten und zur Koordination des Gesamtprozesses verfügt, umgesetzt (s. Kap.6). Das hydraulische Modell wird durch dessen Integration zusammen mit dem Netzkataster aufgebaut.

In Ergänzung zum fundamentalen Prozess der Schaffung und Pflege eines Netzkatasters wird in Kapitel 7.3 ein Prozess zur Dokumentation von Netzschäden und deren Reparatur beschrieben. Das Leitungsnetz als zentraler Teil eines Wasserversorgungssystems hat hohen technischen Anforderungen zu genügen. Außerdem stellt das Leitungsnetz den größten Teil des Anlagevermögens eines Wasserversorgungssystems dar. Die Erhaltung und Verbesserung der Substanz des Leitungsnetzes ist deshalb technisch, hygienisch und betriebswirtschaftlich notwendig (Hoch und Fischer, 2007). Die hier dargestellte standardisierte Erfassung und Dokumentation der Schäden sowie deren Reparatur dient dem Aufbau einer Schadenstatistik und damit der notwendigen Datenbasis für zentrale Methoden der Substanzerhaltung (s. Kap. 2.5.3.4). Die objektbezogene Speicherung der Daten im Netzkataster des integrierten Instruments ermöglicht die automatisierte statistische Auswertung und benutzerdefinierte Visualisierung. Der Prozess schafft eindeutige Vorgaben, Transparenz und klare Verantwortlichkeiten bei der Aufnahme und Reparatur von Schäden und damit letztendlich eine verbesserte Instandhaltung.

Die dargestellten Arbeitsprozesse wurden wie oben erwähnt aus dem Bedarf im Fallbeispiel Béni Abbès entwickelt, an die dort gegebenen Randbedingungen angepasst und in die bestehende Organisationsstruktur integriert. Diese Umsetzung wird abschließend in Kapitel 7.4 umrissen.

## 7.2 Aufbau und Aktualisierung einer Systemdatenbasis

### 7.2.1 Konzept

Ausgehend von einer mangelhaften Datenbasis ergibt sich ein zweischichtiger Prozess zur Umsetzung einer nachhaltigen Datenhaltung. Zum einen muss die bestehende Datenbasis überprüft und vervollständigt werden. Zum anderen müssen Veränderungen am Leitungsnetz dokumentiert und in das Netzkataster übernommen werden. Während der Aufbau einer umfassenden Datenbasis (s. Kap. 7.2.3) einen endlichen Prozess darstellt, ist die Dokumentation des sich dynamisch verändernden Leitungsnetzes und die entsprechende Aktualisierung des Netzkatasters ein fortlaufender Prozess (s. Kap. 7.2.4).

Entsprechend ihrer Definition stellen Knoten im Modell bzw. Netzkataster eine Veränderung im Verlauf eines Leitungsstranges dar. Die Erhebung umfassender Daten an allen Knoten ergibt daher ein schlüssiges Informationsbild der Elemente des Leitungsnetzes. Das geschaffene Informationsbild kann sukzessive um fehlende (unvollständige Datenbasis) oder neue (Netzerweiterungen) Knoten erweitert werden. Ein Knoten, an dem Datenerhebungen durchgeführt werden, wird im Folgenden Erhebungspunkt genannt. Für ein vollständiges Informationsbild ist außerdem die

Lage der Erhebungspunkte zu ermitteln.

Die Erhebungspunkte werden deshalb von bestehenden Geländepunkten aus eingemessen. Dies ermöglicht ein einfaches Wiederauffinden der Leitungen. Im Netzkataster werden die Lage qualitativ dargestellt sowie die Vermessungsdaten hinterlegt. Die Vermessung mit Bezug auf ein lokales oder globales Koordinatensystem, z.B. mit GPS, ist theoretisch ebenfalls umsetzbar. Die vorgeschlagene Vermessungsmethode berücksichtigt das meist geringe Know-how des ausführenden Personals sowie die eingeschränkte Verfügbarkeit von Messgerät. Außerdem ist die qualitative Lagerfassung der Leitungen für die hydraulische Berechnung hinreichend genau. Die Lage und Höhe der Behälter sind demgegenüber jedoch präziser zu erfassen. Hier ist allerdings auch keine Dynamik zu erwarten.

Für das Management der Datenerhebungen sowie die Digitalisierung der erhobenen Daten stehen Werkzeuge des integrierten Instruments zur Verfügung (s. Kap. 6.8 und 7.2.3.8). Die eigentliche Datenerhebung wird mit einem standardisierten Formular dokumentiert (s. Abb. 7.5). Für jede Aufgabe im Gesamtprozess sind Akteure sowie die Schnittstellen zwischen den Akteuren definiert. Im Folgenden sind zunächst die Akteure und deren Verantwortlichkeiten und dann die Prozessabläufe zum Aufbau und zur Aktualisierung der Datenbasis beschrieben.

### 7.2.2 Verantwortlichkeiten

Voraussetzung für die Realisierung des Aufbaus und der Pflege des Leitungskatasters ist die Schaffung einer klaren Personalstruktur mit eindeutigen Verantwortlichkeiten. Üblicherweise lassen sich in der Organisation der Wasserversorger drei Ebenen unterscheiden: die Entscheidungsebene, die Planungsebene und die Umsetzungsebene. Diese Ebenen berücksichtigend ergeben sich vier Gruppen von Akteuren für die Umsetzung der Datenhaltung. Die Akteure sowie ihre Aufgaben und Abhängigkeiten sind im Folgenden kurz beschrieben sowie in Abbildung 7.1 schematisch dargestellt.

**Koordination:** Die Koordination stellt die Entscheidungsebene dar. Sie ist für alle Akteure weisungsbefugt und übt eine Leitungs- und Kontrollfunktion aus. Mit der Koordination sollte daher Personal betraut werden, das eine leitende Funktion innerhalb der Wasserversorgung ausübt.

**Dokumentation:** Die Dokumentation ist für das Netzkataster zuständig und stellt damit die Planungsebene dar. Bei der Dokumentation laufen die erfassten Veränderungen am Leitungsnetz zusammen. Das Netzkataster wird von der Dokumentation aktualisiert und ggf. werden Einsätze zur zusätzlichen Datenerhebung veranlasst und koordiniert. Des Weiteren ist die Dokumentation für die Archivierung der Erhebungsformulare nach entsprechender Aktualisierung des Katasters und für die Bereitstellung der im Kataster gespeicherten Informationen an die Nutzer zuständig. Auf Grund der planerischen und technischen Anforderungen sollte die Dokumentation von Ingenieuren ausgeübt werden.

**Datenerfassung:** Alle Fachkräfte der Ausführungsebene, die direkt am Leitungsnetz arbeiten, werden unter der Bezeichnung Datenerfassung zusammengefasst. Die Fachkräfte dokumentieren die Maßnahmen am Leitungsnetz in dem standardisierten Erhebungsformular und lassen dies der Dokumentation zur Aktualisierung des Datenbestands zukommen. Außerdem kann Personal der Datenerfassung von der Dokumentation oder der Koordination mit der gezielten Datenerhebungen zur Vervollständigung oder Überprüfung des Datenbestands beauftragt werden.

**Nutzer:** Alle Personen, welche die im Kataster verwalteten Systemdaten verwenden, sind unter dem Begriff Nutzer zusammengefasst. Die angeforderten Informationen zum Leitungsnetz werden, ein legitimer Zugriff vorausgesetzt, von der Dokumentation zur Verfügung gestellt.

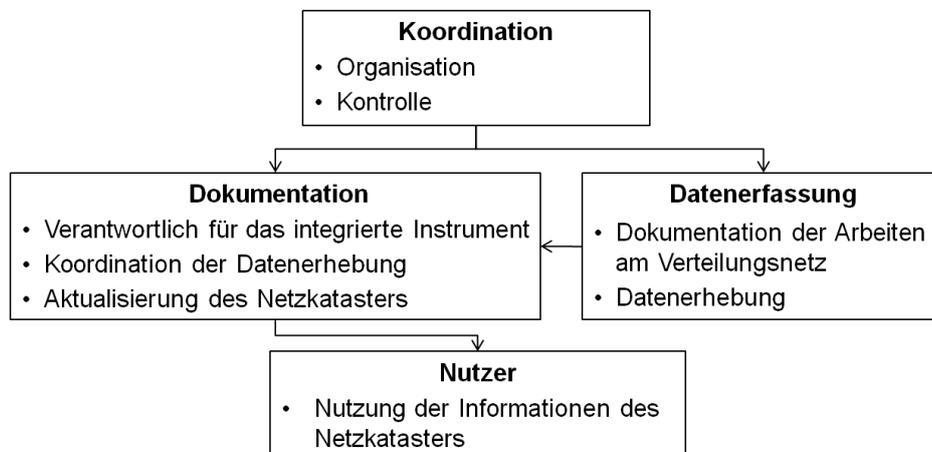


Abbildung 7.1: Akteure des Arbeitsprozesses

In Abhängigkeit der lokalen Organisation sowie der sozio-kulturellen Randbedingungen sind die vier Akteurgruppen weiter zu differenzieren und gegebene Zuständigkeiten, z.B. Abteilungen, zu berücksichtigen. Fällt beispielsweise das Freilegen der Leitungsabschnitte nicht in den Aufgabenbereich der im Feld arbeitenden Techniker (Datenerfasser), sind die Zuständigen in den Prozess zu integrieren.

## 7.2.3 Prozessablauf zum Aufbau der Systemdatenbasis

### 7.2.3.1 Überblick

Der Prozess beginnt mit der strategischen Entscheidung, wo welche Daten erhoben werden sollen. Die Dokumentation definiert die entsprechenden Netzbereiche als Erhebungspunkte im Netzkataster, stellt die Erhebungsformulare und Übersichtspläne aus und delegiert die Erhebungen an die Datenerfassung (s. Kap. 7.2.3.2 und 7.2.3.3). Diese legt bei Bedarf die Netzbereiche frei oder veranlasst eine Freilegung, skizziert

und vermisst den Netzbereich, erhebt die technischen Daten und dokumentiert die Erhebungen in den Formularen (s. Kap. 7.2.3.4, 7.2.3.5, 7.2.3.6 und 7.2.3.7). Die Formulare werden der Dokumentation übergeben, die auf dieser Basis das Netzkataster aktualisiert (s. Kap. 7.2.3.8). Abschließend werden die Daten auf Vollständigkeit geprüft und ggf. ergänzende Datenerhebungen angeordnet (s. Kap. 7.2.3.9). Am Ende des Prozesses sind zu den Netzbereichen aktuelle Informationen zur Nutzung verfügbar. Die grundlegenden Schritte des Arbeitsprozesses sowie die entsprechenden Akteure sind schematisch in Abbildung 7.2 dargestellt.

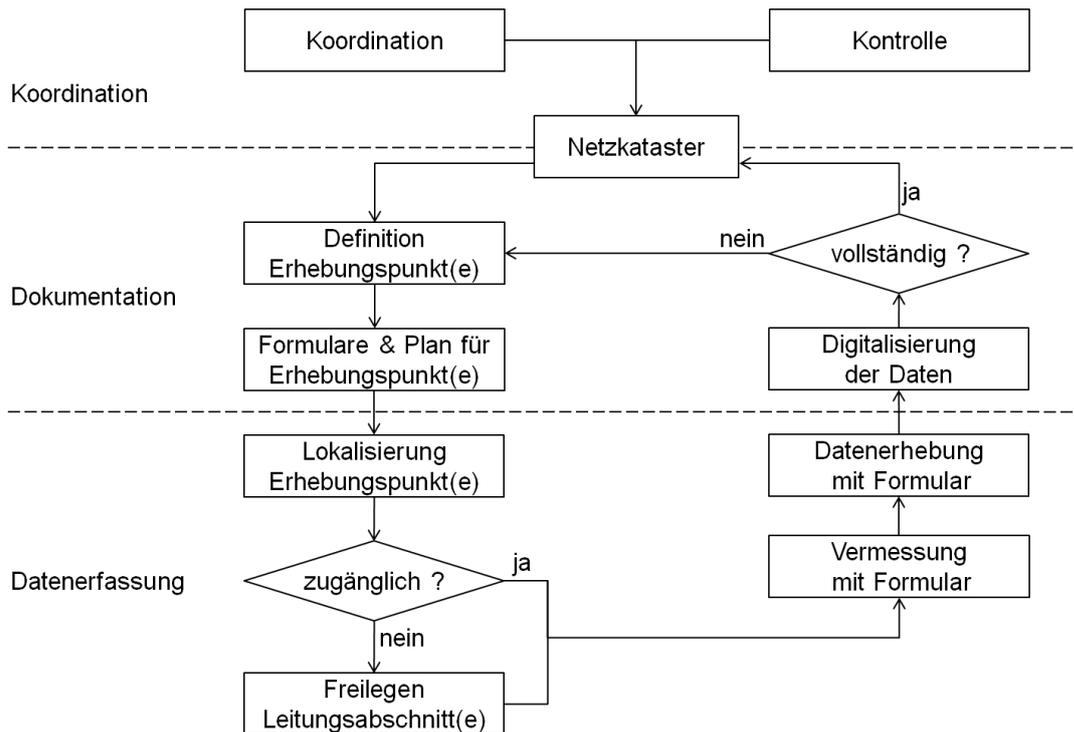


Abbildung 7.2: Ablaufdiagramm des Arbeitsprozesses zum Aufbau eines Netzkatasters

Die Koordination und Kontrolle sowie die Bereitstellung von Informationen sind keine Prozessschritte im eigentlichen Sinn und dem beschriebenen Prozess übergeordnet. Während der eigentliche Prozess immer wieder neu initiiert wird und sequentiell abläuft, findet die Koordination und die Bereitstellung von Informationen kontinuierlich, nicht an den Prozessablauf gebunden statt. Die Koordination (Managementebene) veranlasst und kontrolliert die Datenerhebungen zum Aufbau eines Netzkatasters. Die eigentliche Organisation der Abwicklung liegt bei der Dokumentation (Planungsebene). Diese stellt auch, die Genehmigung seitens der Koordination vorausgesetzt, Informationen auf Anfrage an Nutzer zur Verfügung. Im Weiteren sind die eigentlichen Prozessschritte näher erläutert.

### 7.2.3.2 Definition von Erhebungspunkten

Die Dokumentation definiert nach Vorgaben der Koordination die in einem bestimmten Zeitraum abzuarbeitenden Erhebungspunkte. Dies können z.B. Netzbereiche sein, die im Zuge der Umstrukturierungsplanung zu verifizieren sind (s. Kap. 5.3). Handelt es sich dabei um eine Überprüfung bereits im Kataster vorhandener Netzbereiche, werden die entsprechenden Knoten als Erhebungspunkte markiert. Sind die zu untersuchenden Netzbereiche noch nicht als Knoten und Stränge modelliert, können diese, sofern die Leitungsführung bekannt ist, provisorisch angelegt und die Knoten als Erhebungspunkte definiert werden.

Ist die Leitungsführung nicht bekannt, werden Blanko-Formulare für diese Bereiche ausgegeben und die Knoten nach der Erhebung als Erhebungspunkte definiert (s. Kap. 7.2.3.3). Für die Definition eines Knoten als Erhebungspunkt steht ein spezielles Werkzeug der Wasserverteilungssystem-Fachschale zur Verfügung. Einem Erhebungspunkt wird automatisch die Knoten-Bezeichnung als Punkt-Nr. zugewiesen. Dadurch wird eine mehrfache Vergabe der selben Punkt-Nr. vermieden. Die Punkte können im Netzkataster als Achteck dargestellt werden (s. Abb. 7.3).

Dadurch ist eine Visualisierung der bereits getätigten oder laufenden Erhebungen und somit eine Kontrolle möglich. Durch die Definition eines Knotens als Erhebungspunkt ist außerdem der *Informationsdialog* des Knotens automatisch um Funktionalitäten zur Archivierung der erhobenen Daten und Formulare erweitert (s. Kap. 7.2.3.8).

### 7.2.3.3 Ausstellung von Formularen und Übersichtsplänen

Für die abzuarbeitenden Erhebungspunkte werden von der Dokumentation ein Übersichtsplan zur Lokalisierung sowie Formulare für jeden Erhebungspunkt erstellt (s. Abb. 7.3 und 7.5). Wurde bereits in einer früheren Erhebung ein Formular zu einem Punkt ausgestellt, wird dieses ergänzt. In den Formularen werden Erhebungspunkt-Nr., Formular-Nr., Ausstellungsdatum, Bearbeiter und Lagebeschreibung angegeben. Bei mehreren Formularen zum gleichen Punkt wird fortlaufend nummeriert. Abbildung 7.5 zeigt ein mit den entsprechenden Angaben angelegtes Formular. Die Dokumente werden an die Datenerfassung übergeben und die eigentliche Erhebungen an jedem Punkt veranlasst.

### 7.2.3.4 Freilegung eines Netzbereichs

Der zu untersuchende Netzbereich wird von der Datenerfassung lokalisiert. Dazu ist es ggf. notwendig, Mitarbeiter zu befragen oder in Planunterlagen zu recherchieren. Ist der Netzbereich nicht durch z.B. Schächte, oberirdische Verlegung oder leicht zu entfernende Überdeckung zugänglich, wird er freigelegt oder die Freilegung durch Dritte veranlasst. Ist auf Grund der Zuständigkeiten der Datenerfassung eine Freilegung ausschließlich durch Dritte möglich, sind diese in den allgemeinen Prozessablauf mit einzubinden und als weitere Schnittstelle in der Organisation zu berücksichtigen.

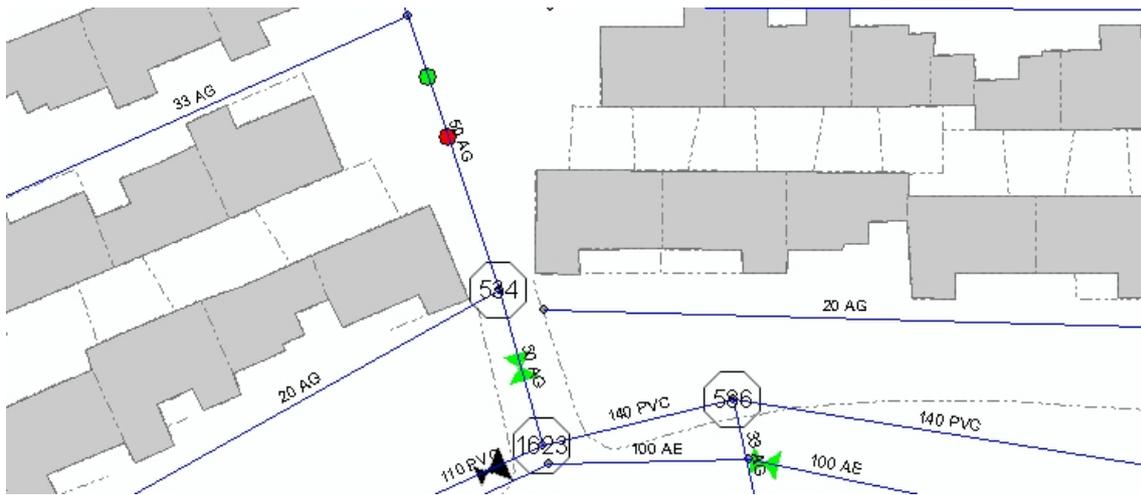


Abbildung 7.3: Auszug aus dem Netzkataster mit definierten Erhebungspunkten

Nach der Freilegung können die Vermessung und die Datenerhebung durchgeführt werden.

### 7.2.3.5 Skizzierung eines Netzbereichs

Als erster Schritt der Datenerhebung werden der Netzabschnitt und seine nähere Umgebung in der Draufsicht im Erhebungsformular mit standardisierter Symbolik und Beschriftung skizziert. Um Missverständnisse zwischen Datenerfassung und Dokumentation zu vermeiden, ist auf dem Formular eine Legende der zu verwendenden Symbole gegeben. In der Skizze wird Folgendes festgehalten:

- Die nähere Umgebung des Netzbereichs (Straßen, Häuserfronten, markante Umgebungspunkte)
- Der Netzbereich (Leitungen und vorhandene Armaturen)
- Die Vermessungspunkte (ggf. durch einen kleinen Strich markiert)
- Die Bezeichnungen der Vermessungspunkte, Netzpunkte und Leitungsabschnitte
- Die Himmelsrichtung (Vervollständigung der Windrose)

Alle eingetragenen Elemente werden fortlaufend nummeriert. Dabei werden markante Punkte des Verteilungsnetzes (Armaturen, Leitungsverzweigungen, Leitungskreuzungen, Durchmesserwechsel) mit arabischen Zahlen (1, 2, 3, ...), Leitungsabschnitte mit römischen Zahlen (I, II, III, ...) und Vermessungspunkte mit lateinischen Kleinbuchstaben (a, b, c, ...) bezeichnet. Abbildung 7.4 zeigt beispielhaft die Örtlichkeit eines Erhebungspunkts mit freigelegtem Netzbereich. Die entsprechende Skizze im Zeichenfeld des Erhebungsformulars ist in Abbildung 7.5 dargestellt.

### 7.2.3.6 Vermessung eines Netzbereichs

Um die Lage der Elemente eines Netzabschnitts eindeutig zu bestimmen, werden die Abstände der Elemente zu mindestens drei Vermessungspunkten gemessen. Als Vermessungspunkte werden Punkte gewählt, deren Dauerhaftigkeit gewährleistet ist (z.B. Hausecken oder Mauerecken). Sind nicht genügend natürliche Vermessungspunkte vorhanden, wird ein Punkt konstruiert (z.B. in einem bestimmten Abstand zu einem natürlichen Vermessungspunkt). Im Notizfeld für Netzelemente des Erhebungsformulars werden alle im Zeichenfeld skizzierten punktuellen Netzelemente zeilenweise aufgeführt und deren Einmessung vermerkt:

- Erste Spalte: Bezeichnung des Elements (arabische Zahlen)
- Zweite Spalte: Bezeichnung des Vermessungspunkts (lateinische Kleinbuchstaben) sowie deren Abstand [ $m$ ] zum Element
- Dritte Spalte: Tiefe [ $m$ ] des Elements unter Geländeoberkante
- Vierte Spalte: Typ des Elements (Armatortyp, Verzweigung, Kreuzung, Reduktion, Materialwechsel)

Abbildung 7.5 zeigt ein entsprechend der in Abbildung 7.4 dargestellten Situation ausgefülltes Erhebungsformular. Der Vermessungspunkt c ist dabei konstruiert.

### 7.2.3.7 Erhebung der technischen Daten eines Netzbereichs

Alle technischen Daten eines Netzabschnitts sind umfassend zu erheben und in der Skizze sowie im Notizfeld des Feldformulars zu vermerken. In der Skizze werden die technischen Daten folgendermaßen notiert:

- Durchmesser [ $DN$ ] der Leitungen (auf der Leitung)
- Materialabkürzung der Leitungen (auf der Leitung, hinter der Durchmesserangabe)
- Abschnittslängen [ $m$ ] der Leitungen (unter der Leitung)
- Armatortyp (in einem Beschreibungskasten mit Pfeil auf die Armatur)
- Stellgrößen der Armatur (im Beschreibungskasten der Armatur)

Für die Materialien der Leitungen werden die gängigen Abkürzungen verwendet (s. Kap 2.3.2.2). Analog können für die Armatortypen die entsprechenden Abkürzungen angegeben werden (s. Kap 3.4.5). Im Notizfeld für Leitungen sind alle Leitungen, deren Material und Durchmesser sowie Bemerkungen über Zustand und Beschaffenheit aufgeführt:

- Erste Spalte: Nummer des Leitungsabschnitts (römische Zahlen)
- Zweite Spalte: Durchmesser [ $DN$ ]
- Dritte Spalte: Materialkürzel
- Vierte Spalte: Bemerkungen über den Zustand des Leitungsabschnitts

Abbildung 7.5 zeigt ein entsprechend der in Abbildung 7.4 dargestellten Situation ausgefülltes Erhebungsformular.

## 7.2 Aufbau und Aktualisierung einer Systemdatenbasis

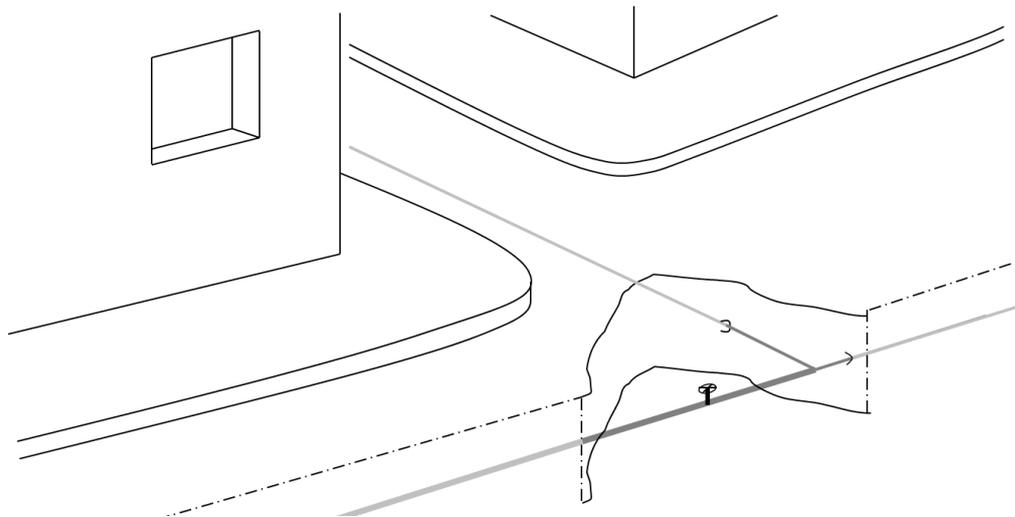


Abbildung 7.4: Beispielhafte Darstellung der Örtlichkeit eines Erhebungspunktes

Punkt-Nr.:	Formular-Nr.:	Datum:	Bearbeiter:	Ort (Adresse):
<b>1623</b>	<b>2</b>	<b>1.1.2010</b>	<b>Name</b>	<b>Straße A / Straße B</b>

Elemente								
Nr	Pkt	Distanz	Tiefe	Typ				
1	a	2,50	b	3,15	c	3,05	0,50	Verzweigung
2	a	2,40	b	4,10	c	2,75	0,50	Schieber
	c	a	2,00					GOK
								Hilfspunkt

Leitungsabschnitte			
Nr	Durchm.	Mat.	Bemerkung
I	80	PE	guter Zustand
II	125	PE	guter Zust., außer Betrieb
III	125	PE	guter Zustand
IV	80	PE	guter Zustand

**Legende**

- Leitung
- Endstück
- > Reduktion
- +— Verzweigung
- +— Kreuzung
- <— Armatur
- (P)— Pumpe

**Beschreibung**

Schieber zu

125 PVC  
2,50 m

200 PVC  
3,00 m

200 PVC → 125 PVC  
2,45 m

Abbildung 7.5: Formular für die Datenerhebung

183

### 7.2.3.8 Aktualisierung des Netzkatasters

Die ausgefüllten Formulare werden der Dokumentation zur Aktualisierung des Netzkatasters übergeben. Für die Aktualisierung stehen die Werkzeuge der Wasserverteilungs-Fachschale des integrierten Instruments zur Verfügung (s. Kap. 6.5.3 und 6.8). Bestehende Daten werden modifiziert, ergänzt oder gelöscht. Sind die erhobenen Netzabschnitte noch nicht im Kataster aufgenommen, werden diese neu eingepflegt und mit dem entsprechenden Werkzeug als Erhebungspunkt definiert (s. auch Kap. 7.2.3.3).

Im *Informationsdialog* der Erhebungspunkte werden die wesentlichen Informationen der Erhebung(en) wie Datum und Vollständigkeit sowie Bemerkungen eingegeben (s. auch Kap. 7.2.3.9). Des Weiteren werden die Erhebungsformulare des Punktes digital eingebunden. Dazu können Bilddateien (\*.jpg) verknüpft oder ein Scanvorgang aufgerufen werden. Beim Scannen eines Formulars wird die Bilddatei automatisch verknüpft. Damit stehen die Formulare digital und objektbezogen im Kataster zur Verfügung. Die originalen Formulare werden außerdem in einem Ordner archiviert. Abbildung 7.6 zeigt den *Informationsdialog* mit den erweiterten Funktionen für Erhebungspunkte.

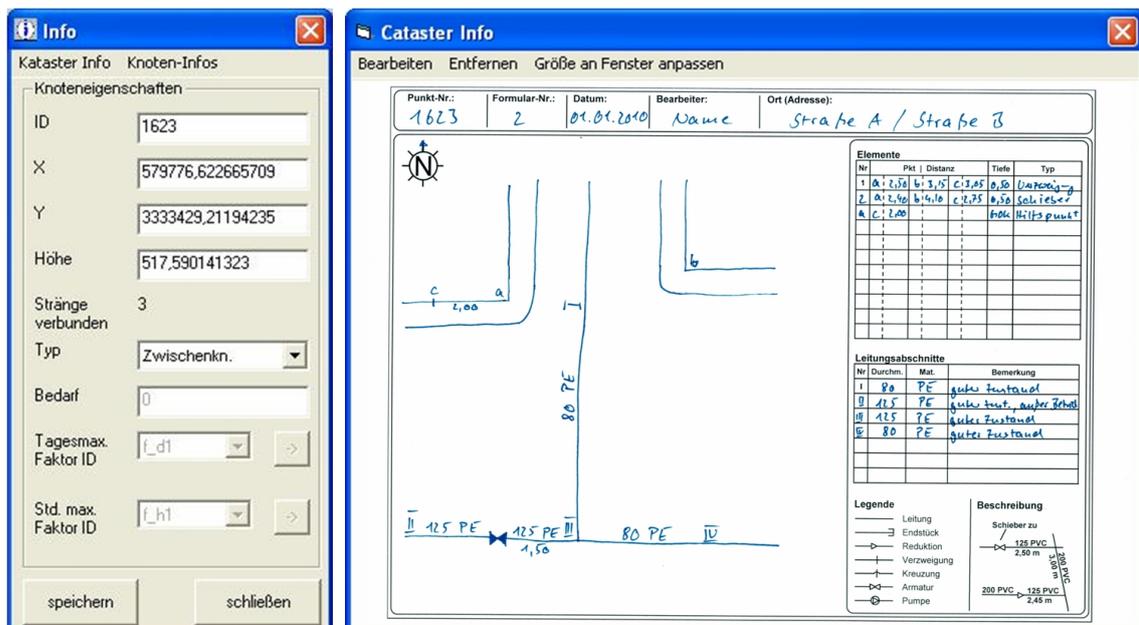


Abbildung 7.6: *Informationsdialog* (links) und *Erhebungspunktdialog* (rechts)

### 7.2.3.9 Prüfung der Daten auf Vollständigkeit

Abschließend wird von der Dokumentation die Vollständigkeit der Daten geprüft. Sind die Daten an den Erhebungspunkten unvollständig, wird diese Information im Netzkataster hinterlegt und in einer Liste vermerkt. Die Speicherung im Netzkataster ist im vorigen Kapitel beschrieben. Die Liste kann auf wenige Angaben wie

Punkt-Nr., Formular-Nr., Datum, fehlende Daten und erneute Erhebung veranlasst (ja/nein) beschränkt sein. U.U. bietet sich die Führung einer digitalen Liste in einem Tabellenkalkulationsprogramm an (z.B. Microsoft Excel). Dies ermöglicht die statistische Auswertung des Arbeitsfortschritts und der Qualität der überprüften Datenbasis (s. Kap. 4.3.4). Zu einem gegebenen Zeitpunkt wird erneut eine Erhebung veranlasst.

#### 7.2.4 Prozessablauf zur Aktualisierung der Systemdatenbasis

Auf Grund der natürlichen Dynamik eines Verteilungsnetzes ist die Datenbasis kontinuierlich zu aktualisieren. Die Datenerfassung setzt sich günstigerweise aus Personal der Instandhaltung zusammen. Also Personal, das ohnehin im Feld Arbeiten am Netz selbst durchführt oder Arbeiten am Netz begleitet. Arbeiten, bei denen das Leitungsnetz modifiziert wird, sind zu dokumentieren und in das Netzkataster einzupflegen.

Im Unterschied zu dem im vorigen Kapitel beschriebenen Prozess zum Aufbau einer Datenbasis geht die Initiative zur Datenerhebung hier von der Datenerfassung selbst aus. Die generelle Anweisung und Kontrolle erfolgt nach wie vor durch die Koordination. Allerdings gibt die Dokumentation nicht mehr die abzuarbeitenden Erhebungen vor. Dementsprechend ändert sich der im vorigen Kapitel beschriebene Prozess nur geringfügig.

Zunächst wird von der Datenerfassung ein Formular mit den Angaben Datum, Bearbeiter und Ort für den zu untersuchenden Netzbereich angelegt. Punkt-Nr. und Formular-Nr. werden von der Dokumentation nach der Übergabe des Formulars bei der Digitalisierung vergeben. In der Regel liegt der Netzbereich während der Durchführung der Arbeiten, die die Erhebung veranlassenden, offen. Der eigentliche Prozess beginnt daher mit dem Skizzieren des Netzbereichs (s. Kap. 7.2.3.5) und läuft im Weiteren wie im vorigen Kapitel beschrieben ab. Ist der Netzbereich nicht zugänglich, beginnt der Prozess mit dessen Freilegung (s. Kap. 7.2.3.4).

## 7.3 Aufbau und Aktualisierung eines Schadensregisters

### 7.3.1 Konzept

Der Prozess zur Abarbeitung eines Schadens wird gegliedert in Schadensmeldung, Schadenserfassung, Schadensreparatur und Schadensregistrierung. Für jeden Schritt sind zuständige Akteure definiert, die nach der Abarbeitung der eigenen Aufgaben den nächsten Schritt veranlassen (s. Kap. 7.3.2). Der Prozessablauf sowie die Daten der Schadensmeldung, -erfassung und -reparatur werden in einem entsprechend gegliederten standardisierten Formular dokumentiert und im Netzkataster gespeichert (s. Abb. 7.8). Durch die Veranlassung des jeweils nächsten Schritts durch den Zuständigen des vorhergehenden Schritts sowie das Gegenzeichnen der Zuständigen

wird die geradlinige Abwicklung des Prozesses und Transparenz in den Verantwortlichkeiten geschaffen.

Die eigentliche Erfassung der Schäden hat zunächst die genaue Lokalisierung und standardisierte Charakterisierung der Schäden als Basis für eine angepasste Reparaturmaßnahme zum Ziel. Die Charakterisierung der Schäden orientiert sich dabei am Arbeitsblatt W 395 der DVGW (1998b) und umfasst damit alle notwendigen Daten zur Erstellung einer aussagekräftigen Schadenstatistik (Roscher, 2008). Die Dokumentation der durchgeführten Reparaturen ermöglicht eine Analyse der Wirkungen sowie die generelle Kontrolle der Durchführung notwendiger Reparaturmaßnahmen. Die Speicherung der erhobenen Daten im Netzkataster ermöglicht eine Visualisierung der laufenden Prozesse und damit eine verbesserte Prozessabwicklung sowie deren objektbezogene Archivierung und automatisierte statistische Auswertung. Außerdem können über die objektbezogene Speicherung der Daten räumliche Wechselwirkungen und Häufungen analysiert werden. Für die Eingabe und Auswertung der Daten stehen angepasste Werkzeuge des integrierten Instruments zur Verfügung.

### 7.3.2 Verantwortlichkeiten

Analog zur personellen Organisation der in Kapitel 7.2 beschriebenen Aktualisierung eines Netzkatasters empfiehlt sich eine klare Personalstruktur mit den Akteuren Koordination, Dokumentation und Datenerfassung. Die Akteure sowie ihre Verantwortlichkeiten und Abhängigkeiten sind im Folgenden kurz beschrieben. Der eigentliche Prozessablauf ist im nächsten Kapitel dargestellt.

**Koordination:** Die Koordination übt eine Leitungs- und Kontrollfunktion aus. Der Informationsfluss wird durch die vorgegebene Hierarchie der Akteure gewährleistet. Die Koordination ist für die Einhaltung dieser Hierarchie zuständig. Außerdem nimmt die Koordination Schadensmeldungen auf und veranlasst die Erfassung eines Schadens, dessen Reparatur sowie die Datenspeicherung.

**Dokumentation:** Die Dokumentation ist für das Netzkataster des integrierten Instruments zuständig. Die Dokumentation pflegt die erhobenen Schadens- sowie Reparaturdaten anhand der Erfassungsformulare in das Netzkataster ein und stellt auf Anfrage Informationen zu den Schäden zur Verfügung. Die Entgegennahme und Übergabe der Formulare von bzw. zu der Koordination stellt die einzige Schnittstelle der Dokumentation dar. Die Dokumentation kann durchaus auch gleichzeitig die Funktion der Koordination ausüben.

**Datenerfassung:** Fachkräfte, die vor Ort Schäden erfassen und Reparaturmaßnahmen dokumentieren, werden unter der Bezeichnung Datenerfassung zusammengefasst. Gemäß ihrer originären Aufgaben stellt meist das für die Instandhaltung zuständige Personal die Datenerfassung dar. Dabei können die für die Erfassung

und die für die Reparatur des Schadens Zuständigen durchaus verschiedenen Personalgruppen zugehören. In diesem Fall ist jedoch ein eindeutiger Ablauf zu definieren. Die Dokumentation und Charakterisierung der Schadensfälle sowie die Dokumentation der Reparaturmaßnahmen wird mit dem standardisierten Erfassungsformular durchgeführt. Die Datenerfassung erhält von der Koordination bei einem gemeldeten Schaden den Auftrag zur Erfassung bzw. Reparatur. Wird bei Routinearbeiten (Inspektion, Wartung usw.) ein Schaden entdeckt, wird dieser eigeninitiativ erfasst und der nächste Schritt wie bei einem gemeldeten Schaden veranlasst.

### 7.3.3 Prozessablauf

#### 7.3.3.1 Überblick

Initial für die Datenerhebung ist ein Schaden am Versorgungsnetz. Dieser kann entweder dem Wasserversorger durch Dritte gemeldet oder während Routinearbeiten, z.B. im Rahmen der Instandhaltung, entdeckt werden. Ein gemeldeter Schaden wird von der Koordination in einem Erfassungsformular aufgenommen (s. Kap. 7.3.3.2). Die Dokumentation und Charakterisierung des Schadens mit einer ersten Einschätzung möglicher Reparaturmaßnahmen wird durch die Übergabe des Formulars an die Datenerfassung eingeleitet (s. Kap. 7.3.3.3). Wird der Schaden während Routinearbeiten von ausgebildetem Personal der Datenerfassung entdeckt, wird der Schaden umgehend von diesen erfasst (s. Kap. 7.3.3.4).

Kann der Schaden direkt repariert werden, wird die Reparaturmaßnahme nach der Durchführung im Formular dokumentiert (s. Kap. 7.3.3.5). Kann der Schaden nicht direkt behoben werden, wird das Formular der Koordination übergeben, die basierend auf der Schadenscharakterisierung eine Reparaturmaßnahme einleitet. Diese wird von den Durchführenden im gleichen Formular dokumentiert.

Das Formular wird nach der Erfassung der Reparatur der Koordination übergeben. Diese prüft den Vorgang und reicht das Formular zur Speicherung im Netzkataster und zur Archivierung der Dokumentation weiter (s. Kap. 7.3.3.6). Die Abarbeitung eines Schadens kann damit im Netzkataster verfolgt oder später analysiert werden. Die registrierten Schäden können räumlich analysiert und statistisch ausgewertet werden (s. Kap. 7.3.4).

Die grundlegenden Schritte des Arbeitsprozesses sowie die entsprechenden Akteure sind schematisch in Abbildung 7.7 dargestellt. Abbildung 7.8 zeigt das am Prozessablauf orientierte Erfassungsformular. Die Prozessschritte sind im Folgenden näher beschrieben.

#### 7.3.3.2 Aufnahme einer Schadensmeldung

Ein Schaden am Leitungsnetz wird z.B. bei einer Netzinspektion, bei einer Datenerhebung oder von Dritten entdeckt und gemeldet. Die Meldung wird von der Koordination aufgenommen. Im ersten Abschnitt des Erfassungsformulars wird Folgendes dokumentiert (s. Abb. 7.8, 1. Meldung):

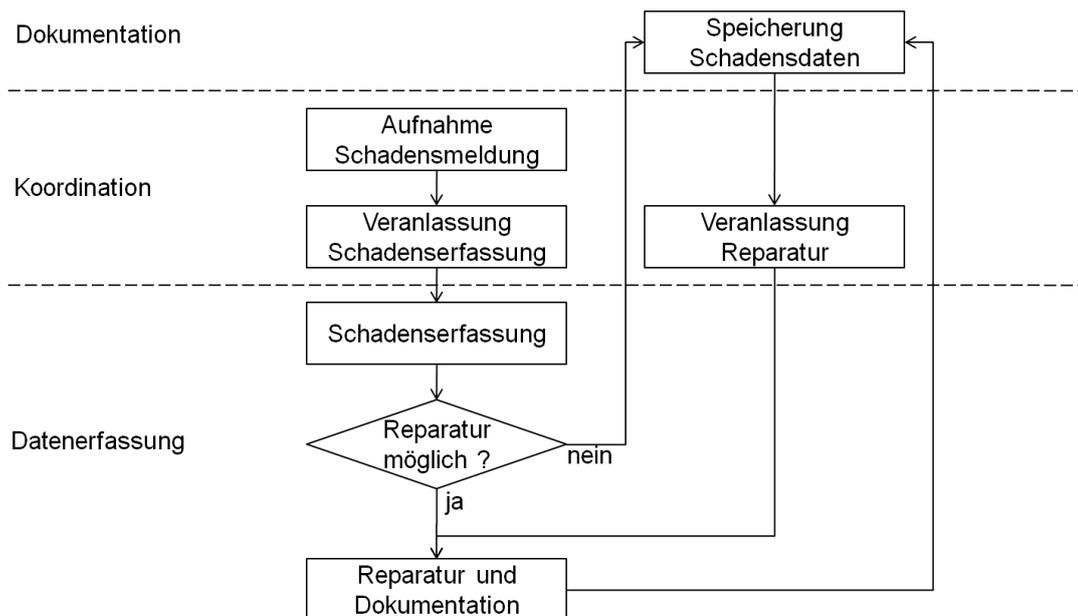


Abbildung 7.7: Ablaufdiagramm des Arbeitsprozesses des Schadensregisters

- Datum und Uhrzeit der Schadensmeldung (1.1)
- Name und Unterschrift des Koordinators (1.2)
- Name des Meldenden (1.3)
- Schadensort (1.4)

Zusätzlich zu diesen Angaben wird vermerkt, ob bei der Erfassung des Schadens eine Datenerhebung zur Aktualisierung des Netzkatasters (s. Kap. 7.2.3.8) durchgeführt werden soll (1.5). Soll eine Datenerhebung durchgeführt werden, wird die Nummer des entsprechenden Formulars angegeben (1.6). Wird ein Schaden vom Personal der Datenerfassung entdeckt, kann der Schaden umgehend erfasst werden (s. Kap. 7.3.3.4). Der erste Block des Erfassungsformulars wird dann nicht ausgefüllt.

### 7.3.3.3 Veranlassung einer Schadenserfassung

Die Koordination leitet mit den gemeldeten Angaben die Erfassung eines Schadens vor Ort ein. Dazu wird das Formular an die Datenerfassung übergeben. Der Auftrag wird durch folgende Angaben im zweiten Abschnitt des Formulars bestätigt (s. Abb. 7.8, 2. Erfassung):

- Datum und Uhrzeit der Auftragserteilung (2.1)
- Name und Unterschrift des Verantwortlichen der Datenerfassung (2.2)

Alternativ kann die Schadenserfassung von der Datenerfassung initiiert werden. Das Formular wird analog ausgefüllt. Der Datenerfassung wird zur Lokalisierung eines Schadens ggf. ein Leitungsplan des entsprechenden Netzbereichs mit verzeichneten Erhebungspunkten bzw. Knotenbezeichnungen ausgehändigt.

<b>Erfassungsformular für Schäden am Wasserverteilungsnetz</b>				Formular Nr.:
<b>1. Meldung [auszufüllen vom Koordinator]</b>				
1.1 Meldung am:	(Datum) _____	(Uhrzeit) _____		
1.2 Name Koordinator:	_____	Unterschrift: _____		
1.3 Namen Meldender:	_____	1.4 Schadensort: _____		
1.5 Datenerhebung durchführen:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	1.6 falls ja, Formular Nr.:	_____	
<b>2. Erfassung [auszufüllen vom Erfasser]</b>				
2.1 Auftrag erhalten am:	(Datum) _____	(Uhrzeit) _____		
2.2 Name Erfasser:	_____	Unterschrift: _____		
2.3 Datenerhebung durchgeführt:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	2.4 mit Formular Nr.	_____	
2.5 Ort (detaillierte Beschreibung):	_____			
2.6 Beschreibung Anlagenteil:	_____			
2.7 Allg. Beschreibung Schaden:	_____			
2.8 standardisierte Beschreibung Schaden:	_____			
Wasseraustritt	Schaden an reparierter Stelle	Schadenstelle	Schadensart	Schadensursache
<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> Rohr	<input type="checkbox"/> Bruch	<input type="checkbox"/> Korrosion
<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> Verbindung	<input type="checkbox"/> Riss	<input type="checkbox"/> Fremdeinwirkung
		<input type="checkbox"/> Schieber	<input type="checkbox"/> Loch	<input type="checkbox"/> Mangelhafte Reparatur
		<input type="checkbox"/> Hydrant	<input type="checkbox"/> Verbindung defekt	
		<input type="checkbox"/> Hausanschluss	<input type="checkbox"/> Reparatur defekt	
		<input type="checkbox"/> _____	<input type="checkbox"/> _____	<input type="checkbox"/> _____
<b>3. Reparatur [auszufüllen vom Reparierenden]</b>				
3.1 Erfasser gleich Reparierender	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein			
3.2 Auftrag erhalten am:	(Datum) _____	(Uhrzeit) _____		
3.3 Name Reparierender:	_____	Unterschrift: _____		
3.4 Durchgeführt am:	(Datum) _____	(Uhrzeit) _____		
3.5 Durchgeführte Reparaturarbeiten:	_____			
<b>4. Abgabe Erfassungsformular an Koordinator [auszufüllen vom Koordinator]</b>				
4.1 Abgegeben am:	(Datum) _____	(Uhrzeit) _____		
4.2 Unterschrift Koordinator:	_____	Unterschrift Erfasser: _____		
4.3 Erfasser gleich Reparierender	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein			
4.4 Abgegeben am:	(Datum) _____	(Uhrzeit) _____		
4.5 Unterschrift Koordinator:	_____	Unterschrift Reparierender: _____		

Abbildung 7.8: Erfassungsformular für Schäden am Leitungsnetz und deren Reparatur

#### 7.3.3.4 Schadenserfassung

Die Datenerfassung lokalisiert einen Schaden und erfasst seine Charakteristika im zweiten Abschnitt des Formulars (s. Abb. 7.8, 2. Erfassung). Sind zusätzlich zur Erfassung eines Schadens Daten des Netzbereichs zu erheben, werden die Durchführung (2.3) und die Formular-Nr. vermerkt (2.4). Der Schadensort ist detailliert zu beschreiben (2.5). Dabei sollte der Abstand zu einem im Leitungsplan aufgeführten Erhebungspunkt (Knoten) des Netzkatasters angegeben werden. Des Weiteren wird das schadhafte Anlagenteil (2.6), z.B. die Leitung, Flanschverbindung oder Schweißnaht, sowie der eigentliche Schaden (2.7) allgemein in den Worten des Erfassers beschrieben. Für die standardisierte Charakterisierung eines Schadens (2.8) sind folgende Kategorien mit anzukreuzenden Angaben vorgegeben:

- Wasseraustritt (ja, nein)
- Schaden an vormals reparierter Stelle (ja, nein)
- Schadenstelle (Rohr, Verbindung, Schieber, Hydrant, Hausanschluss, eigene Angabe)
- Schadensart (Bruch, Riss, Loch, defekte Verbindung, defekte Reparatur, eigene Angabe)
- Schadensursache (Korrosion, Fremdeinwirkung, mangelhafte Reparatur, eigene Angabe)

Die vorgegebenen Möglichkeiten der Kategorien sind auf das jeweilige Verteilungssystem abzustimmen. D.h. es sind z.B. nur Bauteile aufzuführen, die im System eingebaut sind. Zusätzlich zu den Kategorien nach DVGW (1998b) sind die für Entwicklungsländer wichtigen Angaben zu Wasseraustritt und vorheriger Reparatur an der Schadenstelle aufgenommen. Die Angabe zum Wasseraustritt schafft in Verbindung mit der ermittelten Reparaturzeit eine Datenbasis zur Analyse des Verbesserungspotentials der Wasserverlustreduktion und zur Argumentation mit Verantwortlichen.

Gleiches gilt für die Qualität der durchgeführten Reparaturen. Nicht selten führen mangelhaft durchgeführte Reparaturen zu erneuten Schadensfällen. Der daraus resultierende Mehraufwand und die damit verbundenen ökonomischen, versorgungstechnischen und ökologischen Schäden können analysiert und aufgezeigt werden.

Kann die Reparatur eines Schadens direkt durchgeführt werden, wird diese im dritten Abschnitt des Formulars dokumentiert (s. Kap. 7.3.3.5). Ist eine Reparatur nicht direkt möglich, wird das Formular der Koordination übergeben, die zunächst eine Speicherung der erfassten Daten und dann eine Reparatur, basierend auf den erfassten Angaben, veranlasst (s. Kap. 7.3.3.6).

#### 7.3.3.5 Dokumentation einer Reparatur

Die Reparatur eines Schadens wird im dritten Abschnitt des Formulars dokumentiert (s. Abb. 7.8, 3. Reparatur). Zunächst gibt der Reparierende im Formular an, ob er auch die Schadenserfassung durchgeführt hat (3.1). Wenn ja, entfallen die Angaben unter 3.2 und 3.3. Der Reparierende bestätigt den Auftrag durch folgende Angaben:

- Datum und Uhrzeit des Auftrags (3.2)
- Name und Unterschrift des Reparierenden (3.3)

Die durchgeführte Reparatur wird mit folgenden Angaben dokumentiert:

- Datum und Uhrzeit der Reparatur (3.4)
- Wörtliche Beschreibung der Reparatur (3.5)

Der Reparaturvorgang wird mit der Übergabe des Formulars an die Koordination abgeschlossen (s. Kap. 7.3.3.6).

#### **7.3.3.6 Abgabe eines Erfassungsformulars und Speicherung der Schadens- und Reparaturdaten**

Nach der Erfassung wird das Formular der Koordination zur Veranlassung der nächsten Schritte übergeben. Verantwortliche der Datenerfassung und der Koordination bestätigen die Abgabe durch folgende Angaben im vierten Abschnitt des Formulars (s. Abb. 7.8, 4. Abgabe Erfassungsformular):

- Datum und Uhrzeit der Abgabe (4.1)
- Unterschrift der Verantwortlichen der Koordination und Datenerfassung (4.2)

Nach der Reparatur eines Schadens wird das Formular ebenfalls der Koordination übergeben. Reparierender und Koordination bestätigen die Abgabe durch folgende Angaben im vierten Abschnitt des Formulars:

- Datum und Uhrzeit der Abgabe (4.4)
- Unterschrift der Verantwortlichen der Koordination und Datenerfassung (4.5)

Wird die Reparatur eines Schadens direkt im Anschluss an die Erfassung des Schadens durchgeführt, handelt es sich in der Regel beim Verantwortlichen der Datenerfassung und dem verantwortlichen Reparierenden um die selbe Person. Bei der Abgabe des Formulars wird dies im vierten Abschnitt des Formulars vermerkt (4.3). Die Angaben unter 4.1 und 4.2 entfallen.

Das Formular mit dokumentierten Schadensdaten bzw. Schadens- und Reparaturdaten wird von der Koordination an die Dokumentation zur Eingabe in das Netzkataster weitergereicht. Zur Eingabe der Daten stehen auf das Formular abgestimmte Dialoge des integrierten Instruments zur Verfügung. Nach der Datenspeicherung wird das Formular von der Koordination archiviert.

Schäden sind im Netzkataster den Leitungsabschnitten (Strängen) zugeordnet. Registrierte Schäden werden im Netzkataster als auf den Strängen angeordnete Punktsymbole visualisiert (s. Abb. 6.12). Über den Informationsdialog der Stränge wird der Schadensdialog des Stranges für die Eingabe eines neuen Schadens sowie die Änderung oder Analyse eines bereits registrierten Schadens aufgerufen (s.

Abb. 6.13). Der Schadensdialog stellt zunächst eine Liste der für diesen Strang registrierten Schäden sowie die Möglichkeit des Anlegens eines neuen Schadensdatensatzes dar. Für jeden gelisteten Schaden kann ein Informationsdialog mit Eingabefeldern für alle relevanten Daten, die im Erfassungsformular abgefragt werden, aufgerufen werden. Abgearbeitete, d.h. reparierte Schäden sind in der Liste mit einem Haken markiert. Im Datenfenster des Netzkatasters werden abgearbeitete Schäden als grüne, nicht reparierte Schäden als rote Symbole visualisiert. Sind alle Schäden eines Stranges abgearbeitet, ist die Schaltfläche für die Schadensdialoge im Informationsdialog des Stranges grün visualisiert (s. Abb. 6.12). Ist mindestens einer der Schäden noch nicht abgearbeitet, wird die Schaltfläche rot angezeigt. Abbildung 7.9 zeigt einen Strang mit zwei reparierten und einem noch nicht abgearbeiteten Schaden sowie die Schadensliste des Strangs und den Dialog des noch nicht abgearbeiteten Schadens.

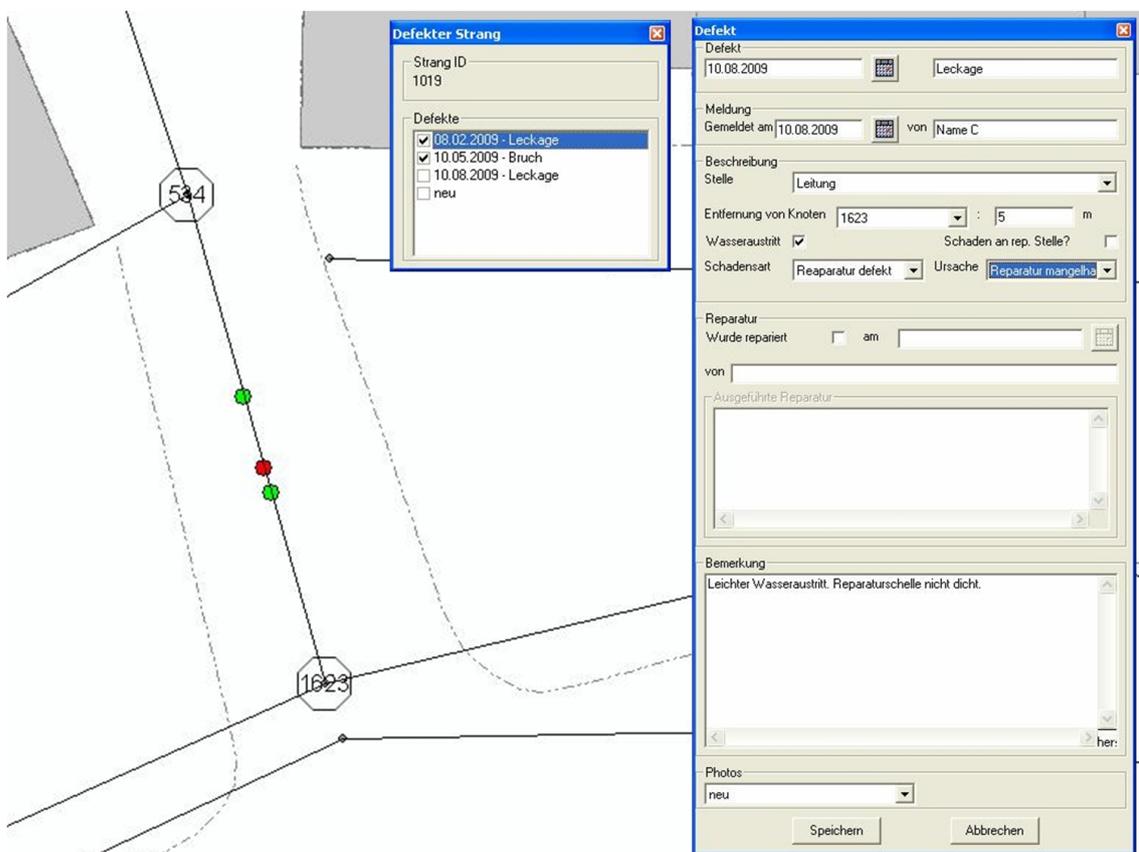


Abbildung 7.9: Strangbezogene Dialoge zur Eingabe und Analyse von Schäden

### 7.3.4 Schadenstatistik

Die Speicherung der im Netzkataster registrierten Schadensdaten in eigenen standardisierten Tabellen der Datenbank des integrierten Instruments (s. Kap. 6.5.2)

### 7.3 Aufbau und Aktualisierung eines Schadensregisters

ermöglicht eine individuelle statistische Auswertung der Schadensdaten. Durch den Objektbezug der Schadensdaten können räumliche Abhängigkeiten und Interaktionen, z.B. mit den in Kapitel 6.5 beschriebenen GIS-Funktionalitäten des integrierten Instruments, ermittelt werden. Neben der individuellen Analyse kann für alle im Netzkataster registrierten Schäden eine vordefinierte Statistik automatisch erstellt werden. Die Schadenstatistik kann über die Wasserverteilungssystem-Fachschaale aufgerufen werden (s. Abb. 6.12 und Tab. 6.3). Der Dialog gliedert sich in zwei Felder. Im ersten Feld werden die nicht reparierten Schäden gelistet. Durch einen Doppelklick auf einen Eintrag wird die entsprechende Leitung im Datenfenster des integrierten Instruments angezeigt. Im zweiten Feld können Schäden eines vorgegebenen Zeitraums ausgewertet werden. Für den benutzerdefinierten Zeitraum werden die Anzahl der Schäden im betrachteten Zeitraum, deren Reparaturquote und die Schadensrate angezeigt. Die Schadensrate gibt die Anzahl der Schäden pro Jahr und Leitungskilometer an (DVGW, 1998b) und stellt eine wichtige Eingangsgröße für die Planung der Netzrehabilitation dar (s. Kap. 2.5.3.4). Des Weiteren werden für den Betrachtungszeitraum die prozentuale Verteilung der Schadensursachen, Schadensarten und Schadensstellen für alle Schäden und nach Leitungsmaterial aufgeschlüsselt angegeben. Die Schadenstatistik kann außerdem als Textdatei (\*.txt) gespeichert werden. Abbildung 7.10 zeigt den Dialog der Schadenstatistik sowie die entsprechende Textdatei.

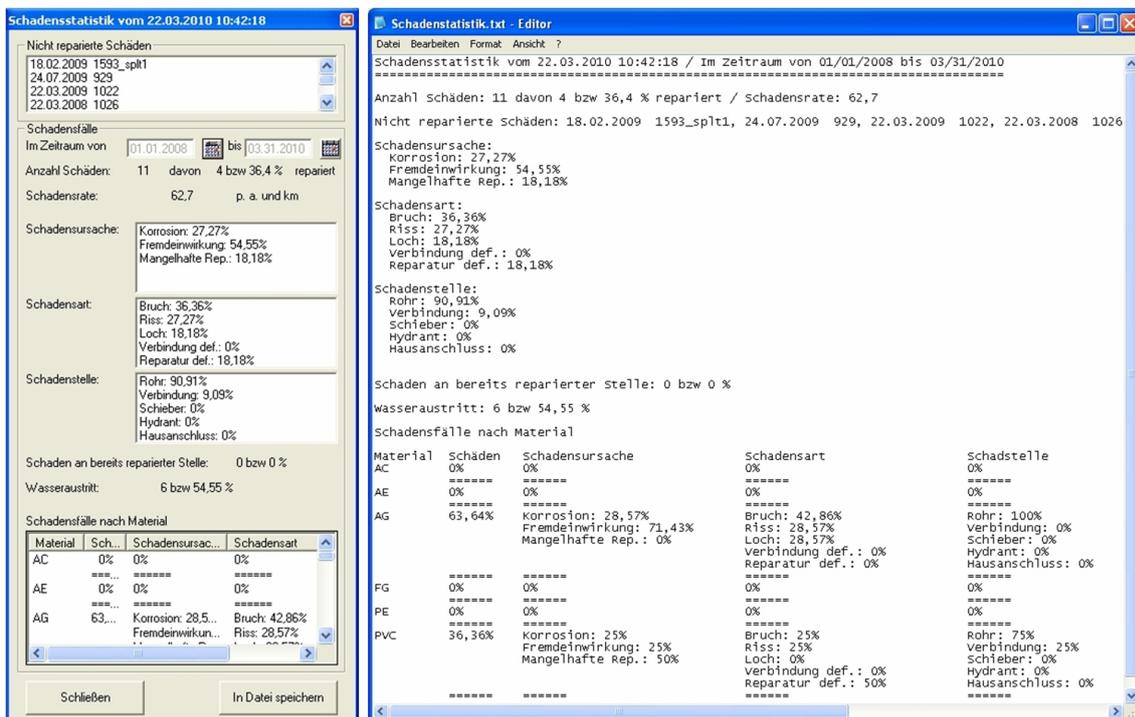


Abbildung 7.10: Dialog und Textdatei der Schadenstatistik

## 7.4 Umsetzung in Béni Abbès

### 7.4.1 Verantwortlichkeiten

In Béni Abbès sind für die Wasserversorgung im Wesentlichen die APC und die DHW verantwortlich (s. Kap. 4.2.5). Auf Grund der personell relativ kleinen Organisationsgröße und der sich daraus ergebenden Überschneidungen in den Aufgaben wurden in Béni Abbès die Zuständigkeiten für die Arbeitsprozesse zum Aufbau und zur Aktualisierung einer Systemdatenbasis sowie eines Schadensregisters zusammengeführt (s. Kap. 7.2 und 7.3). Abbildung 7.11 zeigt die Umsetzung der Verantwortlichkeiten und die Definition der Akteure in Béni Abbès.

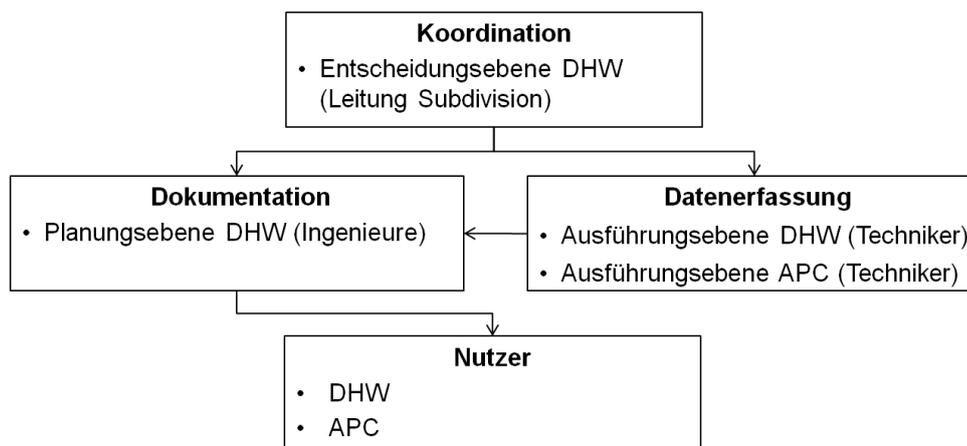


Abbildung 7.11: Akteure der Datenhaltung in Béni Abbès

In Anbetracht der originären Aufgaben der DHW, die vor allem im planerischen Bereich liegen, sowie ihrer einflussreichen Stellung in Béni Abbès wurde der Subdivision der DHW die Koordination sowie die Dokumentation übertragen. Die Koordination ist auf der Leitungsebene der DHW angesiedelt, während die Aufgaben der Dokumentation einem Ingenieur mit Stellvertreter überantwortet sind. Die Koordination übt hauptsächlich eine Leitungs- und Kontrollfunktion aus. In Bezug auf die Pflege des Schadensregisters werden die in Kapitel 7.3.2 genannten weiteren Aufgaben der Koordination (die Annahme von Schadensmeldungen und die Initiierung der Schadenserfassung und Schadensreparatur) hauptsächlich an die Dokumentation delegiert. Die Dokumentation verfügt über einen Computer mit installiertem integrierten Instrument (s. Kap. 6).

Da sowohl die APC, zu deren Aufgaben u.a. die Instandhaltung gehört, als auch die DHW an Arbeiten, die im weiteren Sinne zu Modifikationen am Netz führen, beteiligt sind, setzt sich die Datenerfassung aus technischem Personal beider Institutionen zusammen. Um dem Umstand Rechnung zu tragen, dass die Arbeiten am Netz nicht zentral koordiniert und transparent sind, wurde die Gruppe der Datenerfasser und damit die Ausbildung von Personal für die Datenerhebung und Dokumentation

möglichst weit gefasst. Da die Dokumentation bzw. Koordination in Form der DHW nicht direkt weisungsbefugt für das Personal der APC ist, werden von der Dokumentation veranlasste Datenerhebungen zunächst aus der Gruppe der Datenerfassung von Personal der DHW durchgeführt.

Die Gruppe der Nutzer umfasst zunächst die Institutionen, die an der Wasserversorgung beteiligt sind und direkt von einer verfügbaren Datenbasis profitieren. Neben den der Wasserversorgung zuzuordnenden Institutionen wurden weitere behördliche Stellen, hauptsächlich Abteilungen der APC, über die mögliche Nutzung der Katasterdaten informiert. Im Einzelfall entscheidet letztlich die Koordination über die Herausgabe und Nutzung von Daten.

### **7.4.2 Aufbau und Aktualisierung einer Datenbasis**

Die verfügbaren Daten zum Wasserverteilungsnetz in Béni Abbès beschränkten sich auf fehlerhafte und unpräzise Netzpläne (s. Kap. 4.3.4). Diese wurden genutzt um die Basis einer Datenhaltung und eines hydraulischen Modells mit dem in Kapitel 6 beschriebenen Instrument aufzubauen. Der Aufbau der Datenbasis ist in Kapitel 5.3 dargestellt. Die Überprüfung der Datenbasis in einem Netzbereich ergab, dass die ursprünglich verfügbare Datengrundlage zu ca. 86 % fehlerhaft ist (s. Kap. 4.3.4). Auf Grund der ungenügenden Qualität der Datenbasis, ist eine Überprüfung aller Systemdaten und damit quasi der Aufbau einer neuen Datenbasis notwendig. Die komplette Aktualisierung wird mit Hilfe des integrierten Instruments und dessen Visualisierungsmöglichkeiten konzipiert sowie der Fortschritt überprüft und ausgewertet.

Die identifizierten Fachkräfte der Koordination, Dokumentation und Datenerfassung waren im Rahmen des Kooperationsprojekts von Beginn an in die konsequente Überprüfung und Aktualisierung der Datenbasis eingebunden. Zunächst wurde der Prozess zum Aufbau einer Datenbasis unter Anleitung in Schulungen eingeführt (s. Kap. 7.2.3). Die Schulungen wurden im Rahmen des Kooperationsprojekts abgehalten (IWG, 2009). Der Prozess zur Aktualisierung der Datenbasis im Rahmen der täglichen Arbeit setzt eine selbstständige Arbeitsweise voraus (s. Kap. 7.2.4). Der Prozess wurde daher erst eingeführt, nachdem durch die Schulungen die notwendige Selbstständigkeit in der Durchführung der Datenerhebung und Dokumentation erreicht war. Die Aktivitäten werden seit Abschluss der Schulungen im Rahmen des Kooperationsprojekts beratend begleitet. Dabei konnte eine nahezu selbstständige Weiterführung der Arbeitsprozesse durch die Akteure festgestellt werden.

### **7.4.3 Aufbau und Aktualisierung eines Schadensregisters**

Wie in Kapitel 4.3.4 dargestellt, ist in Béni Abbès die Instandhaltung z.Z. wenig ausgeprägt. Es werden keine routinemäßigen Netzinspektionen durchgeführt, die vorausschauende Rehabilitation ist nicht bekannt, die Qualität durchgeführter Reparaturen ist mitunter ungenügend und der Problematik der Leitungsleckagen wird nur untergeordnete Bedeutung zuteil. Nichtsdestotrotz stellen die marode Infrastruktur

und die Wasserverluste eine nicht zu vernachlässigende Einschränkung der Wasserversorgung dar.

Im Vordergrund der Aufgaben des Schadensregisters in Béni Abbès steht daher zunächst die Schaffung eines Bewusstseins für die Bedeutung der Instandhaltung. Der Prozess zum Aufbau des Schadensregisters ist zunächst auf die Dokumentation von Schäden und deren Reparatur beschränkt (s. Kap. 7.3). Das integrierte Instrument und das Erfassungsformular sind dazu an die örtlichen Gegebenheiten angepasst. Z.B. sind die Auswahlmöglichkeiten im Netzkataster und im Erfassungsformular auf die vorhandenen Leitungsmaterialien usw. beschränkt. Das Erfassungsformular wird meist vom Personal der Datenerfasser mitgeführt und ausgefüllt bei der Dokumentation abgegeben. Die Meldung entfällt meist gänzlich. Dementsprechend ist das Formular vor Ort vereinfacht in Anwendung. Dokumentierte Schäden und ggf. die Reparatur werden im integrierten Instrument registriert. Durch die Visualisierung können nicht reparierte Schäden, Schäden an bereits reparierten Stellen sowie räumliche Häufungen direkt erfasst werden. Die Abarbeitung der Schäden und damit die Erfüllung der verschiedenen Verantwortlichkeiten wird klar und transparent dokumentiert.

# 8 Zusammenfassung und Ausblick

## 8.1 Zusammenfassung

Die intermittierende Betriebsweise zentraler Wasserverteilungssysteme ist in Entwicklungsländern weit verbreitete Praxis. Nahezu alle intermittierend betriebenen Systeme wurden ursprünglich für eine kontinuierliche Betriebsweise konzipiert und die Komponenten der Systeme entsprechend ausgelegt. Verschiedene, sich gegenseitig bedingende Faktoren führen dazu, dass eine kontinuierliche Versorgung nicht aufrecht erhalten werden kann und die Systeme letztendlich intermittierend betrieben werden. Diese unsachgemäße Betriebsweise ist jedoch mit vielfältigen negativen Auswirkungen verbunden, die in letzter Konsequenz eine ökonomisch, ökologisch und versorgungstechnisch nachhaltige Wasserverteilung verhindern. Die grundlegende Aufgabe einer Wasserversorgung, nämlich die Bereitstellung von ausreichend Wasser mit einwandfreier Qualität an alle angeschlossenen Verbraucher, kann nicht erfüllt werden.

Werden die Betrachtungen auf zentrale, ursprünglich für eine kontinuierliche Betriebsweise konzipierte Verteilungssysteme beschränkt, sind prinzipiell zwei Lösungsansätze denkbar. Entweder das Verteilungssystem wird auf die intermittierende Betriebsweise ausgelegt und geplant betrieben oder eine kontinuierliche Betriebsweise wird wieder eingeführt.

Die geplante intermittierende Betriebsweise stellt zunächst eine Verbesserung gegenüber der Ausgangssituation dar. Nichtsdestotrotz sind Einschränkungen, die einen nachhaltigen Betrieb und die Erfüllung der grundlegenden Aufgaben der Wasserversorgung gefährden, nicht zu vermeiden. Die intermittierende Betriebsweise kann daher lediglich im Rahmen einer Soforthilfemaßnahme oder Übergangslösung gesehen werden.

Gegenstand dieser Arbeit sind Konzepte und Werkzeuge zur Überführung bestehender, intermittierend betriebener Wasserverteilungssysteme hin zu einer kontinuierlichen Betriebsweise. Die Betrachtungen wurden dabei auf den technischen Bereich der Wasserverteilung beschränkt. Sofern relevant, wurden ökologische, ökonomische und soziale Aspekte als Randbedingungen mit einbezogen.

Zunächst wurden im ersten Teil der Arbeit die vielschichtig miteinander verknüpften Ursachen und Auswirkungen einer intermittierenden Betriebsweise analysiert und systematisiert. Die Analyse basiert zum einen auf den im Fallbeispiel Béni Abbès gewonnenen Erkenntnissen und zum anderen auf einer umfassenden Literaturrecherche. Hierbei konnten Mängel ausgemacht werden, die für Entwicklungsländer typisch und je nach Entwicklungsstand und Ausprägung der jeweiligen Wasserver-

teilung mehr oder weniger ursächlich für die unsachgemäße Betriebsweise sind. Eine zentrale Rolle bei der Realisierung einer nachhaltigen Wasserverteilung nehmen im technischen Bereich neben der Betriebsweise die Datenhaltung und das Systemkonzept bzw. die Netzstruktur ein. Mängel in der Datenhaltung erschweren eine sachgemäße Netzplanung und eine kontinuierliche Betriebsweise. Eine fehlende oder ungenügende Netzplanung führt zu komplexen, fehdimensionierten und intransparenten Systemen, die letztlich nicht mehr sachgemäß betrieben werden können.

Aufbauend auf der Problemanalyse wurde ein neuer konzeptioneller Ansatz zur Einführung einer kontinuierlichen Betriebsweise entwickelt, der die Belange der Planung und Implementierung ganzheitlich integriert. Die meist ungenügende Quantität und Qualität der verfügbaren Datenbasis, die beschränkte Möglichkeit für die Erhebung von Systemdaten und Planungsparametern sowie die institutionellen und ökonomischen Rahmenbedingungen verlangen einen Ansatz, der in Bezug auf das Systemkonzept, die Planung und die Umsetzung flexibel und anpassbar ist. Das im zweiten Teil der Arbeit dargestellte Konzept wird diesen Anforderungen gerecht, indem die Umsetzung der drei Säulen (1) Aufbau einer Datenhaltung, (2) Einführung eines angepassten Systemkonzepts und (3) Einführung einer kontinuierlichen Betriebsweise in einem Gesamtprozess aufeinander abgestimmt werden. Durch das Herunterbrechen des Prozesses auf Einzelschritte, wird die notwendige zeitliche Flexibilität erreicht.

Vor der Umsetzung des Konzepts steht die Analyse der Machbarkeit einer kontinuierlichen Betriebsweise und Versorgung. Das Informationsbild des Systems wird während des Prozesses bedarfsorientiert verifiziert und erweitert. Das angepasste Systemkonzept sieht eine Umstrukturierung des bestehenden, hydraulisch kommunizierenden Netzes in Zubringersystem, Druckzonen und diskrete Sektoren vor. Der Aufwand der Umstrukturierung kann durch die Verwendung bestehender Systemkomponenten minimiert werden. Neben der Transparenz, die eine einfache Systemkontrolle ermöglicht, zeichnet das Systemkonzept die Möglichkeit der sukzessiven Einführung einer kontinuierlichen Betriebsweise in den Sektoren aus. Durch die sukzessive Vorgehensweise können schwer abzuschätzende Planungsparameter und deren kleinräumliche Ausprägungen in bereits kontinuierlich betriebenen Sektoren ermittelt und in einer Anpassung der Planung und Umsetzung genutzt werden. Für das Fallbeispiel Béni Abbès wurde die Machbarkeit sowohl theoretisch als auch praktisch in Pilotversuchen nachgewiesen. Die Umstrukturierungsplanung wurde fertig gestellt und befindet sich derzeit in der Umsetzung.

Für den Aufbau einer zentralen Datenhaltung, für die Analyse bestehender Netze sowie zur Planung der Umstrukturierung wurde ein auf die Anforderungen in Entwicklungsländern angepasstes Werkzeug entwickelt, das Gegenstand des dritten Teils der vorliegenden Arbeit ist. Durch die Integration eines Geoinformationssystems, eines Netzkatasters und eines hydraulischen Modells werden Widersprüche und Redundanzen in der zentralen Datenbasis verhindert, der Datenhaushalt vereinfacht und die hydraulische Modellierung teilweise automatisiert. Dem Anwender stehen mit dem integrierten Instrument die notwendigen Funktionen zum Datenmanagement sowie zur Analyse und Planung zur Verfügung:

- Verarbeitung von Raumdaten
- Aufbau und Pflege eines Netzkatasters
- Aufbau und Pflege eines Schadensregisters
- Statistische Auswertung der Schadensdaten
- Automatisierte Modellierung
- Analyse der Netztopologie
- Stationäre und zeitabhängige Simulation
- Kostenoptimale Netzauslegung

Um die effektive und nachhaltige Nutzung des integrierten Instruments zu gewährleisten, wurden standardisierte, auf das Instrument abgestimmte Arbeitsprozesse zur Erhebung der notwendigen Daten zum Aufbau und zur Aktualisierung eines Netzkatasters und eines Schadensregisters entwickelt. Die Arbeitsprozesse können in die Organisationsstruktur eines Wasserversorgers integriert werden. Funktionalitäten des Instruments ermöglichen die Koordination und Überwachung der Datenerhebungen. Die Standardisierung der Prozesse gewährleistet wiederum, dass die Daten gemäß den Anforderungen des Instruments erhoben werden. Das integrierte Instrument und die Arbeitsprozesse wurden als zentrale Datenhaltung in der Wasserversorgung des Fallbeispiels Béni Abbès implementiert.

## 8.2 Ausblick

Für das Fallbeispiel Béni Abbès konnte die Machbarkeit der kontinuierlichen Betriebsweise und der Umsetzung des Konzepts in Pilotversuchen gezeigt und die Umstrukturierung geplant werden. Die Umsetzung der letzten Schritte des entwickelten Konzepts, die Umstrukturierung und die Umstellung der Betriebsweise, steht im Fallbeispiel jedoch noch aus. Der Beginn der Umstrukturierungsmaßnahmen ist noch für das Jahr 2010 geplant. Nach der Umstrukturierung kann mit der sukzessiven Einführung der kontinuierlichen Betriebsweise in den Sektoren begonnen werden. Ein Prozess, der sich über weitere Jahre erstrecken wird.

Im Rahmen des deutsch-algerischen Kooperationsprojekts führt das IWG<sup>1</sup> weitere, die Einführung der kontinuierlichen Betriebsweise begleitende Forschungsaktivitäten in Béni Abbès durch. Es ist geplant, in einem ausgedehnten Messprogramm im Ist-Zustand (intermittierender Betrieb des bestehenden Systems) sowie im Soll-Zustand (kontinuierlicher Betrieb des umstrukturierten Systems) die Wasserqualitätsentwicklung im Verteilungsnetz, die Wassermengenverteilung und die Wasserverluste, den Wasserverbrauch und das Verbrauchsverhalten sowie die Systemdrücke zu erheben. Die Analyse dieser Messwerte ermöglicht eine Bewertung der Maßnahmen sowie die Ermittlung von Planungsparametern für vergleichbare Systeme. Die im Kooperationsprojekt vorgesehene Übertragung des Ansatzes auf zwei weitere Oasenstädte des Saouratals bietet die Möglichkeit der weiteren Evaluation des Konzepts sowie der Verifizierung der Planungsparameter.

<sup>1</sup>Das IWG ist im Projekt im Auftrag der GTZ, finanziert durch das BMZ, tätig.

Um eine kontinuierliche Versorgung zu ermöglichen, kann neben der Steigerung der Wasserproduktion der Versorger aktiv auf den Wasserverbrauch und die Wasserverluste Einfluss nehmen. Der Wasserverbrauch kann mit Methoden des Verbrauchsmangements kontrolliert werden. Die Effizienz der Methoden wird stark von sozio-ökonomischen und damit regionalspezifischen Faktoren beeinflusst. Im Fallbeispiel ist mit Ausnahme von Sensibilisierungsmaßnahmen keine aktive Einflussnahme auf das Verbrauchsverhalten notwendig. Für eine Übertragung des Konzepts auf weitere Städte der Region kann dies aber durchaus der Fall sein. Die Entwicklung entsprechender regionalspezifisch angepasster Methoden des Verbrauchsmangements stehen aber noch aus. Die Wasserverlustreduktion wird erst seit ca. 20 Jahren verstärkt thematisiert und stellt daher nach wie vor ein breites Forschungsfeld dar. Im Kontext der vorliegenden Arbeit ist z.B. die Entwicklung von Verfahren zur Mengenmessung und Leckageortung bei intermittierendem Betrieb von großem Interesse.

In Bezug auf das entwickelte Werkzeug zur Datenhaltung, Analyse und Planung besteht weiterer Forschungsbedarf insbesondere bei der numerischen Simulation einer intermittierenden Betriebsweise. Die bekannten Ansätze sind nur unter idealisierten Bedingungen gültig. Außerdem können die für aussagekräftige Ergebnisse notwendigen Modellparameter in der praktischen Anwendung nicht oder nur sehr aufwändig ermittelt werden. Des Weiteren würde die Weiterentwicklung und Ergänzung der Funktionalitäten des integrierten Instruments eine Steigerung dessen Qualität in der Anwendung bedeuten. Z.B. würde eine Weiterentwicklung oder Anpassung der bekannten mathematischen Ansätze zur Planung von Druckzonen und Sektoren an die Anforderungen im gegebenen Kontext sowie deren Integration in das entwickelte Werkzeug eine nützliche Ergänzung darstellen. Außerdem ist eine Koppelung des bestehenden Schadensregisters mit Modellen der Rehabilitationsplanung denkbar. Eine Koppelung würde eine Optimierung der notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen nach Einführung einer kontinuierlichen Versorgung sowie im späteren Routinebetrieb ermöglichen.

# Literaturverzeichnis

- [Agrawal u. a. 2007] AGRAWAL, Magan L. ; GUPTA, Rajesh ; BHAVE, Pramod R.: Reliability-Based Strengthening and Expansion of Water Distribution Networks. In: *Journal of Water Resources Planning and Management* 133 (2007), November/Dezember, Nr. 6, S. 531–541
- [Ahrens 2004] AHRENS, J.: Softwaregestützte Bewertung von Rohrnetzen. In: *wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik* 3 (2004), S. 10–21
- [Ahrens 2007] AHRENS, Jürgen: Optimale Rehabilitationsstrategie - Zustandsbewertung von Druckrohrnetzen. In: *wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik* 1–2 (2007), S. 24–28
- [AHT 2005] AHT: Gestion intégrée des eaux oasis Béni Abbès - Résultats des enquêtes auprès des ménages et des organismes / AHT Group AG im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. September 2005. – Bericht. unveröffentlicht
- [AHT 2008] AHT: Conception fondamentale pour garantir un AEP continu et durable (H24) à Béni Abbès / AHT Group AG im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. März 2008. – Bericht. unveröffentlicht
- [AHT 2009a] AHT: Coût de revient de l'AEP et tarification de l'eau / AHT Group AG im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. Juni 2009. – Bericht. unveröffentlicht
- [AHT 2009b] AHT: Introduction du modèle GIRE développé à Béni Abbès dans deux autres oasis de la vallée de l'Oued Saoura / AHT Group AG im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. März 2009. – Bericht. unveröffentlicht
- [AHT und OtterWasser 2005] AHT UND OTTERWASSER: Gestion intégrée des eaux oasis Béni Abbès - Aspects de la situation du système d'AEP et des mesures de renforcement / AHT Group AG und OtterWasser GmbH im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. Juli 2005. – Bericht. unveröffentlicht
- [Andey und Kelkar 2007] ANDEY, Subhash P. ; KELKAR, Prakash S.: Performance of water distribution systems during intermittent versus continuous water supply.

- In: *Journal of the American Water Works Association* 99 (2007), August, Nr. 8, S. 99–107
- [Ang und Jowitt 2006] ANG, Wah K. ; JOWITT, Paul W.: Solution for Water distribution Systems under Pressure-Deficient Conditions. In: *Journal of Water Resources Planning and Management* 132 (2006), Mai/Juni, Nr. 3, S. 175–182
- [Aronov 1987] ARONOV, Boris: On the geodesic Voronoi diagram of point sites in a simple polygon. In: *SCG '87: Proceedings of the third annual symposium on computational geometry*. New York : Association for Computing Machinery, 1987, S. 39–49. – ISBN 0-89791-231-4
- [AWWA 2005] AWWA: *Computer Modeling of Water Distribution Systems*. 2. American Water Works Association, 2005. – URL [http://books.google.com/books?id=zheu\\_ez3WmgC&hl=de](http://books.google.com/books?id=zheu_ez3WmgC&hl=de)
- [Batish 2003] BATISH, Rajiv: A New Approach to the Design of Intermittent Water Supply Networks. In: BIZIER, Paul (Hrsg.) ; DEBARRY, Paul (Hrsg.): *Proceedings of World Water and Environmental Resources Congress 2003* Bd. 118, American Society of Civil Engineering, 2003, S. 123–123. – URL <http://link.aip.org/link/?ASC/118/123/1>
- [Beilke und Wiegleb 2002] BEILKE, G. ; WIEGLEB, K.: Modellierung von Veränderungen der bakteriologischen Wasserbeschaffenheit in Trinkwasserleitungsnetzen. In: *Dresdner Berichte*, TU Dresden, 2002, S. 179–204
- [Berghout und Kuczera 1997] BERGHOUT, Brendan L. ; KUCZERA, George: Network Linear Programming as Pipe Network Hydraulic Analysis Tool. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 123 (1997), Nr. 6, S. 549–559. – URL <http://link.aip.org/link/?QHY/123/549/1>
- [Berner und Riegler 2003] BERNER, Markus ; RIEGLER, Günther: Integrierte Systemberechnung von Wasserversorgungsnetzen auf der Basis von Netzinformationssystemen (NIS). In: *energie | wasser-praxis* 6 (2003), S. 12–16
- [BFAI 2007] BFAI: Branchenstudie - Wassermanagement und Wassertechnik im Nahen und Mittleren Osten und in Nordafrika / Bundesagentur für Außenwirtschaft. Köln, Januar 2007. – Bericht
- [Bhave 1991] BHAVE, Pramod R.: *Analysis of Flow in Water Distribution Networks*. Lancaster, Pennsylvania : Technomic Publishing Company Inc., 1991
- [Birkhoff 1963] BIRKHOFF, Garrett: A variational principle for nonlinear networks. In: *Quarterly of Applied Mathematics* 21 (1963), Nr. 2, S. 160–162
- [Bohl 2004] BOHL, Willi: *Strömungsmaschinen 1*. 9. Würzburg : Vogel Buchverlag, 2004 (Kamprath-Reihe)

- [Bouteflika 2005] BOUTEFLIKA, Abdelaziz: Loi n°05-12 du 28 Jomada Ethania 1426 correspondant au 4 août 2005 relative à l'eau. In: *Journal officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire conventions et accords internationaux - lois et décrets arrêtés, décisions, avis, communications et annonces* 44 (2005), September, Nr. 60, S. 3–18. – URL [http://www.joradp.dz/J02000/2005/060/F\\_Pag.htm](http://www.joradp.dz/J02000/2005/060/F_Pag.htm)
- [Bradley 2004] BRADLEY, Robert M.: Forecasting Domestic Water Use in Rapidly Urbanizing Areas in Asia. In: *Journal of Environmental Engineering* 130 (2004), April, Nr. 4, S. 465–471
- [Bradley u. a. 2002] BRADLEY, Robert M. ; WEERATANE, Stanley ; MEDIWAKE, Tilak M. M.: Water use projections in developing countries. In: *Journal of the American Water Works Association* 94 (2002), August, Nr. 4, S. 52–63
- [Butler und Memon 2006] BUTLER, David (Hrsg.) ; MEMON, Fayyaz A. (Hrsg.): *Water Demand Management*. London : IWA Publishing, 2006
- [Cabrera-Bejar und Tzatchkov 2009] CABRERA-BEJAR, J. A. ; TZATCHKOV, V. G.: Inexpensive Modeling of Intermittent Service Water Distribution Networks. In: STARRETT, Steve (Hrsg.): *Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2009, 11th Water Distribution Systems Analysis Symposium (WDSA09)* Bd. 342. Kansas City, USA : American Society of Civil Engineering, Mai 2009, S. 295–305. – URL <http://link.aip.org/link/?ASC/342/29/1>
- [Cembrowicz 1988] CEMBROWICZ, Ralf G.: *Siedlungswasserwirtschaftliche Planungsmodelle: Methoden und Beispiele*. 1. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 1988
- [Cembrowicz u. a. 1996] CEMBROWICZ, Ralf G. ; ATEs, S. ; NGUYEN, K. M.: *Hydraulic Engineering Software VI*. Kap. Mathematical optimization of the main water distribution system city of Hanoi, Vietnam. Southampton : Computational Mechanics Publications, 1996
- [Cembrowicz u. a. 2004] CEMBROWICZ, Ralf G. ; DEUERLEIN, Jochen ; SANZENBACHER, Gerhard ; GOMER, Dieter ; BRADE, Rudolf: Mängelanalyse und Rehabilitation des Wasserversorgungsnetzes einer algerischen Stadt, Beispiel Tlemcen. In: *GWF-Wasser/Abwasser* 145 (2004), Nr. 11, S. 788–797
- [Chea 2007] CHEA, Visoth: *Going public - Southern solutions to the global water crisis*. Kap. From bad service to outstanding water utility: Phnom Penh's experience, S. 52–62. London : World Development Movement, März 2007
- [Chowdhury u. a. 2002] CHOWDHURY, M. A. I. ; AHMED, M. F. ; GAFFAR, M. A.: Management of nonrevenue water in four cities of Bangladesh. In: *Journal of the American Water Works Association* 94 (2002), August, Nr. 8, S. 64–75

- [Clark u. a. 2002] CLARK, Robert M. ; SIVAGANESAN, Mano ; SELVAKUMAR, Ari ; SETHI, Virendra: Cost Model for Water Supply Distribution Systems. In: *Journal of Water Resources Planning and Management* 128 (2002), September/Oktober, Nr. 5, S. 312–321
- [Collins u. a. 1978] COLLINS, M. ; COOPER, L. ; HELGASON, R. ; KENNINGTON, J. ; LEBLANC, L.: Solving the Pipe Network Analysis Problem Using Optimization Techniques. In: *Management Science* 24 (1978), Nr. 7, S. 747–760
- [Cornell und Dunphy 2005] CORNELL, R. ; DUNPHY, J.: Water Distribution System Asset Management - Needs and Nice to Have. In: *Journal of the American Water Works Association* (2005)
- [Cross 1936] CROSS, Hardy: *Analysis of flow in networks of conduits or conductors*. Urbana, Illinois : University of Illinois, November 1936 (Bulletin 286)
- [Dahasahasra und Mulay 2008] DAHASAHASRA, Sanjay ; MULAY, Madhuri: Solution for 24x7: Case Study of Badlapur City, Maharashtra. In: *e-gov* (2008), August. – URL <http://egovonline.net/articles-list/47-features/4191-solution-for-24x7.html>
- [DeMers 2005] DEMERS, Michael N.: *Fundamentals of Geographic Information Systems*. 3. Hoboken : John Wiley & Sons, Inc., 2005
- [Deuerlein 2002] DEUERLEIN, Jochen: *Zur hydraulischen Systemanalyse von Wasserversorgungsnetzen*. Karlsruhe, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe (TH), Dissertation, Juli 2002. – URL <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/2002/bau-verm/16>
- [Deuerlein u. a. 2003] DEUERLEIN, Jochen ; CEMBROWICZ, Ralf G. ; DEMPE, Stephan: Simulation der Hydraulik von Wasserversorgungssystemen mit Kontrollarmaturen. In: *GWF Wasser/Abwasser* 144 (2003), Nr. 7/8, S. 509–515
- [Deuerlein u. a. 2005] DEUERLEIN, Jochen ; CEMBROWICZ, Ralf G. ; DEMPE, Stephan: Hydraulic simulation of water supply networks under control. In: WALTON, Raymond (Hrsg.): *Proceedings of the World Water and Environmental Resources Congress EWRI05, 7th Annual Symposium on Water Distribution Systems Analysis* Bd. 173. Anchorage : American Society of Civil Engineering, 2005. – URL <http://link.aip.org/link/?ASC/173/24/1>
- [Deuerlein und Klingel 2007] DEUERLEIN, Jochen ; KLINGEL, Philipp: Application of hydraulic models for rehabilitation of drinking water distribution systems. In: *High Quality Drinking Water 2007 Workshop*. Delft, 2007
- [Deuerlein u. a. 2008] DEUERLEIN, Jochen ; SIMPSON, Angus R. ; GROSS, Egbert: The Never ending Story of Modeling Control-Devices in Hydraulic Systems Analysis. In: ZYL, J. E. van (Hrsg.) ; ILEMOBADE, A. A. (Hrsg.) ; JACOBS, H. E. (Hrsg.): *Proceedings of the 10th Annual Water Distribution System*

- Analysis Conference WDSA2008* Bd. 340. Kruger National Park, South Africa : American Society of Civil Engineering, August 2008, S. 832–843. – URL <http://link.aip.org/link/?ASC/340/72/1>
- [Deuerlein 2008] DEUERLEIN, Jochen W.: Decomposition Model of a General Water Supply Network Graph. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 134 (2008), Juni, Nr. 6, S. 822–832. – URL <http://link.aip.org/link/?QHY/134/822/1>
- [Deuerlein u. a. 2009] DEUERLEIN, Jochen W. ; SIMPSON, Angus R. ; DEMPE, Stephan: Modeling the Behavior of Flow Regulating Devices in Water Distribution Systems Using Constrained Nonlinear Programming. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 135 (2009), Nr. 11, S. 970–982. – URL <http://link.aip.org/link/?QHY/135/970/1>
- [Dilly und Welsch 2003] DILLY, Peter ; WELSCH, Michael: *Trinkwasserverordnung - Leitfaden zur Trinkwasserversorgung 2001 Verordnung über Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch*. 3. Stuttgart : Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH, 2003
- [DIN 1975] DIN: *DIN 2425, Planwerke für die Versorgungswirtschaft, die Wasserwirtschaft und für Fernleitungen - Rohrnetzpläne der öffentlichen Gas- und Wasserversorgung*. Deutsches Institut für Normung e.V., August 1975
- [DIN 1983] DIN: *DIN 4046, Wasserversorgung - Begriffe*. Deutsches Institut für Normung e.V., September 1983
- [DIN 1995a] DIN: *DIN EN 736-1, Armaturen - Terminologie Teil 1: Definition der Grundbauarten*. Deutsches Institut für Normung e.V., April 1995
- [DIN 1995b] DIN: *DIN EN ISO 6708, Rohrleitungsteile - Definitionen und Auswahl von DN (Nennweite)*. Deutsches Institut für Normung e.V., September 1995
- [DIN 1997] DIN: *DIN EN 12845, Ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen - Automatische Sprinkleranlagen - Planung und Installation*. Deutsches Institut für Normung e.V., Juli 1997
- [DIN 2000] DIN: *DIN EN 805, Wasserversorgung - Anforderungen an Wasserversorgungssysteme und deren Bauteile außerhalb von Gebäuden*. Deutsches Institut für Normung e.V., März 2000
- [DIN 2003] DIN: *DIN 31051, Grundlagen der Instandhaltung*. Deutsches Institut für Normung e.V., Juni 2003
- [DVGW 1981] DVGW: *Merkblatt W 610, Förderanlagen - Bau und Betrieb*. Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., Mai 1981

- [DVGW 1996] DVGW: Basismodell und Anforderungskatalog eines Netzinformationssystems für Gas- und Wasserversorgungsunternehmen - GAWANIS / Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. 1996. – Bericht
- [DVGW 1997] DVGW: *Hinweis W 401, Entscheidungshilfen für die Rehabilitation von Wasserrohrnetzen*. Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., September 1997
- [DVGW 1998a] DVGW: *Hinweis GW 120, Planwerke für die Rohrnetze der öffentlichen Gas- und Wasserversorgung*. Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., Juli 1998
- [DVGW 1998b] DVGW: *Merkblatt W 395, Schadenstatistik für Wasserrohrnetze*. Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., Juli 1998
- [DVGW 2003] DVGW: *Arbeitsblatt W 392, Rohrnetzinspektion und Wasserverluste - Maßnahmen, Verfahren und Bewertungen*. Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., Mai 2003
- [DVGW 2004] DVGW: *Arbeitsblatt W 400-1, Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV); Teil 1: Planung*. Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., Oktober 2004
- [DVGW 2005a] DVGW: *Arbeitsblatt W 300, Wasserspeicherung - Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung von Wasserbehältern in der Trinkwasserversorgung*. Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., Juni 2005
- [DVGW 2005b] DVGW: *Hinweis GW 133, DV-gestütztes Störfallmanagement und Schadenstatistik unter Einbindung von GIS*. Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., Dezember 2005
- [DVGW 2006a] DVGW: *Arbeitsblatt GW 303-1, Berechnung von Gas- und Wasserrohrnetzen - Teil 1: Hydraulische Grundlagen, Netzmodellierung und Berechnung*. Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., Oktober 2006
- [DVGW 2006b] DVGW: *Arbeitsblatt W 400-3, Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV); Teil 3: Betrieb- und Instandhaltung*. Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., September 2006
- [DVGW 2006c] DVGW: *Arbeitsblatt W 617, Druckerhöhungsanlagen in der Trinkwasserversorgung*. Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., November 2006
- [DVGW 2007] DVGW: *Entwurf Arbeitsblatt W 410, Wasserbedarf - Kennwerte und Einflussgrößen*. Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., September 2007

- [Ehrensberger 2003] EHRENSBERGER, J.: Ertüchtigung und Sanierung der Wasserversorgungsanlage einer ostdeutschen Großstadt im Hinblick auf sich verändernde Bedarfsentwicklungen. In: WILDERER, Peter A. (Hrsg.) ; MERKL, Gerhard (Hrsg.): *Sanierung, Rückbau, Relining von Anlagen der Wasserversorgung, 27. Wassertechnisches Seminar*. München : Technische Universität München, 2003 (Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft 177), S. 48–66
- [Farley und Liemberger 2005] FARLEY, M. ; LIEMBERGER, R.: Developing a non-revenue water reduction strategy: planning and implementing the strategy. In: *Water Science and Technology: Water Supply* 5 (2005), Nr. 1, S. 41–50
- [Farley 2001] FARLEY, Malcolm: *Leakage Management and Control*. Geneva, Switzerland : World Health Organization, 2001. – 169 S. – URL [http://whqlibdoc.who.int/hq/2001/WHO\\_SDE\\_WSH\\_01.1\\_eng.pdf](http://whqlibdoc.who.int/hq/2001/WHO_SDE_WSH_01.1_eng.pdf)
- [Fortune 1986] FORTUNE, Steven: A Sweepline Algorithm for Voronoi Diagrams. In: *SCG '86: Proceedings of the second annual symposium on Computational geometry*. New York : Association for Computing Machinery, 1986, S. 313–322. – ISBN 0-89791-194-6
- [Fuchs 2007] FUCHS, Hugo: Anforderungen an die geografische Datenverwaltung für einen Leitungskataster (Praxisbericht). In: HABERL, Raimund (Hrsg.) ; ERTL, Thomas (Hrsg.): *Leitungskataster für Trink- und Abwassernetze*. Wien : Universität für Bodenkultur, 2007 (Wiener Mitteilungen Wasser - Abwasser - Gewässer 204)
- [Gadgil 1998] GADGIL, Ashok: Drinking Water in Developing Countries. In: *Annual Review of Energy and the Environment* 23 (1998), S. 253–286
- [Gangl 2008] GANGL, Gerald: *Rehabilitationsplanung von Trinkwassernetzen*. Graz, Technische Universität Graz, Dissertation, Mai 2008. – URL [http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/Files/i2150/download/Dissertationen/Band-053\\_DISS-Gangl.pdf](http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/Files/i2150/download/Dissertationen/Band-053_DISS-Gangl.pdf)
- [Gato u. a. 2007] GATO, Shirley ; JAYASURIYA, Niranjali ; ROBERTS, Peter: Forecasting Residential Water Demand: Case Study. In: *Journal of Water Resources Planning and Management* 133 (2007), Juli/August, Nr. 4, S. 309–319
- [Geoinformatik GmbH 2005] GEOINFORMATIK GMBH (Hrsg.): *ArcGIS 9 - das Buch für Einsteiger*. Heidelberg : Herbert Wichmann Verlag, 2005
- [Ghiassi u. a. 2008] GHIASSI, M. ; ZIMBRA, David K. ; SAIDANE, H.: Urban Water Demand Forecasting with a Dynamic Artificial Neural Network Model. In: *Journal of Water Resources Planning and Management* 134 (2008), März/April, Nr. 2, S. 138–146

- [Gramer 2009] GRAMER, Thomas: *Druckzonenermittlung in Wasserversorgungssystemen mittels graphentheoretischer Ansätze*. Karlsruhe, Universität Karlsruhe (TH), Studienarbeit, März 2009
- [Greyvenstein und van Zyl 2007] GREYVENSTEIN, B. ; ZYL, Jakobus E. van: An experimental investigation into the pressure-leakage relationship of some failed water pipes. In: *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA* 56 (2007), Nr. 2, S. 117–124
- [Guth 2009] GUTH, Nicolai: *Ermittlung der Einzugsflächen von Knoten mittels Voronoi-Diagrammen unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen*, Hochschule Karlsruhe, Bachelor Thesis, Oktober 2009
- [Haberl und Ertl 2007] HABERL, Raimund (Hrsg.) ; ERTL, Thomas (Hrsg.): *Leitungskataster für Trink- und Abwassernetze*. Wien : Universität für Bodenkultur, 2007. (Wiener Mitteilungen Wasser - Abwasser - Gewässer 204)
- [Hammerer 2000] HAMMERER, M.: Aufbau, Führung und Einsatz von GIS-bezogenen Wartungs- und Instandhaltungsdateien als Grundlage zur Instandhaltung von Rohrnetzen. In: WILDERER, Peter A. (Hrsg.) ; MERKL, Gerhard (Hrsg.): *Betriebsführung unter Einsatz von GIS-Geographischen Informationssystemen, 24. Wassertechnisches Seminar*. München : Technische Universität München, 2000 (Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft 156), S. 149–164
- [Hartung 2007] HARTUNG, Bernd: Operative Netzkosten optimieren. In: *energie / wasser-praxis* 2 (2007), S. 38–41
- [Höck und Manegold 2006] HÖCK, Michael ; MANEGOLD, Jochen: *ArcMap Programmierung mit VBA*. 4. Eigenverlag, 2006
- [Hoch 1987] HOCH, Winfried: *Zuflußmessungen und Zuflußauswertungen nach dem Streubreitenverfahren zur Früherkennung von Leckstellen in Wasserrohrnetzen*. München : Oldenbourg Verlag, 1987
- [Hoch und Fischer 2004] HOCH, Winfried ; FISCHER, Josef: Rehabilitationsstrategien für Wasserverteilungsanlagen. In: *GWF Wasser/Abwasser* 145 (2004), Nr. 13, S. 31–36
- [Hoch und Fischer 2007] HOCH, Winfried ; FISCHER, Josef: Zustandserhaltung und Erneuerungsstrategien für Wasserrohrnetze unter Berücksichtigung moderner Bautechniken. In: *GWF Wasser/Abwasser* 148 (2007), Nr. 1, S. 32–40
- [Hopkins u. a. 2004] HOPKINS, Omar S. ; LAURIA, Donald T. ; KOLB, Anthony: Demand-Based Planning of Rural Water Systems in Developing Countries. In: *Journal of Water Resources Planning and Management* 130 (2004), Januar, Nr. 1, S. 44–52

- [Howard und Bartram 2005] HOWARD, Guy ; BARTRAM, Jamie: Effective water supply surveillance in urban areas of developing countries. In: *Journal of Water and Health* 3 (2005), Nr. 1, S. 31–43
- [Ingeduld u. a. 2006] INGEDULD, Petr ; PRADHAN, Ajay ; SVITAK, Zdenek ; TERRAI, Ashok: Modelling Intermittent Water Supply Systems with EPANET. In: BUCHBERGER, Steven G. (Hrsg.): *Proceedings of the 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium* Bd. 247. Cincinnati, USA : American Society of Civil Engineering, 2006, S. 37–37. – URL <http://link.aip.org/link/?ASC/247/37/1>
- [IWA 2000] IWA: Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures / International Water Association. URL [http://www.iwahq.org/uploads/iwa%20hq/website%20files/media%20and%20communication/reference\\_papers/blue\\_pages\\_water\\_losses\\_2000.pdf](http://www.iwahq.org/uploads/iwa%20hq/website%20files/media%20and%20communication/reference_papers/blue_pages_water_losses_2000.pdf), Oktober 2000. – Bericht
- [IWG 2009] IWG: Programme "Gestion Intégrée de l'Eau" Composante 3 "Gestion Intégrée de l'Eau en Oasis" Phase II - Projektabschlussbericht / Institut für Wasser und Gewässerentwicklung der Universität Karlsruhe (TH) im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. Dezember 2009. – Bericht. unveröffentlicht
- [Jensen u. a. 2001] JENSEN, Peter K. ; ENSINK, Jeroen H. ; JAYASINGHE, Gayathri ; HOEK, Wim van der ; CAIRNCROSS, Sandy ; DALSGAARD, Anders: Domestic transmission routes of pathogens: the problem of in-house contamination of drinking water during storage in developing countries. In: *Tropical Medicine and International Health* 7 (2001), Juli, Nr. 7, S. 604–609. – URL <http://www.blackwell-synergy.com/doi/pdf/10.1046/j.1365-3156.2002.00901.x?cookieSet=1>
- [Jirka 2007] JIRKA, Gerhard H.: *Einführung in die Hydromechanik*. 3. Universitätsverlag Karlsruhe, 2007. – URL <http://www.uvka.de/univerlag/volltexte/2007/269/>
- [Jun und Loganathan 2007] JUN, Hwandon ; LOGANATHAN, G. V.: Valve-Controlled Segments in Water Distribution Systems. In: *Journal of Water Resources Planning and Management* 133 (2007), März/April, Nr. 2, S. 145–155
- [Kalhöfer 2006] KALHÖFER, Martin: Der Markt für Produkte der Wassertechnik im Nahen und Mittleren Osten. In: *energie / wasser-praxis* 12 (2006), S. 36–41
- [Karger u. a. 2005] KARGER, Rosemarie ; CORD-LANDWEHR, Klaus ; HOFFMANN, Frank: *Wasserversorgung*. 12. Teubner Verlag, 2005
- [Keller 2006] KELLER, Urs: *Intermittent flow in hydraulic conduits*. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Dissertation, 2006

- [Kim und Mays 1994] KIM, Joong H. ; MAYS, Larry W.: Optimal Rehabilitation Model for Water-Distribution Systems. In: *Journal of Water Resources Planning and Management* 120 (1994), September/Oktober, Nr. 5, S. 674–692
- [Kölbl 2008] KÖLBL, Jörg: Internationale Entwicklungen im Wasserverlustmanagement. In: *ÖVGW - Symposium Wasserversorgung*. Wien, August 2008
- [Klingel 2006] KLINGEL, Philipp: Hydraulische Analyse und Rehabilitationsplanung eines Wasserversorgungssystems - IWRM Oase Béni Abbès, Algerien. In: *8. JuWi-Treffen, Beiträge zum Treffen junger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an Wasserbauinstituten*. Karlsruhe : Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Universität Karlsruhe (TH), August 2006, S. 67–72
- [Klingel 2007] KLINGEL, Philipp: GIS-integriertes Netzkataster als Datenbasis zur hydraulischen Modellbildung. In: SAUERWEIN, Bernd (Hrsg.) ; WAGNER, Barbara (Hrsg.): *9. JuWi-Treffen, Beiträge zum Treffen junger wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler deutschsprachiger Wasserbauinstitute*. Kassel : Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft, Universität Kassel, August 2007
- [Klingel und Deuerlein 2007] KLINGEL, Philipp ; DEUERLEIN, Jochen: Rehabilitation concept for intermittent operated water supply systems in the context of Integrated Water Resources Management (IWRM). In: *Integratet Water Resources Management Workshop for German-Egyptian Young Scientists*. Aachen, Oktober 2007
- [Klingel und Deuerlein 2008] KLINGEL, Philipp ; DEUERLEIN, Jochen: Rehabilitation Strategy for Water Supply Systems in Developing Countries - Case Study IWRM Oasis Béni Abbès, Algeria. In: ZYL, J. E. van (Hrsg.) ; ILEMOBADE, A. A. (Hrsg.) ; JACOBS, H. E. (Hrsg.): *Proceedings of the 10th Annual Water Distribution System Analysis Conference WDSA2008* Bd. 340. Kruger National Park, South Africa : American Society of Civil Engineering, August 2008, S. 150–162. – URL <http://link.aip.org/link/?ASC/340/14/1>
- [Klingel u. a. 2005a] KLINGEL, Philipp ; DEUERLEIN, Jochen ; CEMBROWICZ, Ralf G.: Mängelanalyse und Rehabilitation des Wasserversorgungsnetzes von Beni Abbès/Algerien / Institut für Wasser und Gewässerentwicklung der Universität Karlsruhe (TH) im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. November 2005. – Bericht. unveröffentlicht
- [Klingel u. a. 2005b] KLINGEL, Philipp ; DEUERLEIN, Jochen ; FRIEDMANN, Raphael: KANET Benutzerhandbuch / Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Universität Karlsruhe (TH). Karlsruhe, 2005. – Handbuch. unveröffentlicht
- [Klingel u. a. 2007a] KLINGEL, Philipp ; DEUERLEIN, Jochen ; PIETSCHMANN, Rita: Integriertes Planungsinstrument zur Rehabilitation von Wasserversorgungssystemen - Beispiel IWRM Béni Abbès, Algerien. In: *GWF-Wasser/Abwasser* 148 (2007), Nr. 11, S. 779–785

- [Klingel und Guth 2009] KLINGEL, Philipp ; GUTH, Nicolai: Integrated Hydraulic Analysis and Data Management Tool for Water Supply Systems in Developing Countries. In: STARRETT, Steve (Hrsg.): *Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2009, 11th Water Distribution Systems Analysis Symposium (WDSA09)* Bd. 342. Kansas City, USA : American Society of Civil Engineering, Mai 2009, S. 174–186. – URL <http://link.aip.org/link/?ASC/342/18/1>
- [Klingel u. a. 2009a] KLINGEL, Philipp ; KNOBLOCH, Axel ; NESTMANN, Franz: Anwendung hydraulischer Simulationsmodelle zur Analyse und Planung von Wasserverteilungssystemen. In: *WasserWirtschaft* 7-8 (2009), S. 85–90
- [Klingel u. a. 2008] KLINGEL, Philipp ; LAURES, Christine ; DEUERLEIN, Jochen: Planification de la restructuration du réseau AEP de l'oasis Béni Abbès / Institut für Wasser und Gewässerentwicklung der Universität Karlsruhe (TH) im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. Juni 2008. – Bericht. unveröffentlicht
- [Klingel u. a. 2009b] KLINGEL, Philipp ; LAURES, Christine ; GUTH, Nicolai: Das Netzkataster des Wasserversorgungssystems von Béni Abbès - Beschreibung und Handbuch - Version 3 / Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Universität Karlsruhe (TH). Karlsruhe, Januar 2009. – Handbuch. unveröffentlicht
- [Klingel u. a. 2007b] KLINGEL, Philipp ; PIETSCHMANN, Rita ; DEUERLEIN, Jochen: Programme "Gestion intégrée de l'eau"Projet "GIRE Oasis Béni Abbès-Abschlussbericht Projektarbeit 15.02. - 15.07.2007 / Institut für Wasser und Gewässerentwicklung der Universität Karlsruhe (TH) im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. Juli 2007. – Bericht. unveröffentlicht
- [Kluge 2006] KLUGE, Manuela: Rohrnetz- und Schadensanalyse eines Trinkwassernetzes. In: *energie / wasser-praxis* 10 (2006), S. 24–28
- [Knobloch u. a. 2010] KNOBLOCH, Axel ; KLINGEL, Philipp ; OERTLÉ, Emmanuel ; MUTZ, Dieter ; FALLIS, Patrick ; SORG, Friederike ; ZIEGLER, Dörte: Guidelines for Water Loss Reduction - A Focus on Intelligent Pressure Management. In: *Proceedings of the 6th IWA Water Loss Reduction Specialist Conference*. Sao Paulo : International Water Association, 2010
- [Kreska 2004] KRESKA, Oskar: Rehabilitationsstrategien für Wasserverteilungsanlagen. In: *GWF Wasser/Abwasser* 145 (2004), Nr. 13, S. 37–42
- [Kropp 2008] KROPP, Ingo: Rehabilitationsstrategie für Leitungsnetze. In: *wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik* 1-2 (2008), S. 29–32
- [Kumar 1997] KUMAR, A.: Leakage control in intermittent water supplies. In: *Water Supply* 15 (1997), Nr. 1, S. 55–58

- [Kumar 1998] KUMAR, A.: Technologies to improve efficiency in distribution system with intermittent supplies. In: *Water Supply* 16 (1998), Nr. 1/2, S. 576–579
- [Lambert 2003] LAMBERT, Allan: Assessing non-revenue water and its components: a practical approach. In: *Water* 21 (2003), August, S. 50–51
- [Lambert u. a. 2000] LAMBERT, Allan O. ; BROWN, Timothy G. ; TAKIZAWA, M. ; WEIMER, D.: A Review of Performance Indicators for Real Losses from Water Supply Systems. In: *AQUA* (2000). – URL <http://www.studiomarcofantozzi.it/AQUA26jan.pdf>
- [Lang und Detert 2007] LANG, Cornelia ; DETERT, Martin: *Hydraulik von Rohrsystemen / Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe (TH)*. Karlsruhe, Mai 2007. – Skript
- [Lee und Schwab 2005] LEE, Ellen J. ; SCHWAB, Kellog J.: Deficiencies in drinking water distribution systems in developing countries. In: *Journal of Water and Health* 3 (2005), Nr. 2, S. 109–127
- [Liebig und Mumenthey 2008a] LIEBIG, W. ; MUMENTHEY, R.-D.: *ArcGIS-ArcView 9 Band 1: ArcGIS-Grundlagen*. 2. Norden Halmstad : Points Verlag, 2008
- [Liebig und Mumenthey 2008b] LIEBIG, W. ; MUMENTHEY, R.-D.: *ArcGIS-ArcView 9 Band 2: ArcGIS-Geoverarbeitung*. 2. Norden Halmstad : Points Verlag, 2008
- [Mansouri 2008] MANSOURI, Rachid: Die Krise des Wassermanagements in Algerien. In: *TU International* 61 "Wasser" (2008), Januar, S. 16–17
- [Martin und Pohl 2000] MARTIN, Helmut ; POHL, Reinhard: *Technische Hydromechanik 4 - Hydraulische und numerische Modelle*. 1. Berlin : HUSS-Medien GmbH, Verlag Bauwesen, 2000
- [McIntosh 2003] MCINTOSH, Arthur C.: *Asian Water Supplies - Reaching The Urban Poor*. Asian Development Bank and IWA Publishing, August 2003. – URL [http://www.adb.org/documents/books/asian\\_water\\_supplies/asian\\_water\\_supplies.pdf](http://www.adb.org/documents/books/asian_water_supplies/asian_water_supplies.pdf)
- [Meyer und Wehr 1998] MEYER, Cord ; WEHR, Rudi: Formelmäßige Bestimmung der Verlustmengen in Wasserrohrnetzen als Anteil gemessener minimaler Netzzuflüsse. In: *GWF Wasser/Abwasser* 139 (1998), Nr. 1, S. 24–31
- [Miloradov 1992] MILORADOV, M.: Planning and Management of Water-Resource Systems in Developing Countries. In: *Journal of Water Resources Planning and Management* 118 (1992), November/Dezember, Nr. 6, S. 603–619

- [Mischner und Roscher 2006] MISCHNER, Jens ; ROSCHER, Harald: Vergleich von Bewertungssystemen für Wasser- und Gasrohrnetze. In: *energie / wasser-praxis* 3 (2006), S. 80–85
- [Morrison u. a. 2007] MORRISON, John ; TOOMS, Stephen ; ROGERS, Dewi: *District Metered Areas Guidance Notes*. 1. London : IWA Publishing, Februar 2007. – URL <http://www.waterlinks.org/sites/default/files/District%20Metered%20Areas%20Guidance%20Notes.pdf>
- [Musil 2009] MUSIL, Stefan: Nutzung eines Netzinformationssystems für Planung und Betrieb von Wasserversorgungsanlagen. In: *energie / wasser-praxis* 4 (2009), S. 40–42
- [Mutschmann und Stimmelmayer 2007] MUTSCHMANN, Johann ; STIMMELMAYER, Fritz ; KNAUS, W. (Hrsg.) ; KÖHLER, K. H. (Hrsg.) ; MERKL, G. (Hrsg.) ; PREININGER, E. (Hrsg.) ; RAUTENBERG, J. (Hrsg.) ; WEIGELT, R. (Hrsg.) ; WEISS, M. (Hrsg.): *Taschenbuch der Wasserversorgung*. 14. Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, Januar 2007
- [Muyibi 1992] MUYIBI, Suley A.: Planning Water Supply and Sanitation Projects in Developing Countries. In: *Journal of Water Resources Planning and Management* 118 (1992), Juli/August, Nr. 4, S. 351–355
- [Myers 2003] MYERS, Stephen ; WATER AND SANITATION PROGRAM - SOUTH ASIA (Hrsg.): *24-hour Water Supply: Is this Goal Achievable? Drawing lessons from rapid distribution system diagnostic assessments in Indian cities. Fifteenth Meeting of the Urban Think Tank Sept. 23-24, 2003 Hyderabad, India*. Hyderabad : Nagari, 2003. – URL <http://www.waterlinks.org/24-hour-water-supply-goal-achievable>
- [Nestmann u. a. 2009] NESTMANN, Franz ; OBERLE, Peter ; IKHWAN, Muhammad ; LUX, Tobias ; SCHOLZ, Ulrich: Bewirtschaftung unterirdischer Fließgewässer in Karstgebieten - Pilotstudie auf Java, Indonesien. In: *WasserWirtschaft* 7-8 (2009), S. 12–18
- [Nägler und Stopp 1996] NÄGLER, Günter ; STOPP, Friedmar ; ERFURTH, Horst (Hrsg.): *Graphen und Anwendungen*. Stuttgart Leipzig : B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1996
- [Nielsen 1989] NIELSEN, Hans B.: Methods for Analyzing Pipe Networks. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 115 (1989), Februar, Nr. 2, S. 139–157
- [Niemeyer u. a. 1994] NIEMEYER, Rolf G. ; GILLES, Klaus-P. ; RIGGERS, Bernhard: *Reduzierung von Wasserverlusten in Trinkwasserversorgungssystemen in Entwicklungsländern*. Köln : Weltforum Verlag, 1994

- [Nikuradse 1933] NIKURADSE, Johann: *Strömungsgesetze in Rauhen Rohren*. Berlin : Verein Deutscher Ingenieure, 1933 (Forschungsheft 361)
- [Nouh 2005] NOUH, M.: An integrated approach for solving urban water and wastewater crisis in the Arabian Gulf States. In: *Water Science & Technology* 52 (2005), Nr. 9, S. 33–41
- [Ormsbee 1989] ORMSBEE, Lindell E.: Implicit Network Calibration. In: *Journal of Water Resources Planning and Management* 115 (1989), März, Nr. 2, S. 243–257. – URL <http://link.aip.org/link/?QWR/115/243/1>
- [Ormsbee und Wood 1986] ORMSBEE, Lindell E. ; WOOD, Don J.: Explicit Pipe Network Calibration. In: *Journal of Water Resources Planning and Management* 112 (1986), April, Nr. 2, S. 166–182. – URL <http://link.aip.org/link/?QWR/112/166/1>
- [Ormsby u. a. 2004] ORMSBY, Tim ; NAPOLEON, Eileen ; BURKE, Robert ; GROSS, Carolyn ; FEASTER, Laura: *Getting to know ArcGIS Desktop: Basics of ArcView, ArcEditor and ArcInfo*. 2. Redlands : ESRI Press, 2004
- [Papadopoulou und Lee 1998] PAPADOPOULOU, Evanthia ; LEE, D. T.: A new approach for the geodesic Voronoi diagram of points in a simple polygon and other restricted polygonal domains. In: *Algorithmica* 20 (1998), Nr. 4, S. 319–352
- [Paschke u. a. 2001] PASCHKE, Michael ; SPENCER, Kelly ; WANARCHA, Nick ; SIMPSON, Angus R. ; WIDOP, Toni: Genetic Algorithm for Optimising Pumping Operations. In: *19th Federal Convention*. Canberra : Australian Water Association, April 2001
- [Pietschmann u. a. 2006] PIETSCHMANN, Rita ; DEUERLEIN, Jochen ; KLINGEL, Philipp: Übergangsszenarien für eine kontinuierliche Trinkwasserversorgung in Béni Abbès/ Algerien - Abschlussbericht / Institut für Wasser und Gewässerentwicklung der Universität Karlsruhe (TH) im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. Dezember 2006. – Bericht. unveröffentlicht
- [Reed 2005] REED, Brian: Minimum water quantity needed for domestic use in emergencies. In: *WHO - Technical Notes for Emergencies*. World Health Organization, 2005 (9). – URL [http://www.searo.who.int/LinkFiles/List\\_of\\_Guidelines\\_for\\_Health\\_Emergency\\_Minimum\\_water\\_quantity.pdf](http://www.searo.who.int/LinkFiles/List_of_Guidelines_for_Health_Emergency_Minimum_water_quantity.pdf)
- [Roscher 2000] ROSCHER, Harald: *Sanierung städtischer Wasserversorgungsnetze*. 1. Berlin : Verlag Bauwesen, 2000
- [Roscher 2005] ROSCHER, Harald: Das 21. Jahrhundert - Jahrhundert der Rehabilitation unserer Wasserrohrnetze. In: *GWF Wasser/Abwasser* 146 (2005), Nr. 12

- [Roscher 2008] ROSCHER, Harald: Rehabilitation von Wasserversorgungsnetzen. In: *wut Wasserwirtschaft Wassertechnik* 1-2 (2008), S. 39–40
- [Rossmann 2000] ROSSMANN, Lewis A.: Epanet 2 Users Manual / Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, Environmental Protection Agency. Cincinnati, September 2000 (EPA/600/R-00/057). – Handbuch. – URL <http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/dw/epanet/EN2manual.PDF>
- [Sashikumar u. a. 2003] SASHIKUMAR, N. ; MOHANKUMAR, M. S. ; SRIDHARAN, K.: Modelling an Intermittent Water Supply. In: BIZIER, Paul (Hrsg.) ; DEBARRY, Paul (Hrsg.): *Proceedings of World Water and Environmental Resources Congress 2003* Bd. 118. Philadelphia : American Society of Civil Engineering, 2003, S. 261. – URL <http://link.aip.org/link/?ASC/118/261/1>
- [Schmidt 2005] SCHMIDT, Bernhard: *Algerien. Frontstaat im globalen Krieg*. 1. Münster : Unrast Verlag, 2005
- [Schmitz 2000] SCHMITZ, Charlotte: Profen im Wassersystem. In: *gtz Aktzente* 3 (2000), S. 12–14
- [Selvakumar u. a. 2002] SELVAKUMAR, Ariamalar ; CLARK, Robert M. ; SIVAGANESAN, Mano: Costs for Water Supply Distribution System Rehabilitation. In: *Journal of Water Resources Planning and Management* 128 (2002), Juli/August, Nr. 4, S. 303–306
- [Sempewo u. a. 2008] SEMPEWO, J. ; PATHIRANA, Assela ; VAIRAVAMOORTHY, K.: Spatial Analysis Tool For Development Of Leakage Control Zones From The Analogy Of Distributed Computing. In: ZYL, J. E. van (Hrsg.) ; ILEMOBADE, A. A. (Hrsg.) ; JACOBS, H. E. (Hrsg.): *Proceedings of the 10th Annual Water Distribution System Analysis Conference WDSA2008* Bd. 340. Kruger National Park, South Africa : American Society of Civil Engineering, August 2008, S. 676–690. – URL <http://link.aip.org/link/?ASC/340/57/1>
- [Shamos 1975] SHAMOS, Michael I.: Geometric complexity. In: *STOC '75: Proceedings of seventh annual ACM symposium on Theory of computing*. New York : Association for Computing Machinery, 1975, S. 224–233
- [Simpson 1999] SIMPSON, Angus R.: Modeling of Pressure Regulating Devices - A Major Problem Yet to be Satisfactorily Solved in Hydraulic Simulation. In: *Proceedings of the Water Distribution System Analysis Conference*. Tempe, Juni 1999
- [Simpson 2000] SIMPSON, Angus R.: Optimization of design of water distribution systems using genetic algorithms. In: *Acta Hydrotechnica* 18 (2000), Dezember, Nr. 29, S. 97–106

- [Simpson u. a. 1994] SIMPSON, Angus R. ; DANDY, Graeme C. ; MURPHY, Laurence J.: Genetic Algorithms Compared to Other Techniques for Pipe Optimization. In: *Journal of Water Resources Planning and Management* 120 (1994), Juli/August, Nr. 4, S. 423–443
- [Sorge 2007] SORGE, Hans-Christian: Nachhaltiger Substanzerhalt - Zustandsuntersuchungen an Trinkwasserleitungen. In: *wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik* 6 (2007), S. 55–57
- [Thibodeaux 2005] THIBODEAUX, Byron K.: People Make the Difference - Staff for Project Success. In: *Proceedings of the GITA's 28th Annual Conference*. Denver : Geospatial Information & Technology Association, März 2005, S. 1–14
- [Thornton u. a. 2008] THORNTON, Julian ; STURM, Reinhard ; KUNKEL, George: *Water Loss Control*. 2. New York : McGraw-Hill, 2008
- [Todini und Pilati 1987] TODINI, E. ; PILATI, S.: A gradient method for the analysis of pipe networks. In: *Proceedings of the International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution*. Leicester, September 1987
- [Totsuka u. a. 2004] TOTSUKA, N. ; TRIFUNOVIC, N. ; VAIRAVAMOORTHY, K.: Intermittent urban water supply under water starving situations. In: *Proceedings of the 30th WEDC International Conference*. Vientiane, 2004, S. 505–512
- [Trifunovic und Vairavamoorthy 2008] TRIFUNOVIC, N. ; VAIRAVAMOORTHY, K.: Use of demand-driven models for reliability assessment of distribution networks in developing countries. In: ZYL, J. E. van (Hrsg.) ; ILEMOBADE, A. A. (Hrsg.) ; JACOBS, H. E. (Hrsg.): *Proceedings of the 10th Annual Water Distribution System Analysis Conference WDSA2008* Bd. 340. Kruger National Park, South Africa : American Society of Civil Engineering, August 2008, S. 129–141
- [Ulanicki u. a. 2008] ULANICKI, Bogumil ; ABDELMEGUID, Hossam ; BOUNDS, Peter ; PATEL, Ridwan: Pressure control in district metering areas with boundary and internal pressure reducing valves. In: ZYL, J. E. van (Hrsg.) ; ILEMOBADE, A. A. (Hrsg.) ; JACOBS, H. E. (Hrsg.): *Proceedings of the 10th Annual Water Distribution System Analysis Conference WDSA2008* Bd. 340. Kruger National Park, South Africa : American Society of Civil Engineering, August 2008, S. 691–703
- [United Nations 2000] UNITED NATIONS: *United Nations Millennium Declaration*. September 2000. – URL <http://www.un.org/millennium/declaration/ares552e.pdf>
- [United Nations 2002] UNITED NATIONS: *Implementing the Millennium Declaration - The Millennium Development Goals and the United Nations Role / United Nations*. Oktober 2002. – Bericht

- [United Nations 2003] UNITED NATIONS: The right to water (arts. 11 and 12 of the International Covenant on Economic, Social and Cultural Rights) / United Nations Economic and Social Council. Genf, Januar 2003 (15 (2002)). – General Comment. – URL [http://www.unhchr.ch/tbs/doc.nsf/0/a5458d1d1bbd713fc1256cc400389e94/\\$FILE/G0340229.pdf](http://www.unhchr.ch/tbs/doc.nsf/0/a5458d1d1bbd713fc1256cc400389e94/$FILE/G0340229.pdf)
- [United Nations 2007] UNITED NATIONS: The Millennium Development Goals Report 2007 / United Nations. New York, 2007. – Bericht. – URL <http://www.un.org/millenniumgoals/pdf/mdg2007.pdf>
- [United Nations 2008a] UNITED NATIONS: *World Population Prospects: The 2008 Revision, Population Database*. Online (Abruf vom 05.01.2010). 2008. – URL <http://esa.un.org/UNPP/p2k0data.asp>
- [United Nations 2008b] UNITED NATIONS: *World Urbanization Prospects: The 2007 Revision*. Online (Abruf vom 15.01.2010). Januar 2008. – URL [http://www.un.org/esa/population/meetings/EGM\\_PopDist/Heilig.pdf](http://www.un.org/esa/population/meetings/EGM_PopDist/Heilig.pdf)
- [Vairavamoorthy u. a. 2007a] VAIRAVAMOORTHY, K. ; YAN, Jimin ; GALGALE, Harshal M. ; GORANTIWAR, Sunil D.: IRA-WDS: A GIS-based risk analysis tool for water distribution systems. In: *Environmental Modelling & Software* 22 (2007), S. 951–965
- [Vairavamoorthy u. a. 2008] VAIRAVAMOORTHY, Kala ; GORANTIWAR, Sunil D. ; PATHIRANA, Assela: Managing urban water supplies in developing countries - Climate change and water scarcity scenarios. In: *Physics and Chemistry of the Earth* 33 (2008), S. 330–339
- [Vairavamoorthy u. a. 2007b] VAIRAVAMOORTHY, Kala ; GORANTIWAR, Sunil D. ; S., Mohan: Intermittent Water Supply under Water Scarcity Situations. In: *Water International* 32 (2007), März, Nr. 1, S. 121–132
- [Vairavamoorthy u. a. 2007c] VAIRAVAMOORTHY, Kala ; YAN, Jimin ; GORANTIWAR, Sunil D.: Modelling the risk of contaminant intrusion in water mains. In: *Water Management* 160 (2007), Juni, Nr. WM2, S. 123–132
- [Vairavamoorthy u. a. 2001] VAIRAVAMOORTHY, Kalanithy ; AKINPELU, Ebenezer ; LIN, Zhuhai ; ALI, Mohammed: Design of Sustainable Water Distribution Systems in Developing Countries. In: PHELPS, Don (Hrsg.) ; SEHLKE, Gerald (Hrsg.): *Proceedings of World Water and Environmental Resources Congress 2001* Bd. 111, American Society of Civil Engineering, 2001, S. 378–378. – URL <http://link.aip.org/link/?ASC/111/378/1>
- [Vairavamoorthy und Lumbers 1998] VAIRAVAMOORTHY, Kalanithy ; LUMBERS, Jeremy: Leakage Reduction in Water Distribution Systems: Optimal Valve Control. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 124 (1998), November, Nr. 11, S. 46–54

- [Valentin 2003] VALENTIN, F.: *Hydraulik II - Angewandte Hydromechanik*. Lehrstuhl für Hydraulik und Gewässerkunde, Technische Universität München, 2003
- [van Zyl und Clayton 2007] VAN ZYL, Jakobus E. ; CLAYTON, Christopher R. I.: The effect of pressure on leakage in water distribution systems. In: *Water Management* 160 (2007), Juni, Nr. WM2, S. 109–114
- [Waerder u. a. 2003] WAERDER, Theo ; HOWARDE, Heinz ; ESDERS, Bernd: Armaturen- und Hydrantenkontrolle im Wasserversorgungsnetz - Kostenfalle oder Erfolgsfaktor? In: *GWF Wasser/Abwasser* 144 (2003), Nr. 11, S. 770–773
- [Wagner 2008] WAGNER, Walter: *Regel- und Sicherheitsarmaturen*. 1. Würzburg : Vogel Fachbuch, 2008 (Kamprath-Reihe)
- [Walski u. a. 2004] WALSKI, Thomas ; BEZTS, William ; POSLUSZNY, Emanuel T. ; WEIR, Mark ; WHITMAN, Brian: Understanding the Hydraulics of Water Distribution System Leaks. In: SEHLKE, Gerald (Hrsg.) ; HAYES, Donald F. (Hrsg.) ; STEVENS, David K. (Hrsg.): *Proceedings of World Water and Environmental Resources Congress 2004* Bd. 138. Salt Lake City : American Society of Civil Engineering, 2004, S. 476–476. – URL <http://link.aip.org/link/?ASC/138/476/1>
- [Walski u. a. 2006] WALSKI, Thomas ; BEZTS, William ; POSLUSZNY, Emanuel T. ; WEIR, Mark ; WHITMAN, Brian E.: Modeling leakage reduction through pressure control. In: *Journal of the American Water Works Association* 98 (2006), Nr. 4, S. 147–155
- [Walski u. a. 2001a] WALSKI, Thomas M. ; CHASE, Donald V. ; SAVIC, Dragan A.: *Water Distribution Modeling*. 1. Waterbury : Haestad Methods Inc., 2001
- [Walski u. a. 2001b] WALSKI, Thomas M. ; CHASE, Donald V. ; SAVIC, Dragan A. ; GRAYMAN, Walter ; BECKWITH, Stephen ; KOELLE, Edmundo: *Advanced Water Distribution Modeling and Management*. 1. Waterbury : Haestad Methods Inc., 2001
- [Weimer 1999] WEIMER, Dieter: Technische und wirtschaftliche Bewertungskriterien für Wasserverluste. In: *GWF Wasser/Abwasser* 140 (1999), Nr. 13, S. 83–90
- [WHO 2003] WHO: *Constraints affecting the development of the water supply and sanitation sector*. Online (Abruf vom 15.01.2010). April 2003. – URL [http://www.who.int/docstore/water\\_sanitation\\_health/wss/constraints.html](http://www.who.int/docstore/water_sanitation_health/wss/constraints.html)
- [WHO und UNICEF 2000] WHO ; UNICEF: *Global Water Supply and Sanitation Assessment 2000 Report* / World Health Organization and United Nations Children's Fund. Geneva and New York, 2000. – Bericht. – URL [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/monitoring/jmp2000.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/jmp2000.pdf)

- [Wiegleb und Beilke 1999] WIEGLEB, K. ; BEILKE, G.: Hydraulische Rohrnetzmodelle und ihre Anwendung in der Wasserverteilung. In: *Dresdner Berichte* Bd. 13. Dresden : TU Dresden, 1999, S. 175–194
- [Zeiler 1999] ZEILER, Michael: *Modeling Our World - The ESRI Guide to Geodatabase Design*. Redlands : ESRI Press, 1999
- [Zoehl und Kruschik 1978] ZOEHL, Heinz ; KRUSCHIK, Julius: *Strömungen durch Rohre und Ventile*. Wien New York : Springer-Verlag, 1978