

**Institut für
Wasserwirtschaft und Kulturtechnik
Universität Karlsruhe (TH)**

**Entwurfsoptimierung städtischer
Abwasserentsorgungsnetze**

Iris V. Domínguez Talavera

Heft 218

Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik
der Universität Karlsruhe (TH)
mit "Theodor-Rehbock-Wasserbaulaboratorium"
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Franz Nestmann, Ordinarius

2002

Entwurfsoptimierung städtischer Abwasserentsorgungsnetze

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

der Fakultät für
Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

genehmigte

DISSERTATION

von

Iris Violeta Domínguez Talavera, Ing. Civil

aus Lima, Peru

Tag der mündlichen Prüfung: 29. November 2002

Hauptreferent: Priv.-Doz. Dr. habil. R. G. Cembrowicz
1. Korreferent: Prof. Dr.-Ing. E.h. H. H. Hahn, Ph.D.
2. Korreferent: Prof. Dr.-Ing. T. G. Schmitt

Karlsruhe 2002

Vorwort

Instationäre Abflußberechnungen dienen seit Jahrzehnten der Simulation des hydraulischen Verhaltens von Abwasserentsorgungsnetzen unter zeitvarianter Belastung und wurden bisher auch eingesetzt, um Netze neu zu dimensionieren. Dabei werden Profile, Einbautiefen und Gefälle geschätzt und anschließend mit Hilfe wiederholter Simulationsrechnungen überprüft. Dieses Vorgehen ist aufwendig, hat zahlreiche Nachteile und führt zu keinem befriedigenden Ergebnis.

Das Verfahren, das Fr. Domínguez konzipiert und implementiert hat, besitzt das Ziel, die praktizierten Schätzverfahren der Dimensionierungen von Abwasserentsorgungsnetzen zu ersetzen und die Aufgabe mit formalen Optimierungsverfahren zu lösen, welche die Simulation implizieren. Trotz zahlreicher Versuche, die in der internationalen Literatur dokumentiert sind, war dieses Ziel bisher nicht erreicht worden. Da es sich um eine Ingenieursaufgabe handelt, ist über die mathematischen und algorithmischen Lösungskonzepte hinausgehend auch die Einbeziehung realer Randbedingungen und Entwurfskriterien erforderlich, um Praxisrelevanz und Effizienz gegenüber bestehenden Methoden nachzuweisen.

Fr. Domínguez formuliert die Systemoptimierung formal nach den Regeln des Operations Research als Kostenminimierung unter Nebenbedingungen. Ihr Konzept sieht dabei eine Unterteilung der Entwurfsoptimierung in Design- und Layoutoptimierung vor, wie auch andere Forscher vorgeschlagen haben. Die Designoptimierung dient der eigentlichen Dimensionierung eines Netzes vorgegebener Topologie, es werden kostenminimale Profile, Einbautiefen, Gefälle der Haltungen bestimmt. Die Layoutoptimierung bestimmt die optimale Topologie auf der Grundlage des gegebenen Gesamtgraphen, der in der Regel dem Straßenmuster der Stadt entspricht.

Zur Designoptimierung verwendet Fr. Domínguez das Prinzip der Diskreten Dynamischen Programmierung. Am Anfang jeder Haltung wird der Bereich der zulässigen Einbautiefen diskretisiert. Für jede Einbautiefe am Anfang einer Haltung werden für jedes verfügbare Profil (Entscheidungsvariable) das Sohlgefälle des Kanals unter Einhaltung der Restriktionen berechnet. Es resultieren Verlegungstiefen, Abflußganglinien und Kosten am Haltungsende (Zustandsvariable). Im sequentiellen Entscheidungsprozeß werden die nichtdominierten Lösungen innerhalb eines diskreten Abschnittes der Einbautiefen einer Haltung gespeichert und als Anfangszustand der Nachfolgehaltung übernommen. Pumpwerke, Regenbecken usw werden ebenfalls an den Anfang einer Hal-

tung gelegt. Am Systemende ergibt sich eine haltungsbezogene Entscheidungs- und Zustandssequenz der Profile, Einbautiefen, Abflußganglinien, Förderhöhen, Regenbeckenvolumina, Kosten, die das Entwurfsoptimum darstellen.

Die Abflußberechnung erfolgt haltungsweise. Das Netz wird grundsätzlich so dimensioniert, daß Freispiegelabfluß herrscht. Zur Lösung des Differentialgleichungssystems nach Saint-Venant wird ein direktes implizites Differenzenverfahren verwendet. In steilen Haltungen wird der Abflußtransport nach der kinematischen Welle berechnet. Das Verfahren gestattet, bereits vorhandene Haltungen im Netz mit zu berücksichtigen. Wird die Vollfüllung dieser Haltungen überschritten, erfolgt die Entwässerung unter Druck.

Die Layoutoptimierung erfolgt über Evolutionsstrategien. Ausgehend von einer 'Population' zufällig gewählter Layouts werden unter Verwendung von Mechanismen der biologischen Evolution - Mutation, Rekombination, Selektion - veränderte Netztopologien generiert. Jede Netztopologie ist ein Verästelungsnetz, das die Knoten des zugrunde gelegten Gesamtgraphen enthält. Die Ermittlung der besten Lösungen einer Population, die an die nächste 'Generation' übergeben werden, erfolgt mit Hilfe der Designoptimierung. Der rechnerische Gesamttablauf der Entwurfsoptimierung erfordert die hierarchische Verbindung der Design- und Layoutoptimierung. Das Verfahren konvergiert in Richtung des globalen Optimums. In der Lösungspopulation sind außer dem kostenminimalen Kanalnetzentwurf, der Design und Layout des Netzes umfaßt, weitere 'nahoptimale' Entwürfe enthalten.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß Fr. Domínguez eine sehr schwierige Aufgabe innovativ, originär und paxisrelevant gelöst hat. Ihre programmtechnischen Implementierungen, wie auch die Einbeziehung ingenieurtechnischer Vorgaben, führen zu einem Ergebnis, das bisher international nicht erreicht worden war. Verbindungen zu korrespondierenden Modellen, die ergänzende Simulationsrechnungen am Gesamtnetz gestatten, werden über Schnittstellen hergestellt und erweitern die Funktionalität der Anwendung. Eine Verifizierung an einem realen Planungsbeispiel ist dokumentiert. Fr. Domínguez hat damit einen Beitrag geleistet, der internationale Anerkennung finden wird und die Planung von Abwassernetzen sowohl in Industrie- als auch in Entwicklungsländern in verbesserter Form ermöglichen kann.

Karlsruhe, im Dezember 2002

R.G. Cembrowicz

Franz Nestmann

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Priv.-Doz. Dr. habil. R.G. Cembrowicz für die Anregung zu diesem Thema, Betreuung und Übernahme des Hauptreferats.

Herrn Prof. Dr.-Ing. E.h. H.H. Hahn, Ph.D. und Herrn Prof. Dr.-Ing. T.G. Schmitt möchte ich für die Übernahme der Korreferate danken.

Den wissenschaftlichen Hilfskräften des „Bereichs Systemanalyse“ am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Herrn Hayati Aygün, Tobias Getrost und Markus Schulze, möchte ich meinen Dank für die Unterstützung am Computer aussprechen.

Schließlich möchte ich mich beim „Evangelischen Studienwerk e.V. Villigst“ für die Promotionsförderung herzlich bedanken.

Kurzfassung

Die Neuplanung und Sanierung von Entwässerungssystemen stellt eine komplexe Aufgabe dar, die weiterhin mittels vereinfachter Berechnungsmethoden und Iterationsverfahren mit Hilfe von Simulationsmodellen gelöst wird. Daher kann damit Kosteneffizienz nicht erreicht werden. Das entwickelte Modell vollzieht den Entwurf von Abwasserentsorgungsnetzen mit Hilfe von Verfahren aus der Systemanalyse: Evolutionsstrategien und Dynamische Programmierung, die das Potenzial haben, die Aufgabe für den Einsatz in der Praxis zu lösen. Im Vergleich zu Simulationsmodellen zum Nachweis hydraulischer Leistungsfähigkeit von neugeplanten oder bestehenden Kanalnetzen, die die Trassenführung, Profilform, Profilabmessungen, Verlegungstiefen einschließlich Sohlengefälle der Kanäle als Eingabedaten für die hydrodynamische Abflußsimulation benötigen, ermittelt das vorliegende Modell diese Netzdaten und zwar kostenminimal. Die Zielfunktion stellt die Kosten des Ableitungssystems in Abhängigkeit von der Netztopologie, Sohlentiefen der Schächte, Profile und Einbautiefen der Kanäle dar. Im Fall, daß Pumpwerke und Regenbecken an vorgegebenen Standorten im Kanalnetz einzubinden sind, werden die Förderhöhe, der Förderstrom und das Pumpensumpfvolumen sowie das Regenbeckenvolumen in die Zielfunktion einbezogen. Die Nebenbedingungen stellen die einzuhaltenden ingenieur-technischen Randbedingungen, wie minimal und maximal zulässige Fließgeschwindigkeit und Sohlentiefe, minimal zulässige Überdeckung für geschlossene Profile, Freispiegelabfluß etc dar.

Das Entwurfsverfahren wird in die Design- und Layoutoptimierung unterteilt. Zur Designoptimierung wird das Kanalsystem als eine Sequenz von Stufen modelliert, so daß die Dynamische Programmierung zur Anwendung kommt. Der haltungsbezogene Entscheidungsprozeß der Dimensionierung für vorgegebene Belastungsabflüsse und eine haltungsbezogene hydrodynamische Abflußberechnung auf der Grundlage des Saint-Venant Differentialgleichungssystems werden damit gleichzeitig möglich. Das Lösungsverfahren gestattet, als bereits vorhanden einzugebende Haltungen im Netz im Optimierungsprozeß mitzuberücksichtigen, so daß es auch zur Sanierung von Kanalnetzen eingesetzt werden kann. Die Layoutoptimierung verwendet Evolutionsstrategien mit Mutations-Schrittweiten-Regelung. Die Netztopologie wird durch Zufallsmechanismen als Verästelungsnetz aus dem in der Regel zugrundegelegten vermaschten Straßennetz gebildet. Jede resultierende Netztopologie wird mit Hilfe der Designoptimierung bewertet. Im gesamten Prozeß führt dann die Layoutwahl einschließlich Designoptimierung zur Layoutoptimierung.

Damit beinhaltet die Entwurfsoptimierung sowohl Auslegung als auch Bemessung der Kanäle und ermöglicht gleichzeitig die Auswirkung veränderter Entwurfskriterien auf das Ergebnis zu ermitteln, so daß Parametersensitivitäten untersucht werden können. Die Modellentwicklung schließt eine Schnittstelle zum Simulationsmodell SWMM (*Storm Water Management Model*), das das hydraulische Verhalten des resultierenden Entwässerungsnetzes bestätigt, ein. Das entwickelte Optimierungsmodell wird anhand eines Planungsbeispiels verifiziert.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	iv
1 Einleitung	1
1.1 Thematik und Veranlassung	1
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Vorgehensweise	5
2 Stand der Entwicklung	6
2.1 Kanalnetzberechnungsverfahren der Praxis	6
2.2 Stand der Forschung	9
3 Optimierungsmodell	32
3.1 Kanalnetzelemente	32
3.1.1 Haltungen	32
3.1.2 Schächte	32
3.1.3 Pumpwerke	33
3.1.4 Regenbecken	33
3.2 Layoutoptimierung	33
3.2.1 Graphentheorie	33
3.2.1.1 Graphentheoretische Darstellung der Netztopologie	33
3.2.2 Evolutionsstrategien u. Genetische Algorithmen	36
3.2.2.1 Einführung	36
3.2.2.2 Gemeinsamkeiten u. Unterschiede	38
3.2.2.3 Anwendung auf die Siedlungswasserwirtschaft	39
3.2.2.4 Lösungsalgorithmus nach Evolutionsstrategien	39

3.3	Designoptimierung	43
3.3.1	Dynamische Programmierung	43
3.3.1.1	Einführung	43
3.3.1.2	Lösungsalgorithmus	44
3.3.2	Berechnung der Kanalneigung	57
3.3.3	Abflußberechnung	59
3.3.3.1	Saint-Venant Differentialgleichungssystem	59
3.3.3.2	Berechnungsgrundlagen	61
3.3.3.3	Freispiegelabfluß	62
3.3.3.4	Druckabfluß	72
3.3.3.5	Vereinfachte Abflußberechnung	74
3.4	Layout- und Designoptimierung	75
3.4.1	Algorithmus des gesamten Modells	75
4	Planungsbeispiel	78
5	Zusammenfassung und Ausblick	88
	Literatur	94
	Anhang A: Knotenindices u. -koordinaten	1
	Anhang B: Ergebnisse der Optimierung	6
	Anhang C: Ergebnisse der Simulation	12

Abbildungsverzeichnis

3.1	Iso-Knoten-Linien	46
3.2	Lösungsfindung mit Pumpwerk	51
3.3	Entscheidungsprozeß nach der Dynamischen Programmierung	54
3.4	Flußdiagramm für die Designoptimierung	56
3.5	Flußdiagramm für die Entwurfsoptimierung	77
4.6	$(3/2 + 6)$ -ES mit der besten Lösung für Fitten-Ballern	81
4.7	Bestehendes Abwasserentsorgungsnetz Fitten-Ballern	83
4.8	Systemgraph zur Kanalnetzoptimierung	84
4.9	Optimale Lösung für Fitten-Ballern	85
4.10	Abflußganglinie am Systemende	86

Tabellenverzeichnis

2.1	Zusammenfassung der Literaturübersicht	30
3.2	Analogie zwischen einem Lebewesen und einem Kanalsystemgraph . . .	40
4.3	Baukosten der Kanäle in [EUR/lfdm] (Sohllentiefe s [m] / DN [mm])	79
4.4	Ergebnisse der ausgeführten Evolutionsstrategien	80
4.5	Synopsis des optimalen Kanalnetzentwurfs	82

1 Einleitung

1.1 Thematik und Veranlassung

Zur Kanalnetzberechnung wurden im Laufe der Jahre „konventionelle Verfahren“ und „Niederschlag-Abfluß-Modelle“ (N-A-Modelle), um dem Ausbau städtischer Kanalisationen sowie den anwachsenden Anforderungen zu entsprechen, entwickelt. Eine detaillierte Beschreibung und Anwendungsbereiche der konventionellen Verfahren und der N-A-Modelle sind in der Literatur zahlreich dokumentiert, z. B. ATV-A 118 [6], ATV-M 165 [9], Engel [30] und Sieker [94].

Die Entwicklung der Verfahren zur Kanalnetzberechnung war dadurch bedingt, den Rechenaufwand in Grenzen zu halten. Es ergab sich das Konzept des „Bemessungsregens“, d. h. ein statistisch aufbereiteter Einzelregen (Block- oder Modellregen) wird vorgegeben und zugehörige Abflüsse und Wasserstände werden berechnet. Die Verbreitung der Computer mit zunehmender Leistungsfähigkeit hat die Einführung des Begriffs „Langzeitsimulation“ ermöglicht, d. h. eine Reihe natürlicher Regen wird vorgegeben, die jeweils zugehörigen Abflüsse und Wasserstände sind zu berechnen und anschließend statistisch auszuwerten. Wenn die Serie in sich abgeschlossene Regenereignisse enthält, dann wird eine „Serien-Simulation“ ausgeführt, während die Berechnung mit einem Kontinuum von Regen- und Trockenperioden eine „Kontinuums-Simulation“ darstellt. Aufgrund des erheblichen Rechenaufwands, den die Langzeitsimulation verursacht, wird sie in der gegenwärtigen Ingenieurpraxis noch begrenzt eingesetzt. Im Zusammenhang mit den bisherigen N-A-Modellen sollen die o. a. Konzepte in folgenden Bereichen Anwendung finden (ATV-M 165, S. 2, [9]): (i) Der Bemessungsregen weiterhin für die Neubemessung von Kanalnetzen, (ii) die Serien-Simulation für den Nachweis der hydraulischen Leistungsfähigkeit vorhandener Netze, (iii) die Kontinuums-Simulation für die Bemessung und Bewirtschaftung von Speicherbecken.

Die bisherigen Methoden zu N-A-Berechnungen haben gemeinsam, daß der komplexe Niederschlagsabflußvorgang in urbanen Einzugsgebieten als zeitlich und räumlich getrennt ablaufende Phasen: (i) Belastungsbildung, (ii) Abflußbildung, (iii) Abflußkonzentration und (iv) Abflußtransport oder Kanalabfluß, mit jeweils unterschiedlichen Modellansätzen simuliert wird. Die Phasen „Abflußbildung“ und

„Abflußkonzentration“ gehören zusammen zur Ermittlung des Oberflächenabflusses. Modelle zur Kanalnetzberechnung können den Oberflächen- und den Kanalabfluß nach verschiedenen Ansätzen berechnen. Im vorliegenden Modell werden die Belastungsabflüsse als Ergebnis eines Oberflächenabflußmodells als gegeben vorausgesetzt.

In der Phase der Belastungsbildung wird eine Niederschlagsbelastung zur Bemessung eines Kanalnetzes angesetzt. Die Standardbelastung war in der Vergangenheit ein Bemessungsregen: Ein intensitätskonstanter Blockregen vorgegebener Dauer und Häufigkeit oder ein intensitätsvariabler Modellregen, wie neue Berechnungsverfahren zur Zeit auch verwenden. Heutzutage werden auch Naturregen in ihrer tatsächlichen zeitlichen Verteilung und Dauer verwendet.

In der Phase der Abflußbildung wird der zum Abfluß kommende Niederschlag aus der angesetzten Niederschlagsbelastung ermittelt, indem der Niederschlag um die Verlustanteile aufgrund physikalischer Vorgänge, wie Befeuchtung, Muldenauffüllung, Verdunstung und Versickerung in den Boden, reduziert wird.

Die Phase der Abflußkonzentration beschreibt die Umwandlung des abflußwirksamen Niederschlags in die am Tiefpunkt des betrachteten Teileinzugsgebiets entstehende Abflußganglinie. Diese stellt die zeitliche Verteilung des Abflusses beim Eintritt in das Kanalnetz dar. Dabei können die komplexen physikalischen Fließvorgänge bisher nur näherungsweise durch Übertragungsfunktionen berücksichtigt werden.

Die Phase des Abflußtransports beschreibt die Veränderung der Abflußganglinie durch die Translation (Wellenverschiebung) und die Retention (Wellendämpfung) im Kanal. In dieser Phase wird zwischen „hydrologischen“ und „hydrodynamischen“ Ansätzen unterschieden. Hydrologische Methoden verwenden Übertragungsfunktionen zur Abflußberechnung, während hydrodynamische Berechnungsansätze auf der Lösung der Saint-Venant Gleichungen (Bollrich [14], Chow et al. [21], Saint-Venant [82]) basieren. Daher wird zwischen hydrologischen und hydrodynamischen N-A-Modellen unterschieden, obwohl sich der Unterschied nur auf die Abflußtransformation bezieht.

Ebenso wie bei den hydrologischen N-A-Methoden findet auch bei den hydrodynamischen N-A-Methoden eine Trennung der Fließvorgänge auf der Oberfläche und im Kanal statt. Die auf der Oberfläche ablaufenden Prozessphasen „Abflußbildung“ und

„Abflußkonzentration“ werden auch bei der überwiegenden Zahl der hydrodynamischen Modelle aufgrund der inhomogenen Oberflächenverhältnisse mit hydrologischen Methoden simuliert. Bei den hydrologischen Methoden wird dem physikalischen Prozeß der Abflußtransformation eine Übertragungsfunktion zugeordnet. Die Berechnung der Abflußganglinie aus der Zulaufwelle in den Kanal erfolgt, ohne die genauen physikalischen Abläufe im Kanalsystem zu berücksichtigen. Wie o. a. berechnen hydrodynamische Methoden die Abflußtransformation im Kanal auf der Grundlage der Saint-Venant Differentialgleichungen –Kontinuitäts- und dynamische Bewegungsgleichung–, die die hydraulischen Gesetzmäßigkeiten des instationären, ungleichförmigen Fließvorgangs in Kanalnetzen mathematisch beschreiben.

Anders als in den hydrologischen und hydrodynamischen Abflußmodellen rechnen konventionelle Verfahren mit Maximalabflußwerten. Als Belastung werden intensitätskonstante Blockregen angesetzt. Eine Aufteilung in Oberflächen- und Kanalabfluß findet nicht statt. Die Abflußbildung wird pauschal über einen konstanten Abflußbeiwert erfaßt, so daß das Ergebnis ein Blockabfluß ist. Die Abflußkonzentration auf der Oberfläche wird nicht simuliert. Die Abflußtransformation im Kanal wird durch den Ansatz einer Fließzeitverschiebung, einer reinen Translation, vereinfacht.

Zur Wahl des Verfahrens zur Kanalnetzrechnung wird in der Fachliteratur (ATV-M 165, S. 16, [9]) folgendes empfohlen: (*i*) Einfache Verfahren sollten nur noch bei der Neubemessung der Kanalisation kleiner Einzugsgebiete und bei der Vordimensionierung zu sanierender Kanalhaltungen verwendet werden, (*ii*) hydrologische Modelle sollten bei der Kontinuums-Simulation zur Speicherbewirtschaftung oder Schmutzfrachtberechnung eingesetzt werden, und (*iii*) hydrodynamische Modelle sollten für den hydraulischen Nachweis größerer Kanalnetze –sei es mit Hilfe von Bemessungsregen oder durch die Serien-Simulation– verwendet werden.

In Bezug auf die bisher entwickelten Methoden zur Kanalnetzrechnung, die konventionellen Verfahren und die N-A-Modelle, kann allgemein festgestellt werden, daß noch keine Methode für einen systemanalytischen Entwurf von Abwasserentsorgungsnetzen zur Verfügung steht, was die vorliegende Arbeit grundsätzlich motiviert hat. Dieser Entwicklungsbedarf wird im Kapitel 2 durch eine ausführliche Durchsicht der bestehenden Verfahren sowohl der Praxis als auch der Forschung aufgezeigt.

1.2 Zielsetzung

Es ist Ziel der Arbeit, ein mathematisches Modell zum Entwurf städtischer Abwasserentsorgungsnetze mit Hilfe von *Operations Research*-Verfahren, die die Aufgabe für den Einsatz in der Praxis lösen können, zu entwickeln und einen zugehörigen Lösungsalgorithmus zu implementieren.

Im Vergleich zu Simulationsmodellen, die zum Nachweis der hydraulischen Leistungsfähigkeit von neugeplanten oder bestehenden Netzen eingesetzt werden, ermittelt das vorliegende Modell mit Hilfe von Evolutionsstrategien und der Dynamischen Programmierung für vorgegebene zeitinvariante oder zeitvariante Bemessungsabflüsse, unter Berücksichtigung technischer Entwurfskriterien, die Profile, Einbautiefen einschließlich Sohlengefälle und Trassenführung der Kanäle im gesamten Kanalsystem, wobei haltungsweise eine hydrodynamische Abflußberechnung durchgeführt wird.

Die Zielfunktion (ZF) stellt die Kosten (c) des Kanalsystems in Abhängigkeit von der Netztopologie (B_k), Sohlentiefen der Schächte (s^S), Profilen der Haltungen (d) sowie Sohlentiefen am Haltungsanfang (s^a) und am Haltungsende (s^e) dar. Im Fall, daß Pumpwerke und/oder Regenbecken an vorgegebenen Standorten im Kanalnetz einzuplanen sind, werden die Förderhöhe (h^{PW}), Förderstrom (Q^{PW}), Pumpensumpfvolumen (V^{PW}) und Regenbeckenvolumen (V^{RB}) in die Zielfunktion einbezogen:

$$\min ZF = \min c (B_k, s^S, d, s^a, s^e, h^{PW}, Q^{PW}, V^{PW}, V^{RB}) \quad (1.1)$$

Die für die Kanalnetzelemente spezifischen Kostenfunktionen können beliebig strukturiert sein, so daß neben den Baukosten auch die Kosten für den Betrieb, die Wartung und die Instandhaltung errechnet werden können.

Die Nebenbedingungen stellen die zu berücksichtigenden ingenieur-technischen Randbedingungen, wie minimal und maximal zulässige Fließgeschwindigkeit und Einbautiefe, minimal zulässige Überdeckung für geschlossene Profile, maximal zulässiges Volumen der Speicherelemente, Freispiegelabfluß etc, dar.

Das Lösungsverfahren wird in die Layout- und die Designoptimierung –jeweils zur Ermittlung der Trassenführung und der Profile, Einbautiefen einschließlich Gefälle

der Kanäle– unterteilt, die aufeinanderfolgend durchgeführt werden. Die Layoutoptimierung wird mit Hilfe von Evolutionsstrategien vorgenommen. Zur Designoptimierung wird die Dynamische Programmierung eingesetzt. Zur Layoutoptimierung werden zufällig zulässige Konfigurationen des Kanalsystems generiert. Für ein Element (B_k) der Menge aller möglichen Netzkonfigurationen (B) wird die Designoptimierung ausgeführt, und dadurch werden die minimalen Kosten des Kanalsystems ($c_{B_k}^*$) für die vorab bestimmte Netztopologie (B_k) ermittelt. Die Minimierung der Kanalnetzkosten (s. Gleichung 1.1) läßt sich dann auch auf folgende Weise formulieren:

$$\min ZF = \min c = \min_{B_k \in B} [c_{B_k}^* (s^S, d, s^a, s^e, h^{PW}, Q^{PW}, V^{PW}, V^{RB})] \quad (1.2)$$

Die Funktionswerte $c_{B_k}^*$ sind lokale Minima der Zielfunktion. Mit der Bewertung jeder Netztopologie durch die Designoptimierung sucht das Verfahren zur Layoutoptimierung solange nach weiteren Netzkonfigurationen bis das globale Optimum oder annähernd optimale Lösungen erreicht werden.

1.3 Vorgehensweise

Im Kap. 1 werden die gegenwärtigen Methoden der Praxis zur Kanalnetzberechnung kurzgefaßt beschrieben. Unter ihnen ist noch kein Modell zum Entwurf von Kanalnetzen mit Hilfe von Optimierungsverfahren vorhanden; eine Aussage, die im Kapitel 2 eingehend dargelegt wird. Somit ist Ziel der vorliegenden Arbeit, einen Beitrag zur modelltechnischen Entwicklung in der Stadtentwässerung zu leisten.

Im Kap. 2 wird vom Stand der Entwicklung in der Praxis und Forschung berichtet. Die konventionellen Verfahren und Niederschlag-Abfluß-Modelle der Ingenieurpraxis zur Bemessung und Nachweisrechnung neuer oder bestehender Abwasserentsorgungsnetze werden erläutert. Den Stand der Forschung in der Kanalnetzoptimierung stellt eine detaillierte Literaturübersicht einschließlich einer tabellarischen Zusammenfassung dar.

Im Kap. 3 wird das entwickelte Optimierungsmodell vorgestellt. Die Entwurfsoptimierung ist als Layout- und Designoptimierung konzipiert und implementiert worden. Theoretische Inhalte der Graphentheorie, Evolutionsstrategien, der Dynamischen Programmierung und der Hydraulik werden in Bezug auf die Aufgabenstellung zu-

sammenfassend wiedergegeben. Aufbauend auf diesen Inhalten wird der Lösungsalgorithmus entwickelt und mathematisch dargestellt. Zur Layoutoptimierung werden Evolutionsstrategien und zur Designoptimierung die Dynamische Programmierung eingesetzt. Zur haltungsbezogenen Abflußberechnung wird das Saint-Venant Differentialgleichungssystem durch ein direktes implizites Differenzenverfahren gelöst. Mit der Einbindung der Design- in die Layoutoptimierung ergibt dann das gesamte Modell eine Lösungsmenge, die außer dem kostenminimalen Kanalnetzentwurf weitere kostengünstige Entwürfe enthält.

Im Kap. 4 wird das entwickelte Optimierungsmodell anhand eines Planungsbeispiels verifiziert, indem das gesamte Kanalnetz von zwei Stadtteilen der Kreisstadt Merzig neu geplant wurde. Zur Layout- einschließlich Designoptimierung des Kanalsystems wurden sechs Rechenvarianten des Gesamtmodells untersucht und im Detail besprochen. Die beste gefundene Lösung, der optimale Kanalnetzentwurf, wurde mit einem für dieselben Belastungsabflüsse mit Hilfe eines Simulationsmodells berechneten vorliegenden Vorschlag zur Redimensionierung des bestehenden Netzes verglichen. Das Modellkonzept wird bestätigt. Die Optimierung erreicht eine bessere Lösung.

Im Kap. 5 sind die Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit und ein Ausblick auf die mögliche Weiterentwicklung des Modells enthalten.

2 Stand der Entwicklung

2.1 Kanalnetzberechnungsverfahren der Praxis

Die Kanalnetzberechnung, sowohl die Bemessung von Entwässerungsnetzen als auch die Berechnung von Sanierungsvarianten, greift auf vereinfachende Ansätze zurück oder wird mit Hilfe von Simulationsmodellen ausgeführt. Zunächst genügte die Summation des Trockenwetterabflusses, und die Kanalquerschnitte wurden nach dem stationären Maximalabfluß bemessen. Mit der Hinzunahme des zeitvarianten Niederschlagsabflusses im Mischverfahren wurden die konventionellen Verfahren –auch als „Fließzeitverfahren“, „herkömmliche“ oder „einfache“ Verfahren bekannt– entwickelt. In der Praxis werden sie auch heute noch zur Dimensionierung neuer Entwässerungsnet-

ze eingesetzt. Im Laufe der Jahre wurden genauere Methoden, insbesondere zur Nachrechnung der bestehenden Systeme, erforderlich. Neue Methoden sind die Niederschlag-Abfluß-Modelle (N-A-Modelle), auch als „Verfahren mit Abflußganglinien“ bekannt. Es wird zwischen den hydrologischen und hydrodynamischen N-A-Modellen differenziert. Im Unterschied zu diesen Simulationsmodellen beschränken sich konventionelle Verfahren auf die Berechnung von Maximalabflußwerten. Sie werden „Fließzeitverfahren“ genannt, da die maßgebende Regendauer in Abhängigkeit von der Fließzeit im Kanalnetz angesetzt wird. Dazu zählen: Zeitbeiwertverfahren (*rational method*), Zeitabflußfaktorverfahren, Summenlinienverfahren und Flutplanverfahren. Mit diesen Verfahren wird die Retention, die Speicherwirkung des Netzes, nicht berücksichtigt. Dadurch kann eine Überdimensionierung der Querschnitte, die für Reserven in den Kanalsystemen sorgen kann, resultieren, insbesondere bei großen und flachen Kanalnetzen. Niederschlags-Vorbelastungen werden mit den Fließzeitverfahren auch nicht berücksichtigt. Daher war allgemein der bisherige Schwerpunkt modelltheoretischer Untersuchungen die Berechnung des instationären, ungleichförmigen Abflußvorgangs im Kanalnetz (Engel [30], Price [76], Sevük [91], Yen [110]), denn die Simulation der zeitlichen und räumlichen Abflußüberlagerungen wird zum Nachweis der hydraulischen Leistungsfähigkeit neuer oder bestehender Kanalnetze (ATV-A 118 [6], Fuchs [34], Fuchs u. Verworn [35]) sowie zur Schmutzfrachtberechnung (Schmitt [85, 87]) und Kanalnetzsteuerung (Rohlfing [81], Schilling [84]) eingesetzt. Eine Vielzahl von Simulationsmodellen wurde entwickelt, die sich grundsätzlich wenig voneinander unterscheiden und die als Ausgangsgleichungen die Saint-Venant Differentialgleichungen verwenden. Es sind hydrodynamische Modelle, wie z. B. MOUSE [27] und SWMM (*Storm Water Management Model*) [50, 80]. In Deutschland etablierte sich damit die Simulation mit Hilfe von hydrodynamischen Modellen als ein Verfahren nach den „allgemein anerkannten Regeln der Technik“ (a.a.R.d.T.) (ATV-A 118 [6], ATV-M 165 [9], Verworn [99]).

Zwei Simulationsmodelle, ISS (*Illinois Storm Sewer System Simulation Model*) und das o. a. SWMM hatten in einer frühen Version die Option zur Berechnung der Kanalquerschnitte für vorgegebene Bemessungsabflüsse, wofür sie aber die Sohlentiefen und dadurch die Sohlgefälle der Kanäle als Eingabedaten benötigten (Sevük et al. [92],

Yen u. Sevük [112]). Daher und wie oben beschrieben, erfolgt dann die Ermittlung von Profilquerschnitten, Verlegungstiefen einschließlich der Gefälle der Kanäle eines Entwässerungsnetzes –für eine vorgegebene Netztopologie– weiterhin mittels Schätzverfahren. Für kleine Entwässerungsnetze ist die Dimensionierung mit Hilfe von Fließzeitverfahren und Blockregen ausreichend, während bei großen Netzen die Dimensionierung durch eine Nachweisführung abzusichern ist, ggf. wird sie solange korrigiert, bis die geforderten Nachweisgrößen im gesamten Entwässerungssystem eingehalten werden. Ein absoluter Schutz vor Überflutungen kann nicht gewährleistet werden, daher werden Zielgrößen, um einen gewissen Entwässerungskomfort zu sichern, definiert.

Von der Europäischen Norm DIN EN 752–2 [28] wird die Überflutungshäufigkeit als Maß für den Überflutungsschutz von Entwässerungssystemen vorgegeben. Für die Bemessung von Entwässerungsnetzen ohne Nachweisrechnung gibt die DIN EN 752–2 Häufigkeiten von Bemessungsregen an, die für die Anwendung von Fließzeitverfahren gelten. Dabei dürfen die ermittelten Maximalabflüsse das jeweilige Abflußvermögen der gewählten Kanalprofile bei Vollfüllung nicht überschreiten. Für die Bemessung von Entwässerungssystemen mit Nachweisrechnung und allgemein bei der Anwendung von Simulationsmodellen empfiehlt die DIN EN 752–2, das Maß des Überflutungsschutzes über die Vorgabe zulässiger Überflutungshäufigkeiten festzulegen. In Deutschland wird eine Überflutung mit auftretenden Schädigungen und/oder Funktionsstörungen in Verbindung gebracht, so daß der Vorgang der Überflutung als von lokalen Verhältnissen stark abhängig betrachtet wird. Daher ist für die Nachweisrechnung von Entwässerungsnetzen die Überstauhäufigkeit als weitere Zielgröße (ATV-A 118 [6], Schmitt u. Thomas [88], Sieker [93]) eingeführt worden. Als Überstau wird das Überschreiten eines festgelegten Bezugsniveaus –i. d. R. die Geländeoberkante– durch die errechneten Wasserstände definiert.

Die Nachweisrechnung neuer oder bestehender Entwässerungssysteme sollte dann der Norm entsprechend, wie im folgenden beschrieben (n. Sieker [93]), erfolgen. Sie beginnt unter Vorgabe der Niederschlagsbelastung mit der Überrechnung des Kanalnetzes. Es sei denn die Daten liegen als Bestandsdaten vorhandener Netze vor oder werden über eine Vordimensionierung mittels Fließzeitverfahren ermittelt. Es wird überprüft, ob für jeden Schacht des Netzes die Bedingung: Errechnete Überstauhäufigkeit ($n(\ddot{u})_{vorh}$)

kleiner gleich der zulässigen Überstauhäufigkeit ($n(\ddot{u})_{zul}$), eingehalten wird. Zur Überprüfung, ob das Netz als Ganzes oder in Teilen überdimensioniert ist, kann die Bedingung: $(n(\ddot{u})_{zul})/2 \leq n(\ddot{u})_{vorh} \leq n(\ddot{u})_{zul}$ angewendet werden. Wird diese Bedingung bei allen Schächten des Kanalnetzes erfüllt, dann ist die Nachweisrechnung beendet. Das kommt in der Praxis selten vor. In der Regel wird bei der ersten Überrechnung, die als „Nachweis des Ist-Zustandes“ bekannt ist, eine Unter- oder Überdimensionierung einzelner Netzteile festzustellen sein. Danach erfolgt eine „Optimierung des Netzes“, um die Erfüllung der Überstaubedingungen im gesamten Netz zu garantieren. Unter der „Optimierung des Netzes“ wird ein iterativer Prozeß verstanden. In diesem Prozeß werden Veränderungen an einzelnen Netzteilen vorgenommen, deren Auswirkungen jeweils auf das hydraulische Verhalten des gesamten Netzes durch eine hydrodynamische Abflußsimulation nachzuweisen sind. Wieviele Iterationen erforderlich sind, hängt von der Komplexität des Netzes sowie der Erfahrung des planenden Ingenieurs ab.

In der Praxis werden daraus folgend Verfahren zur Kanalnetzdimensionierung verwendet, die auf Iterationsverfahren gründen. Wird die Trassenführung nicht vorgegeben, dann erfolgt die Auswahl der Netztopologie in der Regel aufgrund von Geländegegebenheiten, des Straßenrasters sowie der individuellen Erfahrung. Dabei wird der Einfluß der in einem Kanalabschnitt gewählten Gefälle, Profil und Einbautiefen auf die Auslegung des gesamten Systems nicht berücksichtigt. Die gegenwärtigen Verfahren beinhalten keine Optimierungsmethoden, die eine systemanalytische Ermittlung der Netzgrößen wie Profilquerschnitte, Verlegungstiefen und Sohlgefälle der Haltungen gestatten. Eine analytische Kopplung zwischen der Auswahl der Netztopologie und dem Kanalnetzdesign, die Rückkopplung ermöglichen und dadurch die Auslegung des Systems verbessern würde, besteht nicht.

2.2 Stand der Forschung

In der Forschung sind systemanalytische Ansätze zum Entwurf von Kanalsystemen seit den 1960-er Jahren zu verzeichnen. Allgemein wurde die Aufgabenstellung in die Optimierung des Layouts und des Designs unterteilt.

Zur Layoutoptimierung sind heuristische Verfahren wie Evolutionsstrategien und Genetische Algorithmen verwendet worden. Zur Designoptimierung sind Ansätze aus der

Linearen Programmierung –z. B. Dajani et al. [23], Dajani u. Hasit [24] und Elimam et al. [29]–, aus der Nichtlinearen Programmierung –Gupta et al. [39]– sowie heuristische Verfahren –Charalambous u. Elimam [20] und Miles u. Heaney [67]– eingesetzt worden. Im Laufe der Jahre haben sich Ansätze, die die Dynamische Programmierung verwenden, durchgesetzt. Diese Lösungsansätze haben folgendes gemeinsam: (i) Es werden Verästelungsnetze vorausgesetzt, (ii) die Abwassereinleitungen finden an den Knoten statt, (iii) die Restriktionen umfassen minimal u. maximal zulässige Verlegetiefe, Gefälle und Fließgeschwindigkeit, minimal zulässige Rohrüberdeckung und Entwässerung unter Gravitation. Außerdem werden in der Regel nur die Baukosten der Kanalnetzelemente berücksichtigt. Es folgt eine Literaturübersicht von Beiträgen zur Entwurfsoptimierung von Abwasserentsorgungsnetzen.

Liebmann [60] stellt ein heuristisches Hilfsverfahren zur Auswahl kostengünstiger Layouts von Abwasserentsorgungsnetzen dar. Aus einem vermaschten Beispielnetz von 18 Knoten und 24 Haltungen ohne vordefinierte Fließrichtung sind Verästelungsnetze zu bestimmen. Vorgegeben sind die Standorte und Geländehöhen der Knoten, die Haltungenlängen sowie minimales Sohlengefälle und minimale Sohlentiefe. Die Kosten werden in Abhängigkeit des Aushubvolumens formuliert. Der Algorithmus durchläuft folgende Schritte: (1) Ein zulässiges Netzlayout definieren, (2) nach einer Haltung suchen, die im vordefinierten Netzlayout nicht enthalten ist, und bestimmen, welche Haltung im Netzlayout durch diese ersetzt werden kann, (3) die Haltung wechseln, (4) die Kosten des neu entstandenen Layouts errechnen, und sie mit denen des vorigen Layouts vergleichen, (5) wird eine Verbesserung festgestellt, dann ersetzt das neue Layout das vorherige. Dann beginnt der Algorithmus erneut seine Suche nach einer Haltung (ab Schritt 2). Das Verfahren wird abgebrochen, wenn jeder weitere mögliche Wechsel keine verbesserte Lösung hervorbringt. Die Hydraulik des Kanalsystems wird nicht berücksichtigt. Alle Kanäle erhalten den gleichen Durchmesser. Zusammenfassend besteht dieses heuristische Verfahren aus zwei Teilen: (i) Erzeugung eines neuen Netzlayouts durch den Wechsel einer Haltung und (ii) Bewertung des neu entstandenen Netzlayouts. Das Verfahren wurde mit unterschiedlichen Anfangslösungen getestet. In den meisten Fällen wurde die gleiche Lösung erreicht. Dennoch kann das Verfahren nicht garantieren, die optimale Lösung gefunden zu haben.

Walsh u. Brown [101] stellen ein Verfahren zum optimalen Design von Kanalisationen dar. Dabei sind die Netztopologie und die Bemessungsabflüsse vorgegeben. Unter Beachtung der Restriktionen wird für jede Haltung des Kanalsystems eine Region zulässiger Lösungen (*region of feasible solutions*) definiert. Die Aufgabe wird als ein sequentieller Entscheidungsprozeß mittels der Dynamischen Programmierung (DP) gelöst. Der Lösungsansatz baut auf dem von Haith [42] auf. Das Verfahren besteht aus zwei Bausteinen: (i) ROFS (*Region of Feasible Solutions*) und (ii) OVACS (*Optimal Vertical Alinement of Collection System*). Für jede Haltung stellt ihre minimale Sohlenhöhe (*the Lowest Critical Elevation (LCE)*) einen Punkt der oberen Grenzlinie (*Upper Boundary (UB)*) der Region zulässiger Lösungen dar. Jede der nächstfolgenden zulässigen Sohlenhöhen kann mit der LCE eine UB definieren. Die Gerade mit der geringsten Steigung wird als die UB definiert. Die kleinste Sohlenhöhe am Haltungsanfang und das maximal zulässige Sohlengefälle definieren die untere Grenzlinie (*Lower Boundary (LB)*) der Region. Der Lösungsalgorithmus führt folgende Schritte aus: (1) Abgrenzung der Region zulässiger Lösungen, (2) Diskretisierung der Sohlenhöhen entlang der durch die LCE vertikal durchgehenden Achse, (3) von einer aus Schritt 2 resultierenden Sohlenhöhe werden Gefälle zum Haltungsanfang und -ende projiziert, (4) für ein Gefälle aus Schritt 3 wird auf das kleinstmögliche Profil zur Ableitung des Abflusses aufgerundet, und die Kosten der Haltung werden errechnet, (5) die Kosten der Haltung werden zu den Kosten des Netzteils bis zum Haltungsanfang addiert, (6) für jedes der Gefälle aus Schritt 3, Schritte 4 und 5 wiederholen, und dann aus den resultierenden Lösungen die mit den geringsten Kosten speichern, (7) für jede der Sohlenhöhen aus Schritt 2, Schritte 3 bis 6 wiederholen, (8) für jede Haltung der Kanalisation Schritte 1 bis 7 wiederholen. Das Verfahren ermittelt am Systemende eine Reihe kostengünstiger Lösungen, darunter die kostenminimale Lösung. Das Verfahren wurde an zwei Verästelungsnetzen getestet, einem 12-Kanten-Netz und einem 101-Kanten-Netz. Im Vergleich zu konventionellen Verfahren stellten die Autoren Verbesserungen der Kosten zwischen 6,1% und 7,1% fest.

Mays u. Yen [65] verwenden die Dynamische Programmierung (DP) und die Differentielle Diskrete Dynamische Programmierung (DDDP) als Ansätze zur Bestimmung kostenminimaler Profile und Verlegungstiefen der Kanäle eines Ent-

wässerungssysteme. Die Topographie des Einzugsgebiets, die Netztopologie und die Bemessungsabflüsse sind gegeben. Die Hydraulik im Kanalnetz wird nicht nachgebildet. Im Fall eines seriellen Kanalsystems (*serial sewer system*), in dem ein Knoten oder Schacht nur zwei Haltungen miteinander verknüpft, wird die Stufe-für-Stufe Vorgehensweise der DP wie folgt implementiert: (1) Am Haltungsende die erste Scheitelhöhe (*crown elevation*) j gleich dem maximal zulässigen Wert setzen, (2) am Haltungsanfang den Bereich der zulässigen Scheitelhöhen diskretisieren, (3) das Gefälle zwischen der Scheitelhöhe j am Haltungsende und einer der Scheitelhöhen k am Haltungsanfang bestimmen, und auf das kleinstmögliche Profil zur Abflußableitung aufrunden, (4) die Kosten dieser Haltung berechnen, (5) Schritte 3 bis 4 für jede der Scheitelhöhen k am Haltungsanfang wiederholen, dann die beste Lösung davon speichern, (6) weiter mit der nächsten Scheitelhöhe j am Haltungsende, Schritte 3 bis 5 wiederholen, (7) für jede Haltung im Kanalnetz Schritte 1 bis 6 wiederholen. Im Fall eines verästelten Kanalsystems (*branched sewer system*) wird das Kanalnetz zunächst in serielle Untersysteme (*serial subsystems*) zerlegt, um auf jedes dieser Untersysteme den für ein serielles Kanalsystem o. a. DP-Algorithmus anwenden zu können. Um Rechenzeit und Speicherbedarf der DP zu reduzieren, verwenden die Autoren die DDDP. Die DDDP wird von Heidari et al. [44] als ein iteratives Verfahren definiert, das die Rekursionsgleichung der DP einsetzt, um einen verbesserten Pfad (*improved trajectory*) unter den diskreten Systemzuständen in einem Korridor (*corridor*) um einen Versuchspfad (*trial trajectory*) zu finden. Eine Iteration besteht darin, einen Korridor um einen Versuchspfad zu bilden, die DP im Korridor anzuwenden, und den verbesserten Pfad als Versuchspfad der nächsten Iteration zu übernehmen. Der Bereich innerhalb des Korridors wird nach der Größe Δs diskretisiert. Die resultierenden Scheitelhöhen werden auch *lattice points* genannt. Es wird solange iteriert bis keine weitere Verbesserung der Zielfunktion (der Kosten) erreicht wird. Dann wird die Größe Δs verkleinert, so daß der Korridor um den Versuchspfad enger und feiner diskretisiert wird. Der Ablauf wiederholt sich bis keine weiter verbesserte Lösung gefunden wird, oder Δs ein Minimum erreicht. Zum Vergleich wurden die Lösungsverfahren nach der DP und nach der DDDP an einem Beispielnetz von 21 Knoten und 20 Haltungen getestet, im Fall der DDDP mit unterschiedlicher Diskretisierung des Korridors. Die besten Lösungen beider Verfahren unterschieden sich

weniger als 1,0% voneinander. Der wesentliche Unterschied lag in der Rechenzeit. Die DDDP brauchte weniger als 30,0% der Rechenzeit der DP. An diesem Beispiel konnten die Autoren keinen großen Unterschied in Bezug auf die Speicherbelegung feststellen. Dennoch ist zu erwarten, daß die DDDP weniger Speicher als die DP beansprucht. Außerdem machen die Autoren folgende Bemerkungen: (i) Wenn die DP mit diskreten Variablen (wie z. B. den Scheitelhöhen einer Haltung) verwendet wird, dann kann das Optimum nur annähernd erreicht werden, mit einer feineren Diskretisierung kann eine bessere Lösung erzielt werden (Heidari [43]), und (ii) die DDDP kann zu einem lokalen Optimum konvergieren (Heidari [44]).

Mays u. Wenzel [63] vergleichen zwei Ansätze zum optimalen Design von mehrstufigen verästelten Kanalsystemen (*multilevel branching sewer systems*). Als Optimierungsmethode verwenden beide Ansätze die Differentielle Diskrete Dynamische Programmierung (DDDP). Im ersten Ansatz wird das Kanalnetzdesign als eine nicht-serielle Optimierungsaufgabe (*nonserial optimization problem*) behandelt, d. h. das mehrstufige verästelte Kanalsystem wird vor Anwendung der DDDP in serielle Untersysteme zerlegt. Dieser Ansatz ist von Mays u. Yen [65] dokumentiert worden. Im zweiten Ansatz wird das Kanalnetzdesign als eine serielle Optimierungsaufgabe (*serial optimization problem*) behandelt, d. h. das Kanalsystem wird vor Anwendung der DDDP durch imaginäre Linien aufgegliedert. Der wesentliche Unterschied zwischen dem nicht-seriellen und dem seriellen Ansatz liegt darin, wie die Stufen im Optimierungsvorgang definiert werden. Im nicht-seriellen Ansatz wird ein Schacht oder eine Haltung als eine Stufe modelliert. Im seriellen Ansatz kann eine Stufe aus mehreren Haltungen einschließlich Schacht am Haltungsanfang bestehen. Der serielle Ansatz führt den Begriff „Iso-Knoten-Linien“ (*isonodal lines*) ein. Diese imaginären Linien werden dadurch definiert, daß sie Knoten verbinden, die von der Senke gleich entfernt sind, d. h. jeder Knoten auf einer Iso-Knoten-Linie (IKL) wird durch genauso viele Haltungen von der Senke getrennt. Argaman et al. [3] haben diese Linien *drainage lines* genannt. Im seriellen Ansatz zerlegen die IKL das Kanalsystem in Stufen. Die DDDP wird dann für jede Haltung einer Stufe ausgeführt, bevor der Algorithmus zur nächsten Stufe übergeht. Wenn die letzte Stufe des Systems erreicht wird, dann wird der Pfad der besten Lösung rückwärtsgehend stufenweise verfolgt. Dieser verbesserte Pfad wird dann der

Versuchspfad der nächsten Iteration im DDDP-Ablauf. Das Iterationsverfahren wird beendet, wenn es sich keine weitere Verbesserung der Lösungen ergibt, oder wenn das Diskretisierungsintervall Δs innerhalb des Korridors ein Minimum erreicht. Die zwei Lösungsalgorithmen wurden anhand eines Beispiels verglichen. Das Beispielnetz bestand aus 21 Schächten und 20 Haltungen. Das Netzlayout, die Geländetopographie und die Bemessungsabflüsse waren gegeben. Das Design nach dem seriellen Ansatz wurde um 0,4% kostengünstiger als der nach dem nicht-seriellen Ansatz. In Bezug auf die Rechenzeit und den Speicherbedarf waren auch keine eindeutigen Vorteile eines Verfahrens gegenüber dem anderen festzustellen. Das führten die Autoren auf die Größe und Struktur des Beispielnetzes zurück, denn für größere Netze mit einem hohen Grad an mehrstufiger Verästelung ist zu erwarten, daß der serielle Ansatz Vorteile aufweist. Modelltechnisch erwies sich ein eindeutiger Vorteil des seriellen Ansatzes: Der Lösungsalgorithmus konnte einfacher programmiert werden, das Kanalnetz konnte übersichtlicher erfaßt und dadurch leichter behandelt werden.

Mays et al. [64] gliedern die Kostenoptimierung eines Entwässerungssystems in zwei Teile: (i) Die Optimierung des Systemlayouts, und (ii) für ein vorgegebenes Netzlayout die Optimierung der Parameter, die das Design der Kanäle bestimmen (Scheitelhöhen, Gefälle, Durchmesser und Sohlentiefen der Schächte). Dieses heuristische Modell besteht aus zwei miteinander verknüpften Phasen: (i) Kombiniertes Layout- und Design (LDOSS1) und (ii) Design für ein vorgegebenes Layout (LDOSS2). LDOSS1 ist ein Verfahren, das die Wahl des Systemlayouts und die Bemessung der Kanäle umfaßt. Auf jeder Stufe des Optimierungsvorgangs wird mittels eines Modells für Verknüpfungen (*connectivity model*) eine Netzkonfiguration aus den für diese Stufe möglichen Konfigurationen selektiert. LDOSS2 wird zur Bestimmung des optimalen Designs des aus LDOSS1 erhaltenen Layouts eingesetzt. Da die Netztopologie noch festzulegen ist, werden die Iso-Knoten-Linien (IKL) derart gelegt, daß sie Knoten mit ähnlichen Geländehöhen miteinander verbinden. Der Standort der Senke ist frei wählbar. Durch die IKL wird das Kanalsystem in Stufen zerlegt. Jeder Knoten auf der IKL n kann mit einem oder mehreren Knoten auf der IKL $(n + 1)$ verbunden werden. Beginnend am Systemanfang wird die Differentielle Diskrete Dynamische Programmierung (DDDP) (Mays u. Yen [65]) auf jeder Stufe für jede mögliche Verbindung (Haltung) zwischen

den Knoten zwei aufeinanderfolgender IKL verwendet. Für jede der Scheitelhöhen am Haltungsende innerhalb des Korridors wird die zugehörige beste Lösung gespeichert. Der Prozeß geht stufenweise stromabwärts vor bis das Systemende erreicht wird. Nachdem die DDDP für jede mögliche Verbindung (Haltung) zwischen der IKL n und IKL $(n + 1)$ durchlaufen ist, soll das beste Layout für diese Stufe bestimmt werden. Es ist nicht möglich die zulässigen Verbindungen zwischen zwei aufeinanderfolgenden IKL in den DDDP-Prozeß als zweite Entscheidungsvariable einzubinden, denn die Abflußwerte für die stromabwärts liegenden Haltungen können nicht bestimmt werden, solange die Verknüpfungen auf der stromaufwärts liegenden Stufe nicht festgelegt worden sind. Dennoch, um die Verknüpfungen mittels der DDDP zu bestimmen, müßte der Algorithmus zunächst das gesamte System durchlaufen. Daher verwenden die Autoren in diesem Abschnitt des Verfahrens ein Modell für Verknüpfungen (s. o.), das die Layoutoptimierung als eine Aufgabe der 0–1–Ganzzahligen Programmierung (*0–1 integer linear programming (ILP)*) löst. Dieser Modellansatz berücksichtigt jeweils zwei aufeinanderfolgende Stufen des Systems und ermittelt das beste Layout für die erste dieser Stufen. Das gesamte Modell besteht aus folgenden Schritten: (1) LDOSS1 führt eine erste Iteration aus, das ergibt ein Layout und Design für den anfangs angenommenen Versuchspfad, Layout und Design werden für den Fall gespeichert, daß das Layout sich danach ändert, (2) LDOSS1 führt eine zweite Iteration mit dem verbesserten Pfad der ersten Iteration als Versuchspfad aus, (3) die Layouts werden miteinander verglichen, (4) sind die Layouts gleich, dann führt LDOSS1 eine weitere Iteration mit dem verbesserten Pfad aus der vorhergehenden Iteration als Versuchspfad aus, solange bis ein neues Layout erhalten wird, (5) unterscheiden sich die Layouts voneinander, dann werden das neu erhaltene Layout und das zugehörige Design gespeichert, und das Modell schaltet auf LDOSS2 um, um für das vorherige Layout das kostenminimale Design mittels der DDDP zu bestimmen, dieses optimale Design wird gespeichert, um es abschließend mit den anderen Lösungsdesigns zu vergleichen; darauf schaltet das Modell auf LDOSS1 zurück, ausgehend vom verbesserten Pfad der in Schritt 5 gespeicherten Lösung führt LDOSS1 eine weitere Iteration aus. Der Prozeß wiederholt sich ab Schritt 3 bis das minimale Diskretisierungsintervall Δs im Korridor erreicht wird. Wird das minimale Δs im LDOSS1 erreicht, dann ist zu überprüfen, ob das Netzlayout sich in-

nerhalb der letzten 3 Iterationen verändert hat. Liegt keine Veränderung vor, dann wird der Rechenvorgang beendet. Liegt eine Veränderung vor, dann ist zu überprüfen, ob LDOSS2 auch für das letzterzeugte Layout ausgeführt worden ist, bevor der Rechenvorgang beendet wird. Hinsichtlich der Optimalität der Lösung bemerken die Autoren: (i) Weil die DDDP als Optimierungsmethode verwendet wird, kann das globale Optimum nicht garantiert werden, (ii) im Modell für Verknüpfungen (s. o.) werden jeweils zwei aufeinanderfolgende Stufen berücksichtigt, daher kann nicht garantiert werden, daß das ermittelte Layout optimal für das gesamte Kanalsystem ist, (iii) die Wahl der IKL, den Geländehöhen der Knoten folgend, schließt andere mögliche Netztopologien aus, (iv) die Hydraulik des Systems wird auf stationäre Abflüsse vereinfacht, eine hydrologische oder hydrodynamische Abflußberechnung in den Kanälen könnte bessere Lösungen erzielen.

Orth [71] beschreibt die Anwendung der Dynamischen Programmierung an einem Beispiel zur Höhenoptimierung eines Hauptentwässerungskanals, die die Ermittlung der Gefälle und Durchmesser der Leitung sowie die Abstände von Pumpwerken umfaßt. Vorgegeben sind die Leitungstrasse, der Durchfluß und mögliche Standorte für Pumpwerke. In jedem Leitungsabschnitt wird für jeden zur Verfügung stehenden Durchmesser das Gefälle bestimmt. Pumpwerke werden unter der Annahme einer konstanten Förderhöhe in die Rechnung einbezogen. Zugleich werden die Leitungsabschnitte auch so weitergeführt, als wären keine Pumpwerke vorhanden. Das Verfahren beginnt am Ende des ersten Leitungsabschnitts, wo in Kästchen die Kosten der zu ihnen führenden Abschnitte eingetragen werden. Am Ende des zweiten Abschnitts ergeben sich die Kosten bis zu diesen Kästchen einschließlich der Kosten am Abschnittsanfang. Das Aufaddieren der Kosten wird abschnittsweise bis zum Kanalende ausgeführt. Ein Kästchen kann über verschiedene Wege erreicht werden, nur derjenige mit den niedrigsten Kosten wird weiterverfolgt. Am Kanalende resultieren die minimalen Kosten und rückwärtsgehend kann der Lösungsweg wiedergewonnen werden.

Froise u. Burges [33] verwenden die Dynamische Programmierung (DP) zum kostenminimalen Design von Entwässerungssystemen, die auch Speicherelemente an den Netzknoten enthalten können. Das Netzlayout, zeitvariante Abflußbelastungen, Standorte und Geländehöhen der Knoten sowie die Fließrichtung der Haltungen sind vorgege-

ben. Kommerzielle Kreisprofile werden berücksichtigt. Die Kostenfunktionen für die Kanäle sowie für die Speichervolumina werden der Literatur entnommen. Entscheidungsvariablen sind die Profile und Abflüsse (an den Knoten mit Speichervolumina). Zustandsvariablen sind die Abflußwellen, die Speichervolumina und die Sohlenhöhen der Haltungen. Jede Haltung wird als eine Stufe betrachtet. Auf jeder Stufe werden folgende Schritte ausgeführt: (1) Am Haltungsanfang wird der Bereich der zulässigen Sohlenhöhen diskretisiert, (2) für jede Sohlenhöhe aus Schritt 1 wird die anfallende Zuflußreihe an diesem Knoten mit den ggf. aus anderen Haltungen herkommenden Abflüssen überlagert, (3) der maximale Abflußwert dieser Welle wird diskretisiert, dadurch werden jeweils zwei Abflußvolumina bestimmt, ein Volumen wird dem Netz zugeführt, das andere wird gespeichert, (4) mit jedem Abflußwert aus Schritt 3 werden für jedes verfügbare Profil das Gefälle des Kanals und die Sohlenhöhen am Haltungsende unter Einhaltung der Restriktionen bestimmt, (5) die Kosten für die gefundenen Lösungen werden errechnet, (6) am Haltungsende wird der Bereich der aus Schritt 4 resultierenden Sohlenhöhen diskretisiert, und von jedem Diskretisierungsintervall wird die Lösung mit den niedrigsten Kosten ausgewählt, (7) für jede dieser Lösungen wird die Abflußganglinie am Haltungsende berechnet. Dieser Vorgang wiederholt sich bis zum Systemende. Das Modul zur Abflußberechnung besteht aus dem Design- und dem Simulationsteil. Der Designteil gehört zum Optimierungsvorgang, wobei das Gefälle für den Bemessungsabfluß und den gewählten Profilquerschnitt unter der Annahme des Normalabflusses bestimmt wird. Der Simulationsteil berechnet die Abflußtransformation im Kanal, indem die Kontinuitäts- und die Bewegungsgleichung für die eindimensionale Strömung gelöst werden. Alternativ wird der Abfluß nach dem kinematischen Wellenansatz berechnet. Die Autoren verwenden diesen Ansatz für Gefälle größer als 0,0005 und für Durchmesser kleiner als 1,22m (4ft), da diese die Kosten nicht wesentlich beeinflussen. Rechnungen wurden an einem Beispielnetz mit 7 Knoten und 6 Kanten ausgeführt. Das Netz wurde jeweils mit den gleichen Zuflußwellen an den einzelnen Knoten berechnet: Mit Zuflußwellen gleichen Maximalabflußwerts und verschiedener Volumina sowie mit Zuflußwellen gleichen Volumens und unterschiedlicher Maximalabflußwerte. Mit gleichen Wellenvolumina werden die Kosten geringer, wenn der Maximalabflußwert kleiner wird. Im Fall gleichen Maximalabflußwerts und un-

terschiedlicher Wellenvolumina sind die Kosten von Netzen mit Speicherelementen an den Knoten um 12,0% kleiner als die ohne Speicherung. Die Autoren bemerken, daß im Vergleich zu konventionellen Verfahren der vorgelegte Lösungsansatz die Kosten um 30,0% reduzieren könnte, aufgrund der Speichervolumina im Netz, der optimalen Profile und der verwendeten hydraulischen Abflußberechnung.

Cembrowicz u. Krauter [17] entwickeln ein mathematisches Modell, das kostenoptimales Layout und Design eines Systems von Hauptsammlern bei stationärer Belastung unter Einhaltung von Nebenbedingungen ermittelt. Einem Element (B_k) der Menge aller möglichen Baumkonfigurationen (B) für ein Kanalnetz kann über die Designoptimierung eine Bewertung $c_k = f(B_k)$ zugeordnet werden, die die Kosten des optimalen Designs für (B_k) darstellt. Die Ermittlung der optimalen Trassenführung wird dann wie folgt formuliert: $\min_{B_k \in B}(c_k)$, dafür setzen die Autoren Evolutionsstrategien mit den Mechanismen der Mutation, Rekombination und Selektion ein. Ein Layout B_k wird vektoriell beschrieben, dabei entspricht jede Komponente e_i^k derjenigen Kante, die den Knoten i entsorgt. Stehen mehrere Kanten zur Entsorgung eines Knotens zur Verfügung, dann kommt durch zufällige Auswahl einer Kante eine Mutation, d. h. ein neues Layout B'_k aus B_k , zustande. Die Anzahl der Knoten, an denen Kanten zu wechseln sind, wird mittels einer exponentiellen Dichtefunktion mit dem Mittelwert μ bestimmt. Die zu mutierenden Knoten werden mit gleicher Wahrscheinlichkeit ausgewählt. Die neuen Kanten an diesen Knoten werden ebenfalls mit gleicher Wahrscheinlichkeit aus der Menge der abgehenden Kanten ausgewählt. Der Rekombination dienen zwei Layoutvektoren als Eltern, und davon wird mit gleicher Wahrscheinlichkeit ein Vektor als Basislösung gewählt. Mit der Wahrscheinlichkeit p ($p \ll 1$) verbleibt jede Kante e_i in der Basislösung. Die Auswahl der Eltern wird auch nach einer exponentiellen Dichtefunktion vorgenommen. Jede neu resultierende Lösung wird der Population von n_p Lösungen zugefügt. Die Selektion erfolgt, indem von den $(n_p + 1)$ Lösungen diejenige Lösung eliminiert wird, deren Zielfunktionswert die anderen Lösungen dominieren („dominieren“, hier mit der Bedeutung: Nach vordefinierten Kriterien vergleichsweise „besser sein“). Die Mutationsschrittweite wird mittels der „1/5-Erfolgsregel“ von Rechenberg [78] gesteuert. Die Autoren verkleinern μ und p , wenn im Durchschnitt von r Mutationen weniger als $r/5$ zu Verbesserun-

gen führen und vergrößern sie, wenn mehr als $r/5$ Mutationen Verbesserungen liefern. Der Algorithmus enthält folgende Schritte: (1) Zufallswahl einer Population von n_p zulässigen Layoutvektoren und Berechnung der zugehörigen Zielfunktionswerte mit Hilfe der Designoptimierung, (2) Bestimmung einer neuen Lösungsgeneration: Zufallswahl von zwei Eltern, Mutation der Eltern, Rekombination der Eltern, Überprüfung der Zulässigkeit und Berechnung des Zielfunktionswertes der neuen Lösung durch die Designoptimierung, Einfügen der neuen Lösung in der Population, Elimination der in der Population dominierten Lösung, (3) Modifikation von μ und p nach der „1/5-Erfolgsregel“, (4) Wiederholung ab Schritt 2. Das Verfahren wird abgebrochen, wenn die Zielfunktionswerte auf ein vorgegebenes Maß konvergieren oder in einer festgelegten Anzahl von Populationen keine Verbesserung mehr erreicht wird. Zur Designoptimierung, d. h. Bestimmung der optimalen Profile und Verlegungstiefen der Kanäle, wird die Dynamische Programmierung verwendet. Das Kanalsystem wird durch Iso-Knotenlinien in Stufen aufgegliedert. Der Bereich der zulässigen Sohlenhöhen wird in Intervalle sowohl am Haltungsanfang als auch am Haltungsende unterteilt. Ausgehend von der maximal zulässigen Sohlenhöhe am Haltungsanfang werden nacheinander für die zur Verfügung stehenden Durchmesser Sohlenhöhen und Zielfunktionswerte (Kosten) am Haltungsende bestimmt. Fallen zwei Lösungen in ein Intervall zusammen, dann wird die Lösung mit den höheren Kosten eliminiert. Ferner wird die Lösung eliminiert, die durch eine andere Lösung mit geringerer Sohlentiefe und niedrigeren Kosten dominiert ist. Hat eine Kante mehr als eine Vorgängerkante, dann werden die Verlegungshöhen der Kante aus denen der Vorgängerkanten abgeleitet. Diese Prozedur wird strangabwärts bis zum Systemende fortgeführt. Zur Verifikation des Modells wurde die Schmutzwasserkanalisation eines Stadtteils von Karlsruhe (ca. 42 km) berechnet. Auf der Grundlage des bestehenden Netzes wurde ein Systemgraph zur Optimierung entwickelt. Der Rechenvorgang wurde nach 490 Generationen beendet. Allgemein ergab ein Vergleich der Lösung mit dem bestehenden Netz eine Reduzierung der Durchmesser im Hauptsammler, was einen wirtschaftlicheren Entwurf bedeutet.

Walters [102] stellt eine Methode zur Ermittlung des optimalen Layouts eines Kanalnetzes dar, das eine gegebene Anzahl von Abwassererzeugern miteinander verknüpfen soll. Das Kanalnetz ist unter Einhaltung der Restriktionen als ein aus Freispiegel-

kanälen bestehendes Verästelungsnetz zu gestalten, indem die Abwassererzeuger an den Hauptsammler anzuschließen sind. Diese Methode zur Layoutoptimierung ist darauf beschränkt, daß jeder Ort, von dem aus das Abwasser abzuleiten ist, durch einen einzigen Kanal an den Sammler zu verbinden ist, und daß diese Abwassererzeuger nach einer vordefinierten Reihenfolge an den Sammler anzuknüpfen sind. Das Kanalnetz wird als ein serielles System (*serial system*) betrachtet, und die Dynamische Programmierung (DP) wird zur Lösung eingesetzt. Mittels Rastergitter werden die Flächen möglicher Standorte der Schächte untersucht. Für jeden Punkt eines Gitters wird die DP wie in Mays und Yen [65] angewendet. Zur Eingabe gehören auch die Koordinaten und Geländehöhen des Rastergitters sowie an den Abwassererzeugern. An einem Beispielnetz mit 4 Abwassererzeugern und einer Senke wurden die Standorte von 3 Verknüpfungsschächten sowie die Durchmesser und Gefälle der Kanäle optimiert. Im Vergleich zu einem Kanalnetz mit einem vorgegebenen Layout und minimalen Einbautiefen zeigte das Ergebnis eine Verbesserung von 13,5%. Im Vergleich zu diesem Kanalnetz aber mit optimierten Durchmessern und Gefällen der Kanäle wies das Ergebnis der Optimierung vom Layout und Design eine Verbesserung von 5,5% auf. Der Autor bemerkt, daß in der Praxis vorkommende Möglichkeiten zur Auswahl der Standorte von Schächten im Netz aufgrund der vor Ort vorhandenen Gegebenheiten, wie z. B. Straßennuster, sehr gering sind. An einem Regenableitungssystem eines Wohngebiets stellte er fest, daß die aus der Optimierung resultierenden Layouts sich wenig von Layouts, die nach Schätzverfahren aus der Praxis ermittelt wurden, unterschieden.

In einer zweiten Phase des Forschungsvorhabens erweitern Cembrowicz u. Krauter [18] das in der ersten Phase (Cembrowicz u. Krauter [17]) zur Designoptimierung entwickelte Verfahren auf instationäre Belastungen. Die Zielfunktion der Optimierungsaufgabe setzt sich aus den Kosten der Schächte und Kanäle zusammen. Die Nebenbedingungen sichern die Einhaltung der Restriktionen. Außer dem an einem Knoten anfallenden stationären Trockenwetterabfluß wird die Zeitreihe des diesem Knoten von der Oberfläche zufließenden instationären Niederschlagsabflusses gegeben, damit ergibt sich zu jedem Zeitpunkt der Abfluß am Anfang einer Haltung aus der Summe der Abflüsse aus den stromaufwärts liegenden Haltungen und der am Knoten anfallenden Belastung. Die Anwendung der Dynamischen Programmierung zur Bestimmung

optimaler Profile und Sohllentiefen des Kanalnetzes verläuft prinzipiell wie im Fall stationärer Belastung, mit dem Unterschied, daß der Zustandsraum auf den Spitzenabfluß erweitert wird, d. h. eine Lösung wird nicht nur durch die Sohllentiefe (s_j), die Kosten (c_j), sondern auch durch den maximalen Wert der Abflußreihe (Q_j^{max}) charakterisiert. Daher wird die Elimination dominierter Lösungen wie folgt ausgeführt: Eine Lösung $(s_{j,k}, Q_{j,k}^{max}, c_{j,k})$ wird eliminiert, wenn eine Lösung $(s_{j,l}, Q_{j,l}^{max}, c_{j,l})$ mit der Relation $(s_{j,k}, Q_{j,k}^{max}, c_{j,k}) > (s_{j,l}, Q_{j,l}^{max}, c_{j,l})$ existiert, was $s_{j,k} > s_{j,l}$ und $Q_{j,k}^{max} > Q_{j,l}^{max}$ und $c_{j,k} > c_{j,l}$ bedeutet. Bei Kanaleinmündungen werden alle Lösungen in einem Zustandsraum mit Lösungen der anderen zufließenden Zustandsräume kombiniert. Der Niederschlagsabfluß in Kanalisationsnetzen, der als eindimensionale, instationäre, leicht ungleichförmige Strömung angenommen werden kann, wird mathematisch durch die Saint-Venant Gleichungen berechnet. Um Rechenaufwand zu reduzieren, werden ausgehend von dem Gleichungssystem vereinfachte Ansätze untersucht: (i) Reine Translation (TRANS), (ii) kinematische Welle (KINW), (iii) vereinfacht instationär ungleichförmige Strömung (VINSTUG) und (iv) instationär ungleichförmige Strömung (INSTUG). Über die Mathematik der einzelnen Lösungsverfahren wird auf den Bericht verwiesen. Diese Verfahren wurden an einem Kanalstrang mit Kreisprofil, mit jeweils Gefällen von 0,1%, 0,2%, 0,5% und 1,0% miteinander verglichen. Die Rechnungen wurden mit drei verschiedenen Abflußreihen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, daß der Einfluß der Vereinfachungen der Saint-Venant Gleichungen sowohl auf die Form als auch auf den Maximalwert der Abflußwelle mit steigendem Gefälle und wachsender Fülle (Verhältnis vom Volumen zu Spitzenabfluß) rasch abnimmt. Der Rechenaufwand nimmt ebenfalls mit der Vereinfachung ab. Der Einfluß der vier Bausteine auf das Ergebnis der Optimierung wurde an einem Netz mit 12 Knoten und 11 Kanten untersucht (s. auch Cembrowicz u. Krauter [19]). Berücksichtigt wurden: Kreisprofile kommerzieller Durchmesser, eine vorgegebene betriebliche Rauigkeit, Kosten für die Kanäle ohne zusätzliche für die Schächte, minimale und maximale Fließgeschwindigkeiten und minimale Rohrüberdeckungen. Als Abflußbelastung wurden die o. a. Wellen angenommen. Der Zufluß wurde simultan an neun Knoten des Systems eingeleitet. Für jeden Belastungsfall wurden Rechnungen mit den vier Bausteinen, jeweils für vier Geländeneigungen, durchgeführt. Die größte Kostendifferenz ergab sich zwischen den

Bausteinen TRANS und INSTUG für die Welle kleinster Fülle und flaches Gelände (15,5% bezogen auf TRANS). Überraschende Ergebnisse ergaben z. B. eine größere Kostendifferenz zwischen TRANS und INSTUG (7,02%) für eine Geländeneigung von 0,5% als für eine Geländeneigung von 0,2% (2,46%). Für das Geländegefälle von 1,0% ergaben sich keine signifikanten Unterschiede. Ähnliche Ergebnisse wurden mit den anderen Wellen beobachtet. Die Autoren stellten fest, daß nur bei flachem Gelände sowie Belastungsreihen mit sehr geringer Fülle die rechenaufwendigen Ansätze VINSTUG und INSTUG deutliche Verbesserungen der Optimierungsergebnisse ausweisen. Zur Vermeidung eines unnötigen Rechenaufwandes wurde vorgeschlagen, ein Sohlengefälle I_0^* , mit $0,05\% \leq I_0^* \leq 0,5\%$, in Abhängigkeit von der Fülle der Zuflußwellen einzuführen, so daß für Sohlengefälle kleiner als I_0^* mit INSTUG und für Sohlengefälle größer als I_0^* mit TRANS berechnet wird. Es wurde dennoch keine Angabe darüber gemacht, mit welchem Ansatz für $0,05\% \leq I_0^* \leq 0,5\%$ berechnet wird. Außerdem bleibt die hydrodynamische Abflußberechnung auf den Fall strömenden Fließzustands beschränkt.

Walters u. Pereira [105] testen die Methode zur Ermittlung optimaler Durchmesser und Gefälle von Kanälen mit Hilfe der Dynamischen Programmierung (DP) (Walters [102]) an Regenabwasser- und Schmutzwasserkanalsträngen, die Kanalsysteme sind, in denen ein Knoten nur zwei Kanäle miteinander verbindet (s. auch Pereira u. Walters [74]). Diese Kanalstränge werden simultan entworfen, indem eine Stufe im Entscheidungsprozeß der DP gleichzeitig aus zwei Kanälen besteht. In einem Beispiel wurden zwei Stränge mit jeweils 6 Knoten und 5 Kanälen optimiert. Das Ergebnis war gegenüber einem Design mit der minimalen Verlegungstiefe um 24,0% kostengünstiger. Theoretisch kann die Lösungsmethode auch für verästelte Netze eingesetzt werden, dennoch das würde einen wesentlich höheren Rechenaufwand bedeuten. Um das zu vermeiden, schlagen die Autoren vor, nur einen der beiden Kanalstränge, z. B. die Regenwasserleitung, zu optimieren und den anderen parallel dazu zu verlegen, denn das berechnete Beispiel zeigte, daß die Schmutzwasserleitung praktisch mit der minimal zulässigen Tiefe unter der des Regenwassers verläuft.

Li u. Matthew [59] stellen ein Modell zur Optimierung städtischer Entwässerungssysteme dar. Das Modell besteht aus zwei Submodellen. Im Submodell I wird das Layout

als vorgegeben angenommen, und die Profile und Gefälle der Kanäle sowie Standorte von on-line Pumpwerken sind zu optimieren. Im Submodell II werden alle Variablen außer den Abflüssen konstant gesetzt. Dann sind die Abflußraten zu justieren, um die Zielfunktion zu minimieren. Die Zielfunktion erfaßt die Bau-, Betriebs- und Instandhaltungskosten des Kanalsystems. Die Zielfunktion wird folgendermaßen aufgestellt: $F = \min F(\mathbf{Q}, \mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \Phi)$, mit: \mathbf{Q} , Vektor der stationären Abflüsse; \mathbf{H}_1 , Vektor der Scheitelhöhen am Kantenanfang; \mathbf{H}_2 , Vektor der Kronhöhen am Kantenende; Φ , Vektor der Indizes der Pumpwerke, $\Phi_i = 0$ kein Pumpwerk vorhanden, $\Phi_i = 1$ Pumpwerk vorhanden. Die Restriktionen werden als Nebenbedingungen formuliert. Im Submodell I wird die Zielfunktion in der Form $F = \min F(\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \Phi)$ geschrieben, und die Optimierung erfolgt nach der Differentiellen Diskreten Dynamischen Programmierung (DDDP) (Mays et al. [64]). Im Submodell II wird die Zielfunktion in der Form $F = \min F(\mathbf{Q})$ geschrieben. Die Aufgabe wird mittels der „Suchrichtungsmethode“ (*searching direction method*) gelöst. In diesem Submodell werden die Kanten des verästelten Netzes in „Sehnenzweige“ (*chord branch pipes*) und „Baumzweige“ (*tree branch pipes*) unterteilt. Ein Sehnenzweig hat keine Vorgängerkanten, daher ist der Abfluß gleich dem Zufluß am Kantenanfang. Der Abfluß in einem Baumzweig ist gleich der Summe aus dem Zufluß am Kantenanfang und den Abflüssen der Vorgängerkanten. Die Suchrichtungsmethode besteht darin, den Gradient der Zielfunktion $F = F(\mathbf{Q})$ sowohl als Funktion der Abflüsse in den Sehnenzweigen als auch der Abflüsse in den Baumzweigen auszudrücken. Jeder dieser Gradienten wird „Suchrichtung“ (*searching direction*) genannt. Die mathematische Ableitung der Gradienten zeigt, daß eine Verminderung der Zielfunktion dadurch erzielt werden kann, wenn die Abflüsse in den Sehnenzweigen vergrößert und in den Baumzweigen verkleinert werden. Dafür werden aus Sehnenzweigen Baumzweige und umgekehrt. Mit der Suchrichtungsmethode wird ein Netzlayout in der Weise erzeugt, daß die Fließstrecke geringer Durchflüsse minimiert wird, denn je größer der Durchfluß ist, desto kleiner das notwendige Sohlengefälle zur Einhaltung der minimal zulässigen Fließgeschwindigkeit, dadurch werden Einbautiefen kleiner, was die anfallenden Kosten reduziert. Das gesamte Modell umfaßt folgende Schritte: (1) Aus dem gegebenen vermaschten System, als Anfangslayout ein Minimalgerüst (*shortest path spanning tree*) nach der Dijkstra-Methode aus der Graphentheorie erzeugen, (2) das

Submodell I für das im Schritt 1 erzeugte Layout ausführen, (3) die Suchrichtungen im Netz ermitteln, und die Kanten zum Statusaustausch auswählen, (4) Statusaustausch ausführen, (5) die Zulässigkeit des resultierenden Layouts überprüfen, ggf. Schritte 3 und 4 mit dem nächstmöglichen Baumzweig wiederholen, (6) die Inzidenzmatrix und andere Parameter für das neu erhaltene Layout ermitteln, (7) das Submodell I für dieses Layout ausführen, (8) Schritte 3 bis 7 wiederholen bis die Zielfunktion innerhalb einer vorgegebenen Anzahl von Durchläufen keine weitere Verbesserung aufweist. Das Modell wurde mit einer Schmutzwasserkanalisation getestet. Insgesamt wurden vier Entwürfe untereinander verglichen, nämlich: (i) Der Kanalnetzentwurf eines erfahrenen Ingenieurs, als „bestehender Entwurf“ bezeichnet, (ii) das Design mittels DDDP für das „bestehende“ Layout, (iii) das Design mittels der DDDP für das Layout ermittelt durch die Dijkstra-Methode, und (iv) das Design mittels der DDDP für das Layout ermittelt durch die Suchrichtungsmethode. In den Fällen (i), (ii) und (iii) wurden zwei on-line Pumpwerke benötigt, im Fall (iv) nur eines. Der Vergleich stellt den Fall (iv) als die beste Lösung dar, wenn auch das globale Optimum nicht garantiert werden kann.

Kuo et al. [58] erweitern das *Illinois Least Cost Storm Sewer System Design Model (ILSD-1)*, um Pumpwerke an vorgegebenen Standorten und Kastenquerschnitte (*box-sewers*) (s. auch Kuo et al. [57]) im Kanalsystem einzubeziehen. Diese Weiterentwicklung wird „ILSD-1PB“ benannt und soll insbesondere für flache Gebiete geeignet sein. Das Modell ILSD-1PB basiert auf den Modellansätzen von Mays u. Wenzel [63] und Mays u. Yen [65], die die Differentielle Diskrete Dynamische Programmierung (DDDP) verwenden. Der Abflußvorgang wird als eine Translation, d. h. zeitliche Verschiebung der Abflußganglinie, berechnet. Ein Pumpwerk besitzt ein Speicherbecken für das Zurückhalten des Abwassers, das in das Kanalsystem wieder eingeleitet werden soll. Die Betriebsweise eines Pumpwerks wird folgendermaßen angenommen: (i) Ist der Zufluß kleiner als der Förderstrom der Pumpe, dann ist die geförderte Abwassermenge gleich der Zuflußmenge, (ii) ist der Zufluß größer als der Förderstrom, dann wird die geförderte Menge gleich dieser angenommen, die Differenz wird gespeichert, um es dann wieder ins Netz einzuleiten. Außerdem darf der Förderstrom eines Pumpwerks den Spitzenwert der Abflußganglinien nicht überschreiten. Ein minimales und maximales Volumen des Speicherbeckens sind einzugeben. Das Ableitungssystem wird durch Iso-

Knoten-Linien (IKL) in Stufen aufgeteilt. Wenn an einem Knoten m_n auf der IKL n ein Pumpwerk einzubinden ist, dann wird in die Stufe n zwischen den IKL n und $(n+1)$ die Stufe n^0 mit dem Knoten m_{n^0} eingefügt. Die Scheitelhöhen am Ende der in den Knoten m_{n^0} einlaufenden Haltungen und die Scheitelhöhe am Anfang der aus dem Knoten m_{n^0} auslaufenden Haltung werden als Zustandsvariablen berücksichtigt, ebenso der Förderstrom des Pumpwerks. Als Entscheidungsvariable am Knoten m_{n^0} auf der Stufe n^0 dient die Differenz zwischen der Scheitelhöhe der auslaufenden Kante und der minimalen Scheitelhöhe der einlaufenden Kanten. Diese Differenz gilt als die Förderhöhe des Pumpwerks. Die Kosten der Stufe n^0 sind von der Förderhöhe und dem Förderstrom sowie vom Volumen des Pumpensumpfs abhängig. Der DDDP-Algorithmus verläuft im Modell ILSD-1PB analog zum ursprünglichen Modell ILSD-1. Das Modell wurde für ein Regenablenkungssystem mit 24 Knoten, 23 Kanälen und einem Pumpwerk am Systemende in einer flachen Region Taiwans eingesetzt. Die Netztopologie, die Belastungsabflüsse und die Kostenfunktionen für die Schächte, Kanäle und das Pumpwerk waren gegeben. Die Ergebnisse des Modells ILSD-1PB werden mit den Ergebnissen eines konventionellen Verfahrens verglichen. Die Kostenersparnisse mit ILSD-1PB beliefen sich auf 18,0%. Dennoch zeigte sich diese Lösung mit einem Pumpwerk und ohne in-line Speicherung aufgrund der tropischen Regen der Region als kostspielig. Die Lösung mit in-line Speicherung erwies sich ebenfalls als nicht finanzierbar. Erst mit einem Überlauf und einem off-line Speicherbecken am Standort des Pumpwerks konnte eine für die Region finanziell tragbare Lösung erreicht werden. Die Autoren unterstreichen, daß die Erweiterung des Modells ILSD-1 auf Pumpwerke insbesondere für das Design in flachen Gebieten geeignet ist. Dennoch kann das Design in flachen Gebieten zu geringen Sohlengefällen der Kanäle führen, wobei zu bemerken ist, daß in einem solchen Fall große Abweichungen zwischen der reinen Translation und der hydrodynamischen Berechnungsweise aufgrund der Wellendämpfung zu erwarten sind.

Walters u. Lohbeck [104] stellen zwei auf Genetischen Algorithmen basierende Methoden zur Auswahl des optimalen Layouts eines verästelten Rohrnetzes dar und vergleichen sie miteinander. In beiden Methoden wird das Layout aus einem gerichteten Basisgraph ermittelt. Die erste Methode verwendet eine binäre Darstellung (*binary representation*) und die zweite eine ganzzahlige Darstellung (*integer representation*).

Anschließend werden beide Verfahren anhand von Beispielnetzen mit einem Verfahren, das die Aufgabe mittels der Dynamischen Programmierung (DP) löst (Lohbeck [61]), verglichen. Nach den Autoren besteht das Design eines Rohrnetzes grundsätzlich aus zwei Phasen, nämlich der Auswahl des Layouts und der Wahl der Rohrdurchmesser. Hier befassen sie sich mit der ersten Phase. Die Aufgabe besteht darin, auf optimale Weise eine Quelle mit Bedarfsknoten zu verknüpfen, so daß jeder Knoten von einer einzigen Kante versorgt wird. Die binäre Darstellung wird an einem Basisgraph veranschaulicht, in dem zwei der Knoten jeweils von zwei Kanten („0“ oder „1“) versorgt werden können. Dann können die möglichen Layouts mittels der binären Codierung (*binary mapping*) wie folgt dargestellt werden: [00], [01], [10] und [11], wobei ein Bit einer Kante an einem Knoten entspricht. Falls mehr als zwei Kanten zu einem Knoten konvergieren, dann können die Layouts entweder durch längere Bit-Folgen oder mit Hilfe von *dummy* Knoten erfaßt werden. Im ersten Fall erfolgt dann die Wahl an einem Knoten mit gleicher Wahrscheinlichkeit nur wenn die Anzahl der verfügbaren Kanten am Knoten gleich der Anzahl der codierten Ketten ist, z. B. für einen Knoten mit 4 Kanten gibt es genau 4 Kombinationen ([00], [01], [10], [11]), d. h. eine Bit-Folge für jede Kante, im anderen Fall würde mehr als eine Bit-Folge einer Kante zukommen, so daß diese Kante mit einer höheren Wahrscheinlichkeit als die anderen gewählt werden kann. Im zweiten Fall werden die *dummy* Knoten so eingefügt, daß an einem Knoten höchstens zwei Kanten zusammenkommen, dadurch wird ermöglicht, daß eine Kante an einem Knoten durch genau ein Bit dargestellt wird. Sowohl im ersten als auch im zweiten Fall wird ein Layout durch eine codierte Kette definiert, die im Optimierungsablauf mit Hilfe der Genetischen Algorithmen ein Individuum darstellt. Grundsätzlich ist der gesamte Ablauf der zwei entwickelten Methoden gleich: (1) Eine Anfangsgeneration durch Zufallswahl erzeugen, (2) die Kosten der Individuen in der Population errechnen, (3) eine neue Generation durch Selektion, Crossover und Mutation erzeugen, (4) Schritte 2 und 3 bis zur Konvergenz wiederholen. Geeignete Populationsgrößen liegen zwischen 10 und 20 Individuen. Die Tauglichkeitsfunktion f (*fitness function*) wird von den Kosten des Individuums C_X (mit: $C_X = \text{Kantenlänge} \sqrt{\text{Durchfluß}}$) abgeleitet: $f(C_X) = 1 - (C_X - C_{min}) / (C_{max} - C_{min})$, mit C_{min} die Kosten des billigsten Individuums und C_{max} die Kosten des teuersten Individuums der Population. Die Se-

lektionswahrscheinlichkeit eines Individuums zur Reproduktion wird proportional zu dessen Tauglichkeit gesetzt. Das Crossover erfolgt paarweise. Jedes Bit in einer Folge kann mutiert werden. Die Mutationsrate wird in Abhängigkeit von der Netzgröße zwischen 0,05 und 0,1 gewählt. Der Rechenvorgang wird als konvergent angenommen, wenn eine in j Generationen erhaltene Lösung in den nächsten j Generationen nicht verbessert wird. Alternativ zur binären Darstellung steht die ganzzahlige Codierung (*integer mapping*), die in der zweiten Methode verwendet wird. Sie garantiert eine Wahl mit gleicher Wahrscheinlichkeit unter den Kanten, die einen Knoten versorgen können, z. B. für eine Wahl unter drei Kanten ist dann zwischen [1], [2] und [3] zu wählen. Das Crossover erfolgt wie in der ersten Methode. Bei der Mutation ist zu berücksichtigen, daß es jetzt für ein Bit mehr Möglichkeiten als „0“ oder „1“ gibt. Außerdem sollten Knoten mit mehr anhängenden Kanten mit einer größeren Wahrscheinlichkeit als Knoten mit weniger Kanten mutiert werden, wie es auch im Fall der binären Codierung sein sollte. Im Verfahren, das die Aufgabe mittels der DP löst, entspricht ein Knoten im Netz einer Stufe im Entscheidungsprozeß, und die Entscheidung auf jeder Stufe hängt von der in der Zustandsvariable abgespeicherten Information über die möglichen Verknüpfungen zwischen den Knoten stromabwärts ab (s. Lohbeck [61]). Der Speicherbedarf dieses Verfahrens nimmt im Optimierungsablauf rasch zu. Das größte der Beispielnetze, ein Gitter bestehend aus 6×6 Knoten, konnte aufgrund des Speicherbedarfs nicht mit diesem Verfahren berechnet werden. Demgegenüber benötigten die Verfahren, die nach den Genetischen Algorithmen vorgehen, wesentlich weniger Speicher, denn die laufende Generation braucht nur die Information der vorhergehenden Generation. Die Rechenzeit des Verfahrens nach der DP nahm bei den größeren und stark vernetzten Beispielnetzen sogar schneller als der Speicherbedarf zu. Allerdings ermittelt dieses Verfahren das globale Optimum. Die Rechenzeit der Verfahren nach den Genetischen Algorithmen kann von einem Rechenfall zu einem anderen variieren. Im Vergleich zu dem Verfahren nach der DP konnte in 10 Rechenläufen an einem der Beispielnetze fünfmal das globale Optimum erreicht werden, und durchschnittlich war die Rechenzeit kürzer. Der Vergleich zwischen der binären und der ganzzahligen Codierung ergab kürzere Rechenzeiten für die ganzzahlige Codierung. Dennoch konnten an den Beispielnetzen keine eindeutigen Unterschiede bezüglich der Leistung beider Verfahren

festgestellt werden. Deshalb wurden weitere Rechnungen an Basisgraphen mit einem niedrigen und einem hohen Grad an Verknüpfungen, wobei dieser Grad als die durchschnittliche Anzahl konvergierender Kanten pro Knoten definiert wurde, ausgeführt. Die Netze mit einem niedrigen Grad an Verknüpfungen bestehen aus 70 Knoten, die mit einem hohen Grad aus 34 Knoten. Rechnungen mit einer Populationsgröße von 20 Individuen, paarweisem Crossover, 100 Generationen in jedem Rechenlauf und einer Mutationsrate zwischen 0,002 und 0,02 ergaben, daß an den Netzen mit einem hohen Grad an Verknüpfungen die ganzzahlige Codierung bessere Lösungen erzielt.

Walters u. Smith [106] stellen ein Verfahren zur Ermittlung des optimalen Layouts eines Verästelungsnetzes aus einem ungerichteten Basisgraph, basierend auf Genetischen Algorithmen, dar. Der Lösungsalgorithmus durchläuft prinzipiell die Schritte der Genetischen Algorithmen wie in Walters u. Lohbeck [104]. Der Unterschied dieses Verfahrens liegt darin, wie die Nachkommen einer Generation erzeugt werden. Daher bezeichnen die Autoren diesen Ansatz als „evolutionären Ansatz“ (*evolutionary technique*), um es von den Genetischen Algorithmen zu unterscheiden. Nach diesem Ansatz bilden die Kanten des Basisgraphs (BG) eine Menge von „BaseArcs“, denen zunächst jeweils eine beliebige Richtung zugeordnet wird. Dann ist es möglich, einen Untergraph G (aus BG) aus zwei Mengen von *BaseArcs* zu definieren, nämlich „PosArcs(G)“, der Menge der Kanten, die die vorab zugeordneten Richtungen haben, und „NegArcs(G)“, der Menge der Kanten mit einer anderen Richtung als die vorab zugeordneten. Eine Kante, die weder in $PosArcs(G)$ noch in $NegArcs(G)$ enthalten ist, existiert nicht, und eine, die in beiden Mengen enthalten ist, ist eine ungerichtete Kante. Zur Erzeugung eines Nachkommen (PP) werden 2 Eltern ($P1$ und $P2$) aus der Population gewählt. Zuerst werden beide Bäume überlagert, so daß alle Kanten von $P1$ und $P2$ zusammen in PP vorhanden sind. PP wird dann mutiert, so daß durch Zufall eine oder mehrere gerichtete Kanten hinzugefügt werden. Zur Erzeugung der Bäume $C1$ und $C2$ aus PP verwenden die Autoren den „Algorithmus des wachsenden Baums“ (*tree growing algorithm*). Dieser Algorithmus durchläuft folgende Schritte, wobei C die Menge der im wachsenden Baum enthaltenen Knoten, A die Menge der im wachsenden Baum vorhandenen gerichteten Kanten, und AA die Menge der gerichteten Kanten, die mit gleicher Wahrscheinlichkeit in den wachsenden Baum aufgenommen werden

können, ist: (1) Die Wurzel des Baums (N_r) identifizieren, (2) $C = [N_r]$ initialisieren, (3) $A = []$ initialisieren, (4) $AA = [$ gerichtete Kanten, die im Basisgraph an der Wurzel anhängen], (5) durch Zufall eine Kante a aus AA wählen, (6) $A = A + [a]$, (7) den neu angeschlossenen Knoten merken, (8) $C = C + [N]$, (9) die Kanten, die im Basisgraph am Knoten N anhängen, merken (ausgenommen die Kante a), (10) AA aktualisieren, (11) ab Schritt 5 wiederholen bis ein zusammenhängender Baum entsteht. Es wird mit: Kosten einer Kante = $Kantenlänge \sqrt{Durchflu\beta}$ wie in Walters u. Lohbeck [104] gerechnet. Dieser „Algorithmus des wachsenden Baums“ wurde an einem Beispiel mit 4 Knoten und 4 Kanten getestet. Die Ergebnisse zeigten, daß unter den zulässigen Baumkonfigurationen einige mit einer höheren Wahrscheinlichkeit als andere erzeugt werden. Der gesamte Algorithmus nach dem „evolutionären Ansatz“ wurde zunächst an einem 8×8 ungerichteten Basisgraph getestet. Der Standort der Wurzel war gegeben. Zum Vergleich wurde außerdem dieser Basisgraph mit vorab festgelegten Richtungen optimiert. Das Ergebnis war um 3,1% teurer als im ersten Fall. Mehrere Testrechnungen wurden mit dem ungerichteten Basisgraph ausgeführt, daraus erwiesen sich eine Populationsgröße von 16 Individuen und eine Mutationsrate, die im Durchschnitt jeweils eine Kante hinzufügt, als geeignet. Mit diesen Parameterwerten wurden dann in 10 Rechenläufen Lösungen, die um 12,0% von der besten Lösung abweichen, innerhalb von rund 200 Generationen erreicht. Ein zweites Beispiel, ein ungerichteter Basisgraph mit 100 Knoten und 232 Kanten, wurde berechnet. Das Netz hat zwei Wurzeln, A und B . Um die Aufgabe als eine Aufgabe mit einer Wurzel zu lösen, wird ein *dummy* Knoten C eingeführt, wobei die gehörigen Kanten CA und CB von den Kosten des gesamten Systems ausgenommen wurden. Auch in diesem Fall wurden 10 Rechenläufe durchgeführt, mit den Parameterwerten vom ersten Beispiel. Die Lösungen, von der besten Lösung um 1,8% abweichend, wurden im Durchschnitt innerhalb von 2000 Generationen erreicht.

Tabelle 2.1 gibt die Literaturübersicht in Stichworten wieder, indem die Ansätze zur Layout- und Designoptimierung neben Autor, Jahrgang, Belastungsabflüssen und Abflußberechnungsweise aufgelistet werden.

Die Beiträge aus der Literatur deuten auf die Komplexität der Entwurfsoptimierung von Kanalisationen hin. In der Regel wird die Aufgabe nur teilweise behandelt, indem

Autor Jahr	Layout	Design	Belastungsabflüsse, Berechnungsweise
Liebmann 1967	heuristisches Verfahren	(vereinfacht berücksichtigt: kantenbezogene Minimierung der Einbautiefen)	stationäre Abflüsse, Summation
Walsh u. Brown 1973	(vorgeg.)	DP (Dynamische Programmierung)	stationäre Abflüsse, Summation
Mays u. Yen 1975	(vorgeg.)	DP, <i>serial sewer system,</i> <i>branched sewer system</i> DDDP (Differentielle Diskrete DP)	stationäre Abflüsse, Summation
Mays u. Wenzel 1976	(vorgeg.)	DDDP nach Mays u. Yen (1975), <i>nonserial optimization problem,</i> <i>serial optimization problem,</i> <i>isonodal lines</i>	stationäre Abflüsse, Summation
Mays et al. 1976	0-1 <i>integer</i> <i>programming</i>	DDDP nach Mays u. Wenzel (1976)	stationäre Abflüsse, Summation
Orth 1977	(vorgeg.)	DP	stationäre Abflüsse, Summation
Froise u. Burgess 1978	(vorgeg.)	DP	instationäre Abflüsse, hydrodyn. Ansatz, kin. Wellenansatz
Cembrowicz u. Krauter 1983	Evolutionsstrategien mit „ $\frac{1}{5}$ -Erfolgsregel“	DP, <i>serial optimization problem/</i> <i>isonodal lines</i> nach Mays u. Wenzel (1976)	stationäre Abflüsse, Summation
Walters 1985	Suchverfahren mit Rastergitter	DP nach Mays u. Yen (1975)	stationäre Abflüsse, Summation
Cembrowicz u. Krauter 1986	(vorgeg.)	DP nach Cembrowicz u. Krauter (1983)	instationäre Abflüsse, hydrodyn. Ansatz, kin. Wellenansatz
Walters u. Pereira 1990	(vorgeg.)	DP nach Mays u. Yen (1975)	stationäre Abflüsse, Summation
Li u. Matthew 1990	<i>searching direction</i> <i>method</i>	DDDP nach Mays u. Wenzel (1976)	stationäre Abflüsse, Summation
Kuo et al. 1991	(vorgeg.)	DDDP nach Mays u. Wenzel (1976)	instationäre Abflüsse, reine Translation
Walters u. Lohbeck 1993	<i>Genetic Algorithms,</i> <i>binary mapping,</i> <i>integer mapping</i>	(vereinfacht berücksichtigt: $Kosten_{Kante} = \frac{Länge_{Kante}}{\sqrt{Durchfluß}}$)	stationäre Durchflüsse, Summation
Walters u. Smith 1995	<i>Genetic Algorithms,</i> <i>tree growing</i> <i>algorithm</i>	(wie in Walters u. Lohbeck (1993))	stationäre Durchflüsse, Summation

Tabelle 2.1: Zusammenfassung der Literaturübersicht

das Layout des Kanalsystems als gegeben vorausgesetzt wird, oder das Netzdesign sehr vereinfacht wird und/oder nur stationäre Abflüsse berücksichtigt werden.

Die Netztopologie zu optimieren, stellt sich als aufwendige Aufgabe aufgrund der zahlreichen Alternativen dar, die sich zur Festlegung der Trassen der Kanäle ergeben können, je größer das Kanalnetz und die Anzahl der möglichen Verknüpfungen zur Entsorgung sind. Lösungsansätze basierend auf Evolutionsstrategien und Genetischen Algorithmen haben sich als effiziente Verfahren zur Layoutoptimierung gezeigt, dennoch befindet sich die Anwendung dieser Verfahren in der Abwasserentsorgung noch in einer Testphase (s. auch Abschnitt 3.2.2.3).

Zur Designoptimierung haben sich im Laufe der Jahre Lösungsansätze, die die Dynamische Programmierung verwenden, durchgesetzt. In der Regel wird in den Verfahren aus der Literatur, die auf der Dynamischen Programmierung oder auf der Differentiellen Diskreten Dynamischen Programmierung aufbauen, auf kleinstmögliche Durchmesser zur Ableitung der Abflüsse aufgerundet und nicht mit verfügbaren Profilen –die diskrete Größen sind– gerechnet, was Auswirkungen auf die Optimalität der Lösung zur Folge hat. Außerdem kann die Differentielle Diskrete Dynamische Programmierung das globale Optimum nicht garantieren und zu einem lokalen Optimum konvergieren.

Wie o. a. wird die Hydraulik des Ableitungssystems überwiegend auf die Berechnung mit stationären Abflüssen reduziert. Im Fall instationärer Abflüsse wird eine haltungsbezogene Abflußberechnung oder eine reine Translation der Abwasserwellen ausgeführt. Die reine Translation kann sich wesentlich auf das Ergebnis der Optimierung auswirken, insbesondere bei flachen Sohlgefällen, da in diesem Fall die Retention (Wellendämpfung) im Kanal nicht vernachlässigbar ist. Außerdem werden in der Regel Sonderbauwerke wie Pumpwerke, Regenbecken etc nicht berücksichtigt, was Kanalsysteme nicht wirklichkeitsnah abbildet.

Daraus läßt sich schließen, daß bisher noch kein Optimierungsmodell, das eine analytische Kopplung zwischen der Auswahl der Netztopologie und dem Design der Kanäle gestattet und zugleich reale ingenieur-technische Aspekte, wie instationäre Abflußvorgänge im Kanalnetz, vorgegebene Restriktionen, Sonderbauwerke wie Pumpwerke, Entlastungsbauwerke etc, berücksichtigen kann, entwickelt worden ist.

3 Optimierungsmodell

3.1 Kanalnetzelemente

3.1.1 Haltungen

Das entwickelte Modell ermittelt die optimalen Trassen, Profilformen, Profilabmessungen, Gefälle und Tiefenlagen der Haltungen eines Entwässerungssystems. Falls in die Optimierung des gesamten Kanalnetzes bestehende Haltungen im Netz einzubeziehen sind, sind die Sohlentiefe am Haltungsanfang und das Sohlengefälle dieser Kanäle einzugeben. Der Algorithmus zur Optimierung wird in den Abschnitten 3.2 u. 3.3 im Detail beschrieben.

Die vorliegende Modellentwicklung kann mit folgenden Profilformen rechnen: Kreisprofil, genormtes Eiprofil, genormtes Maulprofil, Kreisprofil mit eingebauter Trockenwetterrinne, Rechteckprofil (geschlossene/offene Form) und Trapezprofil (geschlossene/offene Form). Allgemein ist das Kreisprofil der gebräuchlichste Querschnitt. Es ist hydraulisch am günstigsten, weil der hydraulische Radius beim vollen Kreisquerschnitt gegenüber anderen vollaufenden Querschnitten gleicher Durchflußfläche einen Höchstwert erreicht, dadurch wird bei gleichem Gefälle und gleicher Rauigkeit das Abflußvermögen am größten.

3.1.2 Schächte

Die Inspektion und der Unterhalt der Kanäle sind zu gewährleisten, allgemein durch begehbare Schächte, aber auch durch nicht begehbare Inspektionsöffnungen. Schächte werden bei Änderungen der Richtung, des Querschnitts, des Gefälles, bei Einmündungen von weiteren Kanälen sowie als Zwischenschächte in geraden Kanalstrecken angeordnet. Im vorliegenden Modell werden Schächte am Haltungsanfang modelliert (s. Abschnitte 3.2.1, 3.3.1 u. 3.3.3), und es wird zwischen zwei Schachttypen unterschieden. Schächten vom Typ „Standard“ werden eine konstante vorgegebene Querschnittsfläche zugeordnet, bei „Nicht-Standardschächten“ kann die Querschnittsfläche einzeln eingegeben werden. Ferner gestattet das Modell, vorhandene Schächte im Kanalnetz durch die Eingabe von Querschnittsflächen und Schachttiefen in der Optimierung des gesamten Kanalsystems mitzubedenken.

3.1.3 Pumpwerke

Pumpen werden in der Abwasserentsorgung eingesetzt, wenn das zum Abtransport verfügbare Gefälle und/oder vorhandene Profile nicht ausreichen, oder wenn die Abwassermenge auf ein höheres Niveau gehoben werden muß, wie z. B. zur Behandlung. Durch die Eingabe der Standorte kann das vorliegende Modell Pumpwerke im Kanalnetz einbeziehen, analytisch je nach eingegebenem Pumpwerkstyp die technisch realisierbaren Lösungen ermitteln und die kostengünstigste Lösung finden. Der zugehörige Lösungsalgorithmus wird im Abschnitt 3.3.1 dargestellt.

3.1.4 Regenbecken

Regenbecken zur Rückhaltung von Regen- und Mischwasser entlasten die Kanäle von großen Abflüssen. Dadurch können die Baukosten von Kanalsystemen gesenkt werden. Im vorliegenden Modell sind die Standorte der einzuplanenden Regenbecken im Kanalnetz einzugeben. Zur Berechnung des Beckenvolumens wird dann der Maximalwert der am Knoten mit Regenbecken anfallenden Abwasserwelle diskretisiert. Die daraus resultierenden Alternativen für den Drosselabfluß und das Volumen zur Speicherung werden systematisch ausgewertet, um die technische und wirtschaftliche beste Lösung zu ermitteln. Der zugehörige Lösungsalgorithmus wird im Abschnitt 3.3.1 beschrieben.

3.2 Layoutoptimierung

3.2.1 Graphentheorie

3.2.1.1 Graphentheoretische Darstellung der Netztopologie

Die Aufgabe, die Trassenführung der Kanäle eines Entsorgungssystems zu ermitteln, läßt sich mit Hilfe der Graphentheorie formulieren. In der vorliegenden Arbeit wird die Notation von Neumann [70] verwendet.

Das vermaschte Muster eines Kanalsystems –i. d. R. gleicht es dem Straßenmuster–, aus dem Netztopologien generiert werden können, wird als ein Graph $G = (V, E)$ erfaßt, der aus einer nichtleeren Menge $V = \{1, 2, \dots, n\}$ der „Knoten“ oder „Ecken“, einer nichtleeren Menge $E = \{1, 2, \dots, m\}$ der „Kanten“, mit $V \cap E = \emptyset$, und

einer Abbildung, die jedem Element $e \in E$ genau zwei Elemente $i, j \in V$ zuordnet, besteht. Die Knoten stellen die Verknüpfungen im Kanalnetz, wie z. B. Zusammenflüsse der Kanäle, Standorte der Schächte ($I^S \subset V$), Pumpwerke ($I^{PW} \subset V$), Regenbecken ($I^{RB} \subset V$) dar, während die Kanten die Kanäle oder Haltungen darstellen.

Ein Graph ist ein „gerichteter Graph“, ein „Digraph“ (*directed graph*): $\vec{D} = \langle V, E \rangle$, wenn das dem Element $e \in E$ zugeordnete Paar von Knoten i, j geordnet, und e eine „gerichtete Kante“ oder ein „Pfeil“ mit dem Anfangsknoten i und dem Endknoten j der Form $\langle i, j \rangle$ ist. Die Richtung einer Kante entspricht der Fließrichtung einer Haltung. Ist die Fließrichtung in einer Haltung nicht vorgegeben, so werden im Graph zwischen den beiden Knoten zwei Kanten mit entgegengesetzten Richtungen berücksichtigt. Es ist ein „schlichter Digraph“, d. h. der Graph besitzt weder parallele gerichtete Kanten noch Schlingen. „Parallele gerichtete Kanten“ sind Kanten mit den gleichen Anfangs- und den gleichen Endknoten. „Schlingen“ sind Pfeile, deren Anfangs- und Endknoten zusammenfallen.

Für die gerichtete Kante oder den Pfeil $\langle i, j \rangle$ eines Digraphen heißt i „Vorgänger“ von j , und j „Nachfolger“ von i . Die Menge der Vorgänger eines Knotens i ist $\mathcal{P}(i)$, und die Menge der Nachfolger von i ist $\mathcal{S}(i)$. Die Anzahl der Vorgänger eines Knotens i ist der „negative Grad“ oder der „Eingangsgrad“ von i , das ist $\delta^-(i) = |\mathcal{P}(i)|$. Die Anzahl der Nachfolger eines Knotens i ist der „positive Grad“ oder der „Ausgangsgrad“ von i , das ist $\delta^+(i) = |\mathcal{S}(i)|$. Der Digraph für ein Kanalsystem hat genau eine „Senke“, einen Knoten $i_S \in V$ ohne Nachfolger, an dem das Abwasser das Kanalsystem verläßt:

$$\delta^+(i_S) = 0, \quad i_S \in V \quad (3.3)$$

Ein Digraph ist „schwach zusammenhängend“, wenn je zwei Knoten von \vec{D} miteinander verbunden sind. Die Senke des Digraphs ist von jedem Knoten i ($\forall i \in V$) aus „erreichbar“, d. h. es gibt eine Pfeilfolge von i aus zur Senke. Jeder Knoten ist im Graph mit sich selbst verbunden und von sich selbst aus erreichbar.

Aus dem oben beschriebenen Digraph können zulässige Kanalnetztopologien erzeugt werden. Jede Netztopologie entspricht dann einem Teilgraph des Digraphs, mit der Knotenmenge V und der Kantenmenge $E' \subset E$. Dieser Teilgraph ist außerdem

„zyklenfrei“, d. h. er besitzt keine „geschlossene“ Pfeilfolge, Anfangsknoten i und Endknoten j der Folge fallen nicht zusammen. Ein zusammenhängender Graph $G = (V, E)$ mit $|V| = n > 2$, der zyklenfrei ist, ist ein „Baum“. Dieser Baum enthält genau $(n - 1)$ Kanten. Jedes mögliche Kanalnetzlayout ist dann –graphentheoretisch betrachtet– ein Baum mit gerichteten Kanten oder Pfeilen und einer einzigen Senke:

$$\vec{B} = \langle V, E' \rangle \quad (3.4)$$

Die Senke ist von jedem Knoten i ($\forall i \in V$) aus erreichbar. Ferner ist jeder Knoten $i \in V$ –die Senke ausgenommen– der Anfangsknoten eines einzigen Pfeils:

$$\delta^+(i) = 1, \quad \forall i \in V \setminus \{i_S\} \quad (3.5)$$

Das bedeutet, daß die an einem Knoten stattfindende Abwassereinleitung ins Kanalnetz sowie die von stromaufwärts herkommenden Abflußmengen an diesem Knoten gesammelt werden, und dieser Knoten von genau einer Haltung entwässert wird. Die Haltungen leiten das Abwasser zum Kanalsystemauslaß, Standort der Kläranlage, Überlauf etc, ab.

Die Anzahl der Bäume eines vermaschten Graphs kann mit Hilfe der „reduzierten Inzidenzmatrix“ (*reduced incidence matrix*) berechnet werden (Weinberg [107]). Bei den Elementen λ_{ij} der Inzidenzmatrix eines Graphs entspricht die Reihe i dem Knoten i , und die Spalte j der Kante j . Die Reihenfolge der Reihen und Spalten kann beliebig sein, mit:

$$\begin{aligned} \lambda_{ij} &= 0 && \text{wenn die Kante } j \text{ den Knoten } i \text{ nicht berührt,} \\ \lambda_{ij} &= +1 && \text{wenn die Kante } j \text{ zum Knoten } i \text{ führt,} \\ \lambda_{ij} &= -1 && \text{wenn die Kante } j \text{ sich vom Knoten } i \text{ entfernt.} \end{aligned}$$

Wird eine Reihe der Inzidenzmatrix eliminiert, dann resultiert die reduzierte Inzidenzmatrix Λ mit dem Knoten der eliminierten Reihe als Bezugsknoten (*datum node*). Die Anzahl der Bäume (T) eines vermaschten Graphs ist gleich der Determinante des Produkts aus der reduzierten Inzidenzmatrix Λ und der transponierten Matrix Λ' (Weinberg [107]):

$$T = |\Lambda\Lambda'| \quad (3.6)$$

3.2.2 Evolutionsstrategien u. Genetische Algorithmen

3.2.2.1 Einführung

Die Entwicklung der Rechner der letzten 30 Jahre hat ermöglicht, Verfahren wie die Evolutionsstrategien in verschiedenen Gebieten einzusetzen, auch in der Ingenieurpraxis, wo oft aufgrund der Mehrdimensionalität, mehrerer lokaler Optima, Unstetigkeiten etc, des Lösungsraums die zu lösenden Aufgaben so komplex sind, daß andere Methoden des *Operations Research* nur begrenzt oder nicht eingesetzt werden können.

Die auf Darwins Evolutionstheorie (Darwin [25]) aufbauenden Optimierungsverfahren werden allgemein *Evolutionary Algorithms* (Davis et al. [26]), *Evolutionary Programs* (Michalewicz [66]) etc genannt. Sie unterscheiden sich wenig voneinander. Sie operieren nach dem Darwins Prinzip *the survival of the fittest*, wofür sie die in der Natur vorkommenden Evolutionsmechanismen, wie z. B. Mutation, Crossover/Rekombination und Selektion, abbilden. Ausgehend von einer Population zufällig generierter Individuen (Lösungen) werden durch diese Mechanismen weitere Individuen erzeugt. Jedem Individuum entspricht eine Tauglichkeit, errechnet durch eine Bewertungsfunktion. Die besten Individuen überleben und werden der nächsten Generation übergeben. Eine Generation kann aus mehreren Populationen bestehen. Nach mehreren Generationen werden das Optimum oder annähernd optimale Lösungen erreicht. Im Vergleich zu anderen Verfahren, wie dem *Simulated Annealing*, *Tabu Search* etc –mit denen sie unter *stochastic optimization techniques* (Simpson et al. [95]), *metaheuristics* (Falkenauer [31]), *probabilistic heuristic algorithms* (Machado et al. [62]) etc gruppiert werden–, sind sie vielfältig entwickelt und eingesetzt worden. Insbesondere Rechenberg [78, 79] mit den Evolutionsstrategien (ES) und Holland [48, 49] mit den Genetischen Algorithmen (GA) haben diese Entwicklung geprägt. Die ES wurden entwickelt, um technische Systeme zu optimieren. Die Anwendung der GA auf technische Systeme erfolgte durch Goldberg [36, 37], der sich mit der *optimization of pipeline operations* und *learning control of pipeline operations* befaßt.

GA operieren mit Bit-Folgen, die die Variablen in codierter und diskreter Form repräsentieren. ES operieren mit Vektoren reeller Zahlen, die i. d. R. die Variablen selbst sind. Bei den GA werden die Bit-Folgen aus der Population proportional zu ihrer Taug-

lichkeit selektiert und reproduziert. Bei den ES vermehren sich die Individuen einer Population mit gleicher Wahrscheinlichkeit. Durch die Reproduktion werden Individuen zur Verfügung gestellt, um im weiteren Prozeßverlauf diese zu mutieren und/oder miteinander zu rekombinieren.

Allgemein rechnen GA mit sehr geringen Mutationsraten und großen Populationen, während ES mit hohen Mutationsraten und kleinen Populationsgrößen arbeiten. Die Mutation erfolgt bei den GA an einer Position in der Bit-Kette. Diese Stelle wird mit gleicher Wahrscheinlichkeit aus allen Positionen entlang der Kette gewählt. An dieser Stelle wird der Wert geändert, z. B. in der binären Darstellung von Null auf Eins, oder umgekehrt. Die vorgegebene Mutationswahrscheinlichkeit ist im Vergleich zu der für das Crossover sehr gering. Bei den ES werden alle Vektorkomponenten durch Zufallsänderungen mutiert, wie z. B. nach der Dichtefunktion einer Normalverteilung. Die Mutationsänderungen oder Mutationsschrittweiten, die bessere Lösungen ergeben, d. h. die eine bessere Anpassung an die lokale Topologie des Lösungsraums zeigen, werden ausgelesen, und an die nächste Generation vererbt. Dieser Prozeß ist eine selbsttätige Adaptation des Verfahrens, wodurch die Suche nach dem Optimum gesteuert wird.

Wie oben erwähnt findet bei den GA ein Crossover wesentlich häufiger als eine Mutation statt. Zwei Bit-Folgen werden aus der Population gewählt und kopiert. Mit gleicher Wahrscheinlichkeit wird eine Position in den Ketten bestimmt, und rechts davon werden die Kettenteile gegeneinander ausgetauscht. Im Fall der ES-Rekombination werden mit gleicher Chance Individuen aus der Population genommen, und sie tauschen Vektorkomponenten aus. Wieviel und welche Komponenten ausgetauscht werden, wird ebenfalls mit gleicher Wahrscheinlichkeit bestimmt. Aufgrund des kontinuierlichen Charakters der Komponenten besteht die Möglichkeit, anstatt Variablenwerte zwischen den Vektoren auszutauschen, einen Nachkommen mit den gemittelten Werten zu bilden.

Welche Bit-Folgen die nächste Population bilden, wird bei den GA wie folgt bestimmt: Aus einer Population mit n Individuen werden $(n/2)$ Paare ausgewählt. Wie oben erwähnt, erfolgt dieser Selektionsprozeß gemäß der Tauglichkeit. Die Paare erzeugen dann je zwei Nachkommen und damit erneut eine Population mit n Individuen. Bei den ES werden zunächst aus μ Eltern λ Nachkommen generiert. Die Individuen,

aus denen die neuen Eltern zu wählen sind, kommen in eine Urne, wo die Selektion stattfindet. Es gibt zwei Fälle, entweder kommen die μ Eltern und die λ Nachkommen zusammen in die Urne oder nur die λ Nachkommen. Aus der Urne werden dann die μ besten Individuen selektiert, die die neuen μ Eltern werden. Eine strenge Selektion kommt bei den ES vor, wenn die Zahl der Eltern (μ), die die Nachkommen hervorbringen, klein im Vergleich zur Zahl der Nachkommen (λ) festgelegt wird.

3.2.2.2 Gemeinsamkeiten u. Unterschiede

GA und ES haben grundsätzliche Gemeinsamkeiten, so daß sie sich ineinander überführen lassen, zugleich weisen sie Unterschiede auf, so daß ein systematischer Vergleich der *performance* beider Verfahren nicht möglich ist.

Dennoch lassen sich folgende Aussagen nach dem Vergleich zwischen beiden Verfahren durch Testfunktionen formulieren (Hoffmeister u. Bäckler [47], Schöneburg et al. [89]):

(i) Auf der Suche nach dem globalen Optimum können sowohl GA als auch ES gegen ein lokales Optimum konvergieren. Die Tendenz war bei den ES stärker im Fall der multimodalen Testfunktionen. Globale Optima werden bei diesen Funktionen gefunden, wenn einer der Startwerte zufällig in der Nähe des globalen Optimums liegt. Ein Grund dafür liegt in der Mutations-Schrittweiten-Regelung, die zu einer stärker lokalen Durchforstung des Suchraums führt. Dafür können die ES mehrmals gestartet werden, um die Chance für Startwerte in der Nähe des globalen Optimums zu erhöhen. Ein weiterer Grund ist der relativ hohe Selektionsdruck. Dafür kann der (μ/λ) -Quotient größer gewählt werden, um eine vielfältigere Suche zu ermöglichen.

(ii) Bei den GA ist es der Crossover-Mechanismus, der die Suche nach dem Optimum steuert. Die Mutation spielt dabei eine ergänzende Rolle, sorgt nämlich dafür, daß sich keine einförmige Population, die zu keiner weiteren Evolution fähig ist, entwickelt. Das Crossover führt zu großen Sprüngen im Suchraum. Deshalb können GA mehrere Unterräume eines mehrdimensionalen Suchraums als die ES durchsuchen, so daß sie bei der Suche globaler Optima multimodaler Funktionen bessere Ergebnisse als ES erreichen können.

(iii) Auf der anderen Seite zeigten GA bei den relativ einfachen Testfunktionen

schlechtere Konvergenzraten im Vergleich zu den ES. Ein Grund dafür liegt darin, daß ES den Gradient nutzen, indem sie die Mutations-Schrittweiten lokal anpassen. Im Unterschied dazu besitzen GA keinen Mechanismus zur automatischen Selbstanpassung. Zum Beispiel, im Fall einer unimodalen Funktion mit einem schwachen Gradient sind alle Nachkommen relativ gleichwertig, so daß die proportional zur Tauglichkeit operierende Selektion zur Paarenbildung kaum Fortschritt bringt. Der Fortschritt könnte dann eher durch Mutationen erreicht werden. Da die Mutationsraten bei GA nicht adaptiv und sehr gering sind, führt das zu einer schlechten Konvergenz.

3.2.2.3 Anwendung auf die Siedlungswasserwirtschaft

Angewendet auf die Siedlungswasserwirtschaft liegen die Beiträge hauptsächlich im Bereich der Wasserversorgung. ES und GA werden zum Entwurf, Kalibrierung, Sanierung etc von Wasserversorgungsnetzen eingesetzt (Cembrowicz [15], Mulligan u. Brown [68], Walters u. Cembrowicz [103], Wu u. Simpson [109] u. a.). Im Bereich der Abwasserentsorgung befindet sich der Einsatz dieser Optimierungsverfahren eher in einer Testphase, im Vergleich zur stattgefundenen Entwicklung im Bereich der Wasserversorgung. Cembrowicz u. Krauter [17, 19] verwenden ES zur Ermittlung optimaler Trassenführungen von Kanalisationsnetzen, ebenfalls Walters u. Lohbeck [104] stellen zwei auf GA basierende Methoden zur Ermittlung des optimalen Layouts eines verästelten Rohrnetzes dar (s. Abschnitt 2.2). Rauch u. Harremoës [77] testen die Effizienz der GA an drei Aufgabenstellungen: (i) Die Kalibrierung eines Oberflächenabflußmodells, (ii) die Kanalnetzsteuerung zur Minimierung des Überlaufvolumens, und (iii) ein multikriterieller Entscheidungsprozeß bzgl. Betriebskosten und Gewässerbelastung. Parker et al. [73] verwenden GA zur optimalen Sanierung von Kanalnetzen mittels Speichervolumina und Entlastungsbauwerke an vorgegebenen Standorten.

3.2.2.4 Lösungsalgorithmus nach Evolutionsstrategien

Im vorliegenden Modell werden die Evolutionsstrategien mit Mutations-Schrittweiten-Regelung (ES-MSR) nach Rechenberg [79] zum ersten Mal zur Layoutoptimierung von Abwasserentsorgungssystemen verwendet.

Die Analogie zwischen einem Lebewesen und dem Graph eines Entsorgungssystems im

Lebewesen	Systemgraph
genetisches Material eines Lebewesens, bestehend aus Chromosomen (= Genotyp)	vermaschter Graph eines Entsorgungsnetzes, bestehend aus Knoten-Kanten-Einheiten in „codierter“ Form
äußerliches Erscheinungsbild eines Lebewesens (= Phänotyp)	Layout des Entsorgungsnetzes, definiert durch den Vektor \mathbf{B}
zunehmende Tauglichkeit des Lebewesens in der Umwelt	abnehmende Kosten des Entsorgungsnetzes, ermittelt durch die Designoptimierung

Tabelle 3.2: Analogie zwischen einem Lebewesen und einem Kanalsystemgraph

Modell veranschaulicht Tabelle 3.2.

Der vermaschte Graph für ein Abwasserentsorgungssystem wird in der Form „codiert“, daß Knoten und die an ihnen abgehenden Kanten als Chromosomen betrachtet werden. Diese Chromosomen –Knoten-Kanten-Einheiten– können verändert und/oder gegen andere ausgetauscht werden. Die Untermenge der Knoten im Graph, an denen die Kante gewählt werden kann, so daß jeder Knoten von einer einzigen Kante entwässert wird (s. Gleichung 3.5), wird als der Vektor \mathbf{x} erfaßt:

$$\mathbf{x} = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_n\}^T \quad (3.7)$$

mit: $x_i \in [0, 1]$ und n gleich der Anzahl dieser Knoten.

Jedes Intervall $[0, 1]$, das einem dieser Knoten zugrundegelegt wird, wird in so viele Teilintervalle geteilt, wie es Kanten zur Entsorgung dieses Knotens gibt, so daß jedem Teilintervall ein Kantenindex zugeordnet wird. Mit jedem Vektor \mathbf{x} wird dann ein Baum \vec{B} (s. Gleichung 3.4) definiert (Funktion f), der als Vektor \mathbf{B} der Kantenindizes dargestellt wird:

$$f : \mathbf{x} \rightarrow \mathbf{B} \quad (3.8)$$

Dadurch wird dem Phänotyp diskreten Charakters, d. h. den ganzzahligen Kantenindizes, ein kontinuierlicher Genotyp zugrundegelegt.

In der vorliegenden Layoutoptimierung wird die durch Schwefel [90] eingeführte Notation für Evolutionsstrategien verwendet:

$$(\mu \text{ ; } \lambda) - ES$$

lies: „ μ Plus oder Komma λ gliedrige Evolutionsstrategie“. Darin bedeutet μ die Zahl der Elternindividuen und λ die Zahl der variierten Nachkommenindividuen einer Population. Im vorliegenden Modell bildet eine Population eine Generation.

Das „+“ steht für die Plus-Version der Evolutionsstrategien, d. h. aus den Eltern und Nachkommen einer Generation werden die μ besten Individuen als Eltern der nächsten Generation ausgewählt. Das „ , “ steht für die Komma-Version, d. h. nur aus den Nachkommen einer Generation werden die Eltern der nächsten Generation gewählt, und zwar sind es die μ besten Individuen. Zwei weitere Spielvarianten der Evolutionsstrategien sind ebenfalls im Modell implementiert worden. Bei einer dieser Spielvarianten findet eine Mischung der Variablenwerte von ρ -Elternindividuen statt. Dieser Fall läßt sich in der o. a. Schreibweise als: $(\mu/\rho \text{ ; } \lambda) - ES$ darstellen. Ist $\rho = 2$, dann handelt es sich um eine Rekombination, die die sexuelle Fortpflanzung in der Natur abbildet. Mathematisch können mehr als zwei Eltern miteinander vermischt werden, was in der Natur nur bei Viren bekannt ist. Dieser Mechanismus wird „Multi-Rekombination“ bezeichnet. Die andere Variante erlaubt, daß sich μ von einer Generation zur nächsten verändern kann, wie z. B. nach einer sinusförmigen Funktion, was das Phänomen der Populationswellen in der Biologie nachbildet.

Die Evolutionsmechanismen: Chromosomenmutation, Rekombination/Multi-Rekombination und Selektion sind im Modell auf folgende Weise implementiert worden:

1. Chromosomenmutation :

In der Generation g erzeugen μ Eltern = $\{ \mathbf{x}_{E1}^g \rightarrow \mathbf{B}_{E1}^g, \dots, \mathbf{x}_{E\mu}^g \rightarrow \mathbf{B}_{E\mu}^g \}$

λ mutierte Nachkommen in zwei Schritte:

(i) Mutation des Vektors \mathbf{x} und Schrittweiten-Regelung:

$$\mathbf{x}_{Ni}^g = \mathbf{x}_{Ej}^g + \delta_{Ni}^g \mathbf{z}_i \quad (3.10)$$

mit: $\delta_{Ni}^g = \delta_{Ej}^g \xi_i$

für: $i = 1, \dots, \lambda$ und $j \in \{1, \dots, \mu\}$.

Für jeden Nachkommen wird mit gleicher Wahrscheinlichkeit ein Elter gewählt. \mathbf{z} bildet einen Zufallsvektor, dessen Komponenten z_1, \dots, z_n normalverteilte Zufallszahlen sind. Die Normalverteilung hat den Zentralwert Null und die Streuung $\sigma = 1/\sqrt{n}$. Damit wird erreicht, daß die Länge des Zufallsvektors $|\mathbf{z}| \approx 1$ ist (für $n \gg 1$). Indem \mathbf{z} ein Einheitsvektor ist, können die Faktoren $\delta_{N1}, \dots, \delta_{N\lambda}$ als die Mutations-Schrittweiten der Nachkommen in Bezug auf den Elter \mathbf{x}_{Ej}^g im Variablenraum gedeutet werden. Die Größen $\xi_1, \dots, \xi_\lambda$ werden wie folgt bestimmt: Ist $rnd < 0,5$, dann $\xi_i = \alpha$, sonst $\xi_i = 1/\alpha$, mit rnd eine Zufallszahl in $[0, 1]$ und $\alpha = 1,3$.

(ii) Ermittlung der λ Nachkommen = $\{\mathbf{x}_{N1}^g \rightarrow \mathbf{B}_{N1}^g, \dots, \mathbf{x}_{N\lambda}^g \rightarrow \mathbf{B}_{N\lambda}^g\}$.

2. Rekombination/Multi-Rekombination :

In der Generation g werden mit gleicher Wahrscheinlichkeit ρ ($2 \leq \rho \leq \mu$) aus μ Eltern gewählt, die den variierten Nachkommen \mathbf{B}_N^g erzeugen. Der Nachkomme \mathbf{B}_N^g wird aus den von ρ Eltern zur Verfügung stehenden Kanten zusammengesetzt. Der Vektor \mathbf{x}_N^g wird entsprechend aus den dazugehörigen \mathbf{x} -Vektoren der Eltern gebildet, und δ_N^g als Mittelwert der δ -Werte der Eltern berechnet.

3. Selektion :

- (i) In der Plus-Version: Eltern und Nachkommen der Generation g gelangen in eine Selektionsurne. Die μ besten werden zu Eltern der nächsten Generation ($g+1$).
- (ii) In der Komma-Version: Nur die Nachkommen der Generation g gelangen in eine Selektionsurne. Die μ besten Nachkommen werden zu Eltern der folgenden Generation ($g+1$).

3.3 Designoptimierung

3.3.1 Dynamische Programmierung

3.3.1.1 Einführung

Die Dynamische Programmierung (*Dynamic Programming*) wurde als mathematische Theorie für mehrstufige Entscheidungsprozesse (*multistage decision processes*) von Richard Bellman in den 1950-er Jahren (Bellman [11, 12]) entwickelt. Als ein Optimierungsverfahren des *Operations Research* gehört es neben dem *Branch-and-Bound* Verfahren und der begrenzten Enumeration zu den „Entscheidungsbaumverfahren“, die im Prinzip in einer Enumeration bestehen, in der Aufzählung aller möglichen Lösungen, um dann die Auswahl der besten Lösung zu treffen, wobei im Laufe des Enumerationsprozesses Lösungen ausgeschieden werden, wenn dafür bessere Lösungen festgestellt werden (Müller-Merbach [69]). Die Dynamische Programmierung behandelt Aufgaben, die in einzelne „Stufen“ zerlegt werden können, so daß die Gesamtoptimierung durch eine „stufenweise Optimierung“ ersetzt werden kann. Diese Vorgehensweise ist im Optimalitätsprinzip von Bellman [11] beinhaltet:

An optimal policy has the property that whatever the initial state and decisions are, the remaining decisions must constitute an optimal policy with regard to the state resulting from the first decision.

Im Unterschied zu anderen Optimierungsverfahren, wie z. B. der Linearen Programmierung, gibt es keine mathematische Standardformulierung zur algorithmischen Lösung der Aufgabe (Hillier u. Lieberman [46], Neumann u. Morlock [70]).

Merkmale von Aufgaben der Dynamischen Programmierung sind folgende:

- (i) Wie oben angeführt kann die Aufgabe in „Stufen“ (*stages*) zerlegt werden, auf jeder Stufe ist eine „Entscheidung“ (*decision*) über die einzuschlagende „Strategie“ (*policy*) erforderlich,
- (ii) auf jeder Stufe besteht eine Anzahl von „Zuständen“ (*states*), die das System aufweisen kann,

- (iii) eine Entscheidung auf einer Stufe bewirkt eine Transformation (*transformation*), d. h. der momentane Zustand geht in einen Zustand über, der den Input zur nächsten Stufe bildet,
- (iv) das Ziel des Lösungsverfahrens ist, einzelne Funktionen der Zustandsvariablen in Abhängigkeit von vorausgegangenen Zuständen zu optimieren, so daß die „optimale Strategie“ (*optimal policy*) für das gesamte System gefunden wird.

3.3.1.2 Lösungsalgorithmus

Die Dynamische Programmierung (DP) erweist sich als effizientes Verfahren, um Entwässerungssysteme für vorgegebene Netztopologien optimal zu entwerfen (s. Abschnitt 2.2). Die DP vereinfacht die Behandlung der im Kanalnetz stattfindenden räumlichen und zeitlichen Prozesse. Das Kanalnetz wird als ein System sequentiell durchflossener Stufen erfaßt, was die Einbeziehung der zu berücksichtigenden planungstechnischen Aspekte, wie zeitvarianter oder -invarianter Belastungsabflüsse, beliebiger Querschnittsformen der Profile, Berechnung der Kanalneigung je nach Wahl des hydraulischen Ansatzes, haltungsbezogener Abflußberechnung, beliebig strukturierter Kostenfunktionen, technischer Restriktionen für die Fließgeschwindigkeit, Verlegungstiefe, Kanalneigung, Volumen der Speicherelemente etc gestattet.

Der vorliegende Lösungsalgorithmus zur Designoptimierung ist aus dem Verfahren von Cembrowicz u. Krauter [18] entwickelt worden. Dieses Verfahren ist im Abschnitt 2.2 im Detail beschrieben worden. Im Vergleich zu ihm liegt ein wichtiger Unterschied der neuen Entwicklung darin, wie in einer Stufe die Lösungen, die in der nachfolgenden Stufe im Prozeß zur Gesamtoptimierung weiterverfolgt, gewählt werden. Außerdem ist das Verfahren von Cembrowicz u. Krauter [18] im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf die Berechnung des kritischen und schießenden Fließzustands erweitert worden (s. Abschnitt 3.3.3). Diese Unterschiede werden an den entsprechenden Stellen im folgenden Text erläutert.

Im vorliegenden Lösungsverfahren wird folgendes angenommen oder vorausgesetzt:

1. Der Graph des Kanalsystems ist ein zyklensfreier Digraph (s. Abschnitt 3.2.1),

2. die Geländehöhen sind an den Knoten bekannt, und die Geländeoberkante verläuft linear zwischen den Knoten, die durch eine Haltung miteinander verbunden sind,
3. der Standort der Senke (s. Gl. 3.3) ist vorgegeben, mit der Randbedingung: Freier Auslaß,
4. Regenwasser- und/oder Trockenwettereinleitungen finden an den Knoten des Kanalnetzes statt,
5. der Zufluß am Anfang einer Haltung ergibt sich aus der Summe der Abflüsse der stromaufwärts liegenden Haltungen und dem am Knoten anfallenden Regenwasser- und/oder Trockenwetterabfluß,
6. ein Knoten wird –unter Freispiegelabfluß im Zulauf und Auslauf– ohne Speichervermögen angenommen, zu jedem Zeitpunkt ist die Bilanz der Zu- und Abflüsse gleich Null, s. Gleichung 3.32, wobei $Q_i(t)$ die Abflüsse der stromaufwärts liegenden Haltungen, $Q_i^{zu}(t)$ die Einleitungen in den Knoten, und $Q_i^{ab}(t)$ die Entnahmen (z. B. wegen eines Speicherelements) sind; die Zuflüsse in den Knoten werden positiv, die Ausflüsse negativ angenommen,
7. minimal und maximal zulässige Fließgeschwindigkeiten (v^{min} und v^{max} , s. Gl. 3.39) und Verlegungstiefen (s^{min} und s^{max} , s. Gl. 3.40, 3.41, 3.46 und 3.47) sowie die minimal zulässige Überdeckung im Fall geschlossener Querschnittsformen (\ddot{u}^{min} , s. Gl. 3.42 und 3.43) sind gegeben,
8. die Einbautiefe einer Haltung (s_j) ist gleich dem Mittelwert der Sohlentiefen am Haltungsanfang (s_j^a) und Haltungsende (s_j^e) (s. Gl. 3.44),
9. weder in einem Schacht noch in einer Haltung bildet sich ein Wechselsprung,
10. die Kanäle werden als Freispiegelkanäle nach der Prandtl-Colebrook Gleichung (s. Gl. 3.50) oder Gauckler-Manning-Strickler Gleichung (s. Gl. 3.51) bemessen, Rauigkeitswerte sind einzugeben,
11. im Fall des strömenden Fließzustands wird als Randbedingung am Haltungsende die Grenztiefe, wenn ein Absturz vorhanden ist, sonst die Normalabflußtiefe angenommen (s. Abschnitt 3.3.3.3),

12. im Fall des kritischen oder schießenden Fließzustands wird als eine Randbedingung am Haltungsanfang die Grenztiefe angenommen (s. Abschnitt 3.3.3.3),
13. an einem Knoten wird –unter Freispiegelabfluß– in den Zulaufkanälen freier Ausfluß in den Knoten und kein Rückstau vom Auslaufkanal angenommen.

Das Kanalsystem wird durch Iso-Knoten-Linien (IKL) in Stufen aufgeteilt (Argaman et al. [3], Mays u. Wenzel [63]), so daß der Entscheidungsprozeß der DP stufenweise angewendet werden kann. Knoten, die durch die gleiche Anzahl von Kanten mit der Senke verbunden sind, gehören zu einer IKL (s. Abb. 3.1).

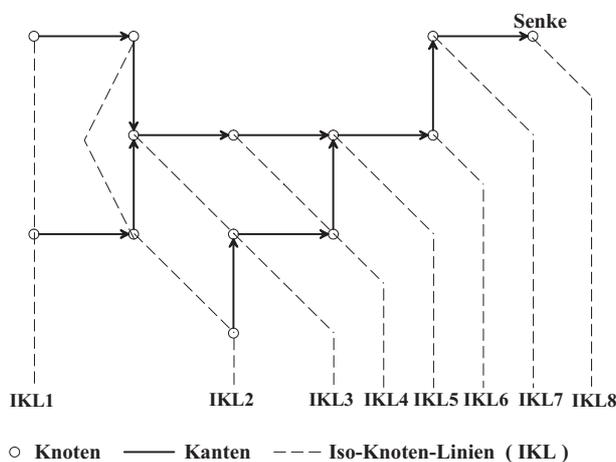


Abbildung 3.1: Iso-Knoten-Linien

Eine Stufe n der Sequenz kann aus mehreren Kanten oder Haltungen –ggf. einschließlich Schacht am Haltungsanfang– bestehen, die zwischen der IKL n und der IKL $(n+1)$ modelliert werden, wobei $n = 1, \dots, N$ und N die Anzahl der Stufen im System ist.

Die Sohltiefe am Anfang einer Kante j (s_j^a), die Sohltiefe am Ende der Kante j (s_j^e), der anfallende Abfluß (Q_j) und die zugehörige Wassertiefe (y_j), mit $j \in E'$ (s. Abschnitt 3.2.1), sind Zustandsvariablen. Die für die Kante j zur Verfügung stehenden und zulässigen Profile (D_j) stellen die Entscheidungsvariable dar.

Der Bereich zwischen der minimal und maximal zulässigen Sohltiefe am Anfang ($s_j^{a,min}$ und $s_j^{a,max}$) und am Ende ($s_j^{e,min}$ und $s_j^{e,max}$) der Haltung j wird diskre-

tisiert. Das Tiefenintervall Δs ist ein Eingabeparameter. Am Haltungsanfang ergibt sich die Anzahl der Tiefenintervalle aus $(s_j^{a,max} - s_j^{a,min})/\Delta s$ und am Haltungsende aus $(s_j^{e,max} - s_j^{e,min})/\Delta s$.

Am Anfang einer Haltung j , beginnend mit der minimal zulässigen Sohllentiefe ($s_j^{a,min}$) oder der ersten der zu berücksichtigenden Sohllentiefen (s_j^a , mit: $s_j^{a,min} \leq s_j^a \leq s_j^{a,max}$), wird für jedes verfügbare und zulässige Profil d_j ($d_j \in D_j$) das Sohlengefälle der Kante j ($I_{S,j}$) zur Ableitung des Spitzenwertes der in die Kante einfließenden Abwasserwelle (Q_j^{max}) unter der Annahme des stationär gleichförmigen Abflusses und der Einhaltung der technischen Restriktionen berechnet (s. Abschnitt 3.3.2). Außerdem ergeben sich folgende Systemgrößen: Die Sohllentiefe am Ende der Kante j (s_j^e) als eine Funktion (f_j) von der Sohllentiefe am Anfang der Kante j (s_j^a), der Kanalneigung ($I_{S,j}$) und der Länge der Kante j (l_j):

$$s_j^e = f_j (s_j^a, I_{S,j}, l_j) , \quad s_j^e \in [s_j^{e,min}, s_j^{e,max}] , \quad (3.11)$$

die Abflußganglinie ($Q_j(x = l_j, t)$) und die zugehörigen Wassertiefen ($y_j(x = l_j, t)$) am Ende der Kante j als Funktionen, jeweils (F_j^Q) und (F_j^y), von dem Profil (d_j), dem Sohlengefälle ($I_{S,j}$) und den Randbedingungen für den Abfluß ($Q_j(x = 0, t)$) und für die Wassertiefe ($y_j(x = 0, t)$ oder $y_j(x = l_j, t)$):

$$Q_j(x = l_j, t) = F_j^Q(d_j, I_{S,j}, Q_j(x = 0, t), y_j(x = 0, t) \vee y_j(x = l_j, t)) \quad (3.12)$$

$$y_j(x = l_j, t) = F_j^y(d_j, I_{S,j}, Q_j(x = 0, t), y_j(x = 0, t) \vee y_j(x = l_j, t)) \quad (3.13)$$

mit: x die Raumachse, t die Zeitachse.

Die Ganglinien $Q_j(x = l_j, t)$ und $y_j(x = l_j, t)$ am Ende der Haltung j resultieren aus der Abflußberechnung. Im vorliegenden Modell wird eine hydrodynamische Abflußberechnung auf der Grundlage des Saint-Venant Differentialgleichungssystems vollzogen (s. Abschnitt 3.3.3).

Daher ist der resultierende Systemzustand \tilde{S}_j am Ende der Kante j , gebildet durch die Sohllentiefe s_j^e , den Abfluß Q_j und die Wassertiefe y_j , eine Funktion (f) vom Systemzustand am Haltungsanfang (S_j) und der für die Haltung j getroffenen Entscheidung (d_j):

$$\tilde{S}_j = f(S_j, d_j) \quad (3.14)$$

\tilde{S}_j und die Kosten der Haltung (c), die ebenfalls eine Funktion von S_j und d_j sind:

$$c = c(S_j, d_j) \quad (3.15)$$

werden dem entsprechenden Sohlflächenintervall am Ende der Haltung j zugeordnet.

Der Prozeß wiederholt sich für jede der am Anfang der Kante j zu berücksichtigenden Sohlflächen. Die resultierenden Systemzustände und die zugehörigen Kosten werden jeweils nach der Sohlfläche dem entsprechenden Tiefenintervall am Ende der Kante j zugeordnet.

Gemäß dem Optimalitätsprinzip von Bellman (s. o.) sind die im Prozeß zur Gesamtoptimierung verbleibenden Entscheidungen auf die Weise zu treffen, daß sie die optimale Strategie darstellen. Übertragen auf den vorliegenden Algorithmus wird innerhalb eines Tiefenintervalls das Profil d_j gewählt, das die Kosten minimiert:

$$c^* = \min_{d_j} c(S_j, d_j) \quad (3.16)$$

Die Auswahl der besten Lösung innerhalb eines Sohlflächenintervalls am Ende der Kante j erfolgt wie im folgenden beschrieben. Lösung 1 für die Kante j –mit den Kosten $c_{j,1}$, dem max. Abflußwert am Haltungsende $Q_{j,1}^{max}|_{x=l_j}$, der max. Wasserspiegelhöhe über dem Nullniveau am Haltungsende $h_{j,1}^{max}|_{x=l_j}$ oder der Scheitelhöhe im Fall geschlossener Profile– ist besser als Lösung 2 –mit den gehörigen Größen $c_{j,2}$, $Q_{j,2}^{max}|_{x=l_j}$, $h_{j,2}^{max}|_{x=l_j}$ – in den folgenden Fällen:

- (i) $c_{j,1} < c_{j,2}$
- (ii) $Q_{j,1}^{max}|_{x=l_j} < Q_{j,2}^{max}|_{x=l_j}$
für: $c_{j,1} = c_{j,2}$
- (iii) $h_{j,1}^{max}|_{x=l_j} \geq h_{j,2}^{max}|_{x=l_j}$
für: $c_{j,1} = c_{j,2} \wedge Q_{j,1}^{max}|_{x=l_j} = Q_{j,2}^{max}|_{x=l_j}$

Im Verfahren wird dann die beste Lösung aus jedem Tiefenintervall am Ende einer Kante j auf der Stufe n in der nachfolgenden Stufe ($n + 1$) des gesamten Systems weiterverfolgt.

Wie am Anfang dieses Abschnitts geschrieben, liegt ein wichtiger Unterschied zwischen dem von Cembrowicz u. Krauter [18] entwickelten Verfahren und dem vorliegenden Algorithmus darin, welche Lösungen für eine Kante j in der nächsten Stufe weiterverfolgt werden. Im Verfahren von Cembrowicz u. Krauter [18] wird Lösung 1 für die Kante j –mit der Sohlentiefe $s_{j,1}$, dem max. Abflußwert am Haltungsende $Q_{j,1}^{max}|_{x=l_j}$ und den Kosten $c_{j,1}$ – eliminiert, wenn Lösung 2 –mit den gehörigen Größen $s_{j,2}$, $Q_{j,2}^{max}|_{x=l_j}$, $c_{j,2}$ – in der folgenden Relation zur Lösung 1 vorhanden ist:

$$s_{j,1} > s_{j,2} \quad \wedge \quad Q_{j,1}^{max} > Q_{j,2}^{max} \quad \wedge \quad c_{j,1} > c_{j,2}$$

Lösung 1 wird am Ende der Kante j eliminiert. Befinden sich Lösung 1 und Lösung 2 in verschiedenen Sohlentiefenintervallen, dann geht die Lösung 1 vom entsprechenden Tiefenintervall, von dem aus eine Lösung in den nächsten Stufen zur Gesamtoptimierung die optimale Strategie darstellen könnte, verloren.

Im Fall, daß mehrere Kanten an einem Knoten zusammenkommen, werden im vorliegenden Verfahren die Lösungen der einzelnen Kanten miteinander kombiniert. Ist die Sohlentiefe von Lösung 1 größer gleich als die von Lösung 2, dann wird die Sohlentiefe am Knoten für die Nachfolgekante gleich der von Lösung 1 gesetzt.

Die ausgewählten Lösungen am Ende einer Kante j auf der Stufe n werden in eine Endmatrix abgespeichert, die Anfangsmatrix der Nachfolgekante auf der Stufe $(n + 1)$ wird (s. Abb. 3.3). In einem Verfahrensschritt werden die Kanten zwischen der IKL n und der IKL $(n + 1)$ bearbeitet.

Die Kosten für ein Netzteil bis zu einer Haltung j auf der Stufe n (c) ergeben sich aus den Kosten für das Netzteil bis zur Stufe $(n - 1)$, die die minimalen Kosten (c_{n-1}^*) dafür darstellen (aus Gl. 3.16), und den Kosten der Haltung j ($c(S_j, d_j)$), ggf. einschließlich Schacht am Haltungsanfang:

$$c = c(S_j, d_j) + c_{n-1}^* \quad (3.18)$$

mit: $c_0^* = 0$.

Die minimalen Kosten bis zur Haltung j auf der Stufe n sind dann:

$$c^* = \min_{d_j} [c(S_j, d_j) + c_{n-1}^*], \quad (3.19)$$

und bis zur Stufe n einschließlich jeder Kante j zwischen den IKL n und IKL $(n+1)$:

$$c_n^* = \sum_j \min_{d_j} [c(S_j, d_j) + c_{n-1}^*] \quad (3.20)$$

mit: $\forall j \in E'$ (s. Abschnitt 3.2.1) und $\forall j$ auf der Stufe n .

Daraus folgt: Die minimalen Kosten des gesamten Netzdesigns für das Netzlayout B_k , Element der Menge aller möglichen Layouts (B), sind c_N^* , die $c_{B_k}^*$ der Gleichung 1.2 entsprechen:

$$c_{B_k}^* = c_N^* \quad (3.21)$$

Andere Netzelemente, wie Pumpwerke (PW) und Regenbecken (RB), können in den Optimierungsablauf eingebunden werden. Unter Angabe der Standorte können diese Sonderbauwerke durch Indizierung der Knoten im Kanalnetz eingefügt werden. Ein Pumpwerk oder ein Regenbecken wird am Anfang einer Haltung zusammen mit der unmittelbar stromabwärts liegenden Haltung zwischen zwei Iso-Knoten-Linien modelliert.

Im Fall eines Pumpwerks am Knoten i (mit $i \in I^{PW}$, s. Abschnitt 3.2.1) wird im Algorithmus zur Ermittlung der wirtschaftlich optimalen Lösung der Zustandsraum am Anfang der Kante um den Förderstrom und das Pumpensumpfvolumen erweitert. Es wird mit der Förderhöhe als Entscheidungsvariable gerechnet, und folgendes vorausgesetzt: (i) In den Haltungen oberhalb und unterhalb des Pumpwerks fließt das Abwasser unter Gravitationskraft, (ii) die Förderhöhe ist gleich der Differenz zwischen der größten Sohlentiefe aller am Knoten i zulaufenden Kanten (s^e) und der Sohlentiefe der auslaufenden Kante (s^{PW}) (s. Abb. 3.2).

Im vorliegenden Optimierungsmodell sind drei Pumpwerkstypen implementiert worden:

(Typ 1) on-line Pumpe mit konstantem Inkrement der Förderhöhe (Δh),

(Typ 2) on-line Pumpe mit vorgeg. Förderhöhen ($H_1, \dots, H_k, \dots, H_n$),

(Typ 3) off-line Pumpe mit Pumpensumpf,

mit vorgeg. Pumpenkennlinie $((Q_1^{PW}, H_1), \dots, (Q_k^{PW}, H_k), \dots, (Q_n^{PW}, H_n))$,

mit: $k = 1, \dots, n$.

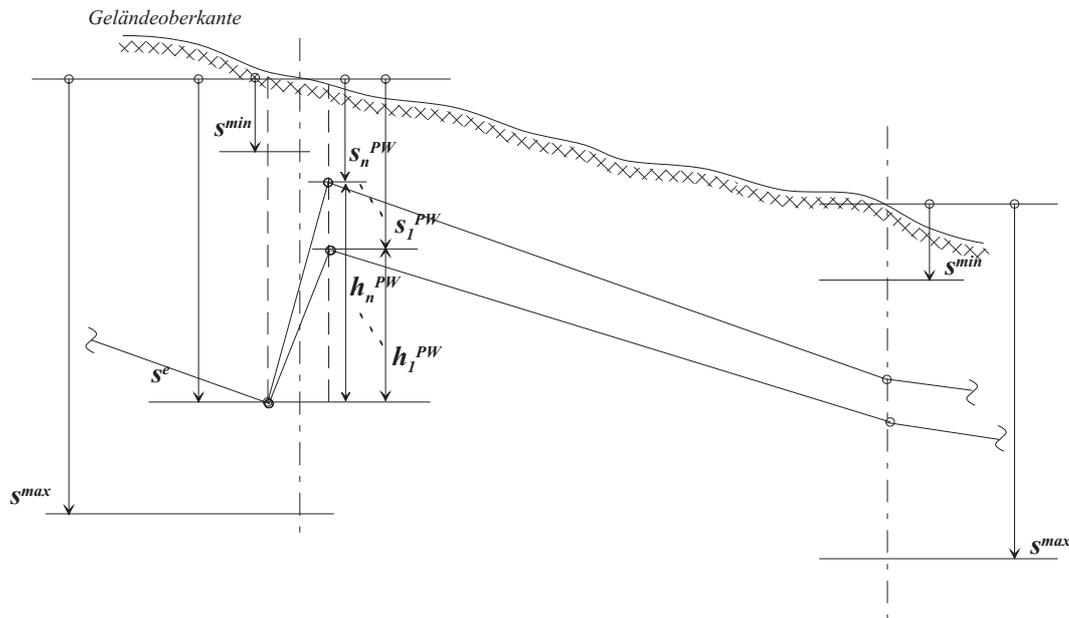


Abbildung 3.2: Lösungsfindung mit Pumpwerk

Ausgehend von den Eingabedaten für die Förderhöhe und den Förderstrom werden die zu berücksichtigenden Förderhöhen wie folgt bestimmt (s. Abb. 3.2), für den Typ 1:

$$h_k^{PW} = k \cdot \Delta h \quad (3.22)$$

und für den Typ 2 und 3:

$$h_k^{PW} = H_k \quad (3.23)$$

Beim Typ 1 und 2 wird die Zuflußreihe $Q(t)$ am Knoten i unverändert befördert. Die mit der Förderhöhe h_k^{PW} zusammenhängenden Sohlentiefe der am Pumpwerk auslaufenden Kante (s_k^{PW}) ergibt sich dann aus:

$$s_k^{PW} = s^e - h_k^{PW} \quad (3.24)$$

und es wird überprüft, ob diese im zulässigen Bereich liegt (s. Abb. 3.2):

$$s^{min} \leq s_k^{PW} \quad (3.25)$$

Mit jeder der resultierenden Sohlentiefen s_k^{PW} wird der Entscheidungsprozeß zur Dimensionierung der unterhalb des Pumpwerks zu verlegenden Haltung ausgeführt. Dieser

Prozeß besteht darin, für jedes für die Haltung verfügbare zulässige Profil werden der Systemzustand und die zugehörigen Kosten ermittelt und dem entsprechenden Sohl-tiefenintervall am Haltungsende zugeordnet (s. o.). Der Prozeß wiederholt sich so oft wie die Anzahl der zu berücksichtigenden Förderhöhen oder bis die Sohlentiefe s_k^{PW} in unzulässigen Bereich fällt.

Beim Typ 3 können zusätzlich eine Grundfläche (A^{PW}) und ein maximal zulässiges Vo-lumen ($V^{PW,max}$) für den Pumpensumpf eingegeben werden. Sind die Abflußwerte der am Knoten i anfallenden Welle $Q(t)$ jeweils kleiner als der vorgegebene Förderstrom Q_k^{PW} , dann findet keine vorläufige Speicherung des Abwassers im Pumpensumpf statt, und die Welle $Q(t)$ wird unverändert befördert. Die Sohlentiefe der am Pumpwerk aus-laufenden Haltung (s_k^{PW}) ergibt sich wie beim Typ 1 und 2 aus der Sohlentiefe s^e und den zu berücksichtigenden Förderhöhen (s. Gl. 3.24 u. Abb. 3.2) und wird gleichfalls auf Zulässigkeit überprüft (s. Gl. 3.25). Mit dem Förderstrom Q_k^{PW} und der Zuflußreihe $Q(t)$ wird das Volumen des Pumpensumpfs V_k^{PW} am Knoten i ermittelt:

$$V_k^{PW} = \sum_t (Q(t) - Q_k^{PW}) \Delta t, \quad \{\forall t \mid (Q(t) - Q_k^{PW}) \geq 0\} \quad (3.26)$$

und es kann verifiziert werden, ob dieses kleiner gleich dem eingegebenen maximal zulässigen Volumen ($V^{PW,max}$) ist:

$$V_k^{PW} \leq V^{PW,max} \quad (3.27)$$

Die Zuflußreihe $Q(t)$ wird beim Typ 3 entsprechend der vorläufigen Retention im Pum-pensumpf verändert. Mit dem Volumen V_k^{PW} und der Grundfläche A^{PW} des Pumpen-sumpfs kann dessen Höhe bestimmt werden.

Die Kosten jeder Lösung werden mit der vorgegebenen entsprechenden Kostenfunktion errechnet, wobei neben den Baukosten die Kosten für den Betrieb, die Wartung und die Instandhaltung des Sonderbauwerks zu berücksichtigen sind, um eine realistische Wirtschaftlichkeitsuntersuchung durchzuführen.

Im Fall eines Regenbeckens wird durch die Verringerung des Spitzenabflusses mi-ttels Speicherung eine Kosteneinsparung beim Bau des Entwässerungssystems verfolgt (s. ATV-DVWK-A 117 [5]), denn unterhalb des Rückhalteraaumes können kleinere Ka-

nalquerschnitte gewählt werden. Neben dieser Zielsetzung, der Abflußdämpfung, werden im Modell noch keine anderen Aspekte, wie z.B. bezüglich des Gewässerschutzes, berücksichtigt.

Für das am Knoten i (mit $i \in I^{RB}$, s. Abschnitt 3.2.1) zu berechnende Regenbeckenvolumen kann im vorliegenden Modell ein maximal zulässiges Volumen ($V^{RB,max}$) eingegeben werden. Zur Ermittlung der optimalen Lösung wird der Spitzenwert Q^{max} der am Knoten i anfallenden Zuflußreihe $Q(t)$ mit Hilfe des Eingabeparameters N^{RB} diskretisiert. Daraus folgt für die Drosselabflüsse Q_k^{RB} :

$$Q_k^{RB} = \left(1, 0 - \frac{k-1}{N^{RB}}\right) Q^{max} \quad (3.28)$$

mit: $k = 1, \dots, N^{RB}$.

Für jeden dieser Drosselabflüsse (Q_k^{RB}) wird das Beckenvolumen am Knoten i (V_k^{RB}) aus der Zuflußreihe $Q(t)$ folgendermaßen errechnet:

$$V_k^{RB} = \sum_t (Q(t) - Q_k^{RB}) \Delta t, \quad \{\forall t \mid (Q(t) - Q_k^{RB}) \geq 0\} \wedge V_k^{RB} \leq V^{RB,max} \quad (3.29)$$

und die Zuflußreihe $Q(t)$ entsprechend dem stattgefundenen Retentionsvorgang geändert. In diesem Optimierungsalgorithmus wird es mit dem Drosselabfluß (Q_k^{RB}) als Entscheidungsvariable und mit dem Regenbeckenvolumen (V_k^{RB}) als Zustandsvariable gerechnet. Die resultierenden Lösungen werden systematisch untersucht, dabei soll die eingegebene Kostenfunktion für das Regenbecken neben dem Bau den Betrieb, die Wartung und die Instandhaltung berücksichtigen, damit das Modell dem aufgrund kleinerer Profile unterhalb der Entlastung möglichen resultierenden wirtschaftlichen Vorteil die gesamten entstehenden Regenbeckenkosten gegenüberstellen kann, um die beste Lösung zu finden.

Abbildung 3.3 zeigt den Entscheidungsprozeß nach der Dynamischen Programmierung für eine Haltung j , mit Pumpwerk oder Regenbecken am Haltungsanfang, auf der Stufe n des Kanalsystems.

Abbildung 3.4 stellt den Algorithmus zur Designoptimierung als Flußdiagramm dar. Dann können die minimalen Kosten des Kanalsystems $c_{B_k}^*$ (s. Gl. 1.2, 3.21) für eine vorab bestimmte Netztopologie B_k , in Abhängigkeit von den Kosten der Schächte,

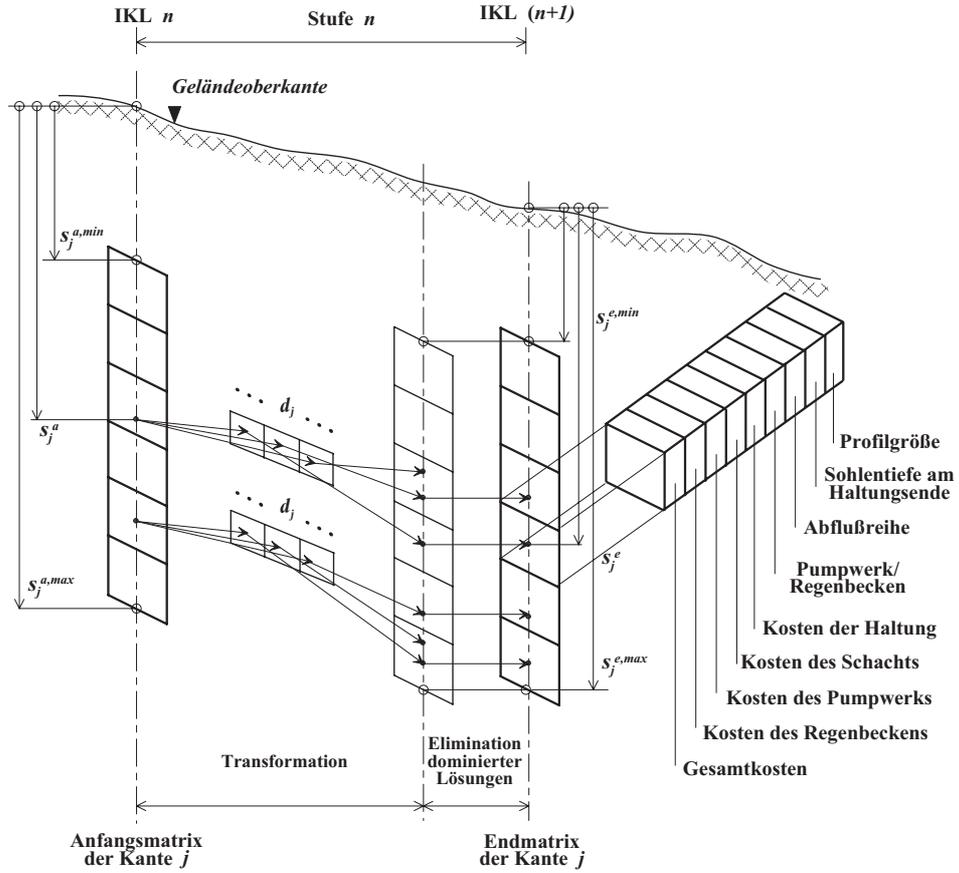


Abbildung 3.3: Entscheidungsprozess nach der Dynamischen Programmierung

Haltungen, Pumpwerke und Regenbecken, wie folgt formuliert werden:

$$c_{B_k}^* = \min \left\{ \sum_i c_i (s_i^S) + \sum_j c_j (d_j, s_j^a, s_j^e) + \sum_i c_i (h_i^{PW}, Q_i^{PW}, V_i^{PW}) + \sum_i c_i (V_i^{RB}) \right\} \quad (3.30)$$

mit:

$\sum_i c_i (s_i^S)$	Kosten der Schächte, $\forall i \in I^S, I^S \subset V$
$\sum_j c_j (d_j, s_j^a, s_j^e)$	Kosten der Haltungen, $\forall j \in E'$
$\sum_i c_i (h_i^{PW}, Q_i^{PW}, V_i^{PW})$	Kosten der Pumpwerke, $\forall i \in I^{PW}, I^{PW} \subset V$
$\sum_i c_i (V_i^{RB})$	Kosten der Regenbecken, $\forall i \in I^{RB}, I^{RB} \subset V$

unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen, die die Einhaltung der planerischen und technischen Restriktionen sichern:

$$\sum_i \sum_t Q_i^{zu}(t) \Delta t = \sum_t Q_{iS}^{ab}(t) \Delta t \quad \forall i \in V \quad (3.31)$$

$$\sum_t (Q_i(t) + Q_i^{zu}(t)) \Delta t = \sum_t Q_i^{ab}(t) \Delta t \quad \forall i \in V \quad (3.32)$$

$$I_{S,j} > 0 \quad \forall j \in E' \quad (3.33)$$

$$s_j^e = g_j^e - [(g_j^a - s_j^a) - I_{S,j} l_j] \quad \forall j \in E' \quad (3.34)$$

$$Q_j^{d_j} \leq Q_j^{d_j, voll} \quad \forall j \in E', \forall d_j \in D_j \quad (3.35)$$

$$Q_j(x, t) = F_j^Q(d_j, I_{S,j}, Q_j(0, t), y_j(0, t) \vee y_j(l_j, t)), \quad \forall j \in E' \quad (3.36)$$

$$y_j(x, t) = F_j^y(d_j, I_{S,j}, Q_j(0, t), y_j(0, t) \vee y_j(l_j, t)), \quad \forall j \in E' \quad (3.37)$$

$$v_j(x, t) = \begin{cases} \frac{Q_j(x, t)}{A_j(y_j(x, t))}, & y_j(x, t) > 0 \\ 0, & y_j(x, t) = 0 \end{cases} \quad \forall j \in E' \quad (3.38)$$

$$v_j^{min} \leq v_j(x, t) \leq v_j^{max} \quad \forall j \in E' \quad (3.39)$$

$$s_j^{a, min} \leq s_j^a \leq s_j^{a, max} \quad \forall j \in E', \forall d_j \in D_j \quad (3.40)$$

$$s_j^{e, min} \leq s_j^e \leq s_j^{e, max} \quad \forall j \in E', \forall d_j \in D_j \quad (3.41)$$

$$\ddot{u}_j^{a, min} \leq s_j^a - d_j \quad \forall j \in E', \forall d_j \in D_j \quad (3.42)$$

$$\ddot{u}_j^{e, min} \leq s_j^e - d_j \quad \forall j \in E', \forall d_j \in D_j \quad (3.43)$$

$$s_j = \frac{s_j^a + s_j^e}{2} \quad \forall j \in E' \quad (3.44)$$

$$s_i^S = s_j^a \quad \forall i \in I^S, I^S \subset V \quad (3.45)$$

$$s_i^{min} \leq s_i^S \leq s_i^{max} \quad \forall i \in I^S, I^S \subset V \quad (3.46)$$

$$s_i^{min} \leq s_i^{PW} \leq s_i^{max} \quad \forall i \in I^{PW}, I^{PW} \subset V \quad (3.47)$$

$$V_i^{PW} \leq V_i^{PW, max} \quad \forall i \in I^{PW}, I^{PW} \subset V \quad (3.48)$$

$$V_i^{RB} \leq V_i^{RB, max} \quad \forall i \in I^{RB}, I^{RB} \subset V \quad (3.49)$$

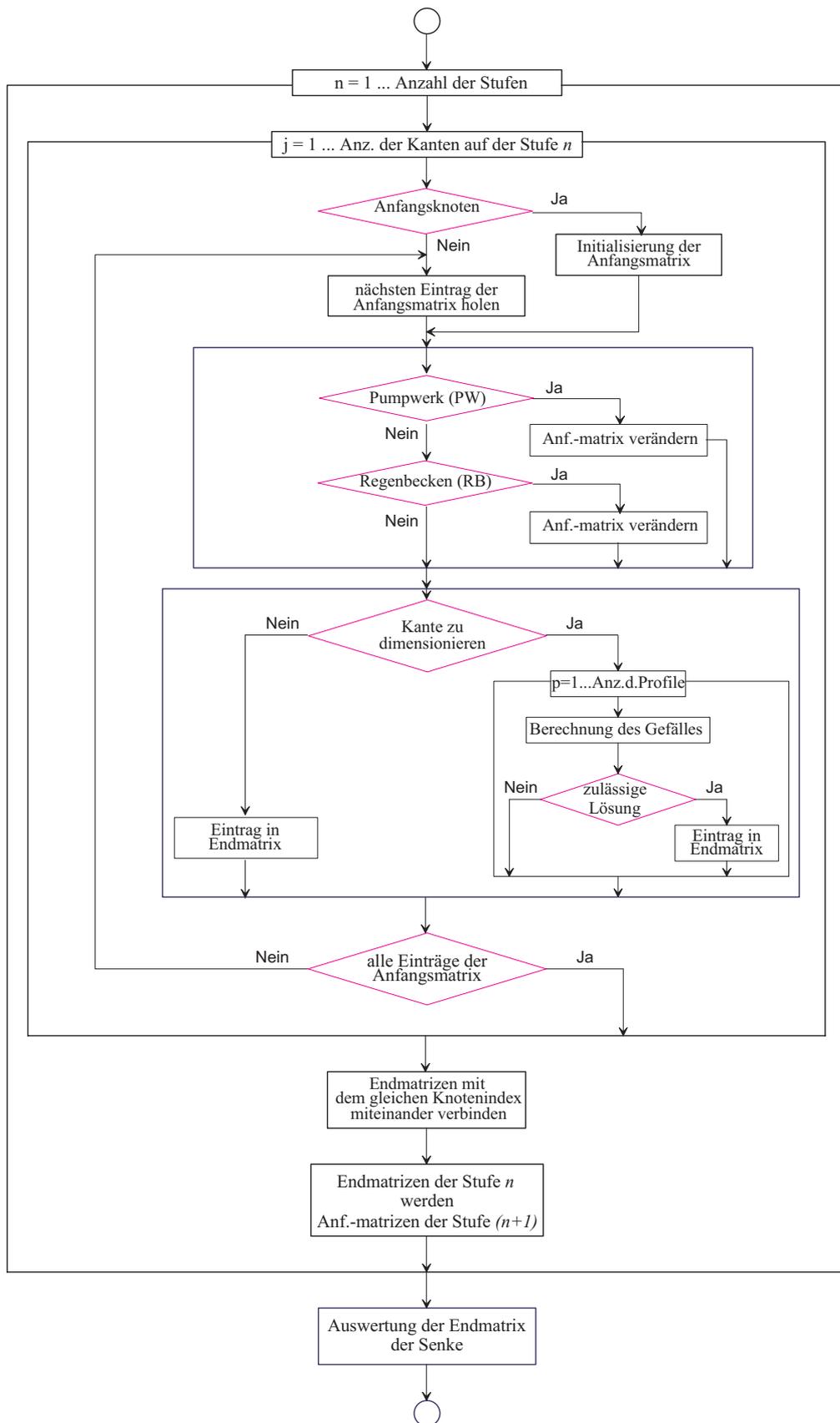


Abbildung 3.4: Flußdiagramm für die Designoptimierung

3.3.2 Berechnung der Kanalneigung

Zum Design der Kanäle wird im vorliegenden Modell von vorgegebenen Bemessungsabflüssen ausgegangen. Nach dem Stand der Technik erfolgt die Bemessung von offenen und geschlossenen Kanälen unter der Annahme des stationär gleichförmigen Abflusses (s. ATV-DVWK-A 110 [4], Weiß [108]). Für das vollgefüllte Rohr lautet die „allgemeine Abflußformel“:

$$Q = A \left[-2,0 \lg \left(\frac{2,51 \nu}{4 R \sqrt{8 g R I_E}} + \frac{k}{14,84 R} \right) \sqrt{8 g R I_E} \right] \quad (3.50)$$

mit:

A	durchflossene Fläche [m^2]
ν	kinematische Zähigkeit [$\frac{m^2}{s}$]
k	Rauheit [m]
g	Gravitationskonstante [$\frac{m}{s^2}$]
R	hydraulischer Radius [m]
I_E	Energieliniengefälle.

Im Abwasserwesen gilt die Gleichung generell für Kreis-, Ei- und Maulquerschnitte sowie für Rinnenquerschnitte. Im Fall des Kreisrohres, mit Durchmesser d , gilt: $4R = d$. Im Fall des stationär gleichförmigen Abflusses wird bei Scheitelfüllung das Energieliniengefälle I_E durch das Sohlengefälle I_S ersetzt. Der Term k ist die hydraulisch wirksame Rauheit der Rohrrinnenwandung, durch die Prandtl-Colebrook Gleichung definiert (s. Gl. 3.60) und exakt nur durch hydraulische Versuche bestimmbar. Da das detaillierte Erfassen aller Einzelverluste zu aufwendig ist, erlaubt das Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 110 [4] das Zusammenfassen der längs eines Kanalstranges – durch Schächte, Stöße usw. – auftretenden lokalen Verluste zusammen mit der Rauheit der Rohrwandung zu einer betrieblichen Rauheit k_b ($k = k_b$).

Die Strömung in offenen Gerinnen liegt i. d. R. im vollrauhem Bereich. Daher stellt in diesem Fall die Beziehung nach Gauckler-Manning-Strickler eine Alternative zur Gleichung 3.50 dar. Die Abflußformel lautet:

$$Q = k_{St} A R^{\frac{2}{3}} I_E^{\frac{1}{2}} \quad (3.51)$$

Der Abflußbeiwert k_{St} hängt nur von der Wandrauheit ab, jedoch ist er nur im vollrauen Bereich konstant.

Die Formel 3.50 wird auch auf teilgefüllte Profile wie auf offene Gerinne übertragen.

Für den stationären gleichförmigen Abfluß („Normalabfluß“) verlaufen Energielinie und Wasserspiegellinie parallel zur Sohlenlinie:

$$I_E = I_W = I_S \quad (3.52)$$

so daß Teilfüllungskurven, bei denen sich die Teilfüllungswerte auf die der Vollfüllung beziehen, verwendet werden können. Die Füllhöhe h und die Profilhöhe H werden senkrecht zur Rohrachse gemessen. Die Füllhöhe h und die Wassertiefe y sind durch folgende Beziehung miteinander verknüpft (θ ist der Neigungswinkel der Sohlenlinie):

$$y = \frac{h}{\cos \theta} \quad (3.53)$$

Die Teilfüllungskurve für die Fließgeschwindigkeit lautet (Franke [32], Sauerbrey [83], Tiedt [97]):

$$\frac{v_T}{v_V} = \left(\frac{R_T}{R_V} \right)^{0,625} \quad (3.54)$$

daraus folgt für die Abflüsse:

$$\frac{Q_T}{Q_V} = \frac{A_T}{A_V} \left(\frac{R_T}{R_V} \right)^{0,625} \quad (3.55)$$

Der Einfluß der Luftreibung auf das Abflußverhalten teilgefüllter, geschlossener Profile kann vernachlässigt werden (Tiedt [97]). Die Teilfüllungskurven erreichen theoretisch ein Abflußmaximum bei Fließtiefen, die etwas kleiner als die Fließtiefen bei der Vollfüllung sind. Die Abflüsse im oberen, rückbiegenden Teil der Kennlinie stellen sich in der Praxis nicht ein. Es sind instabile Abflußzustände (Hager [40]). Aufgrund des Lufteinschlusses bei Rohrleitungen, verbunden mit der Gefahr des „Zuschlagens“ im Rohr werden die Teilfüllungskurven für die Abflüsse bei $\frac{Q_T}{Q_V} = 1,0$ abgebrochen. Die Teilfüllungskurve für die Fließgeschwindigkeit wird ebenfalls abgebrochen, ab der Stelle $\frac{h}{H}$, an der $\frac{Q_T}{Q_V} = 1,0$.

Die Teilfüllungskurven beruhen auf dem eindimensionalen Konzept des hydraulischen Radius, welches das Widerstandsverhalten des teilgefüllten Querschnitts über eine empirische Beziehung auf das der Vollfüllung bezieht (s. Gl. 3.54). Dieser Ansatz ist mit Hilfe eines numerischen Modells zur dreidimensionalen Simulation der Strömung verifiziert worden (Kölling [55], Kölling u. Valentin [56], Valentin u. Kölling [98]). Durch eine Sensitivitätsanalyse wurde die Gültigkeit des empirischen Ansatzes nach Gleichung 3.54 für ein Kreisprofil, ein Eiprofil, einen quadratischen Querschnitt, und zwei Rechteckprofile untersucht. Resultierende mittlere Teilfüllungsgeschwindigkeiten v_T wurden mit der jeweiligen mittleren Axialgeschwindigkeit unter Vollfüllung v_V normiert und mit den Werten nach Gleichung 3.54 verglichen. Eine sehr gute Übereinstimmung wurde festgestellt.

Im vorliegenden Optimierungsmodell besteht die Option zur Berechnung der Kanalneigung nach dem Prandtl-Colebrook- oder Gauckler-Manning-Strickler-Ansatz. Außerdem besteht die Option, die Vollfüllungsleistung nur bis 90% auszunutzen und/oder die Profile in der Fließrichtung ausschließlich gleich groß oder größer zu wählen. Das erfolgt im Modell über Steuerungsvariablen. Ansonsten können die Haltungsquerschnitte bis auf die Vollfüllung entwässern sowie in der Fließrichtung beliebig groß gewählt werden. Die Kanalneigung wird unter Einhaltung der vorgegebenen Restriktionen nach Gleichungen 3.50, 3.60 und 3.59 oder Gleichung 3.51 ermittelt.

3.3.3 Abflußberechnung

3.3.3.1 Saint-Venant Differentialgleichungssystem

Grundlage der hydrodynamischen Berechnung ist das partielle, hyperbolische Gleichungssystem von Saint-Venant [82]. Diesem Differentialgleichungssystem zur mathematischen Beschreibung des instationären, leicht ungleichförmigen Fließvorgangs in offenen Gerinnen liegen folgende Annahmen zugrunde:

1. Das Medium ist homogen und inkompressibel, Newton'sches Fluid (ρ ist konstant),
2. die Fließvorgänge sind eindimensional, die Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit verändern sich nur längs der Fließrichtung,

3. gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung und horizontale Wasserspiegellage im Durchflußquerschnitt,
4. die Strömung ist schwach konvergent oder schwach divergent (*gradually varied flow*),
5. hydrostatische Druckverteilung im Durchflußquerschnitt, vertikale Beschleunigungen sind vernachlässigbar,
6. das Sohlgefälle ist konstant und sehr klein ($\cos \theta \approx 1$).

Unter diesen Annahmen sind das Reibungsgefälle I_R und das Energieliniengefälle I_E gleich im Betrag, und die Auswirkung der Rohrreibung auf den Fließvorgang bei instationärer und stationärer Strömung ist als identisch zu betrachten.

Die Ableitung der Differentialgleichungen ist in der Literatur dokumentiert, wie z. B. in Bollrich [14], Chow et al. [21]. Im vorliegenden mathematischen Modell wird das Gleichungssystem bezogen auf ein mit vertikal gemessener Wassertiefe y gravitationsorientiertes Bezugssystem (*gravity oriented coordinates with depth measured vertically*) (Yen [111]) verwendet.

Das Saint-Venant Differentialgleichungssystem besteht aus folgenden Beziehungen:

- (i) Die Kontinuitätsgleichung (ohne seitlichen Zufluß) :

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (3.56)$$

- (ii) Die dynamische Bewegungsgleichung :

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} = I_S - I_R \quad (3.57)$$

mit:

x	Weg [m]	Q	Durchfluß [$\frac{m^3}{s}$]
y	Wassertiefe [m]	A	durchflossene Fläche [m^2]
t	Zeit [t]	I_S	Sohlgefälle
v	Fließgeschwindigkeit [$\frac{m}{s}$]	I_R	Reibungsgefälle
g	Gravitationskonstante [$\frac{m}{s^2}$]		

Die Gleichungen müssen unter gegebenen Anfangs- und Randbedingungen gelöst werden, um eindeutige Lösungen zu erhalten.

3.3.3.2 Berechnungsgrundlagen

Der Niederschlagsabfluß in Kanalisationen kann als eindimensionale, instationäre, ungleichförmige Strömung beschrieben werden, so daß zur Kanalabflußberechnung das Saint-Venant Gleichungssystem verwendet werden kann.

Zur Ermittlung des Reibungsgefälles I_R darf dieses mit ausreichender Genauigkeit durch das Energieliniengefälle I_E ersetzt werden (s. Abschnitt 3.3.3.1).

Aus der Widerstandsformel zur Ermittlung der entlang einer Fließstrecke kontinuierlichen gleichmäßig verteilten Reibungsverluste:

$$h_{V,k} = \lambda \frac{l}{4R} \frac{v^2}{2g} \quad (3.58)$$

mit:

$h_{V,k}$	kontinuierlicher Energiehöhenverlust [m]
λ	Widerstandsbeiwert
l	Haltungslänge [m]
v	Fließgeschwindigkeit [$\frac{m}{s}$]
R	hydraulischer Radius [m]
g	Gravitationskonstante [$\frac{m}{s^2}$],

ergibt sich folgende Beziehung zur Berechnung des Energieliniengefälles:

$$I_E = \lambda \frac{1}{4R} \frac{v^2}{2g} \quad (3.59)$$

Der Widerstandsbeiwert λ wird mit Hilfe des Widerstandsgesetzes nach Colebrook für den Bereich „technisch rauhes Verhalten“ (Übergangsbereich) ermittelt:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2,0 \lg \left(\frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} + \frac{1}{3,71} \frac{k}{4R} \right) \quad (3.60)$$

mit:

k	Rauheit [m] (s. Abschnitt 3.3.2)
Re	Reynoldszahl

Die Beziehung 3.60 wird allgemein als Prandtl-Colebrook Gleichung bezeichnet. Für die Anwendung in Abwasserkanälen und -leitungen hat nur der Übergangsbereich eine praktische Bedeutung (ATV-DVWK-A 110 [4]). Dieses Widerstandsgesetz sowie die zwei anderen bei turbulenter Strömung: (i) das Widerstandsgesetz nach Prandtl für ideales bzw. hydraulisch glattes Verhalten (Glattkurve), und (ii) das Widerstandsgesetz nach Prandtl für vollkommen oder hydraulisch rauhes Verhalten (vollrauer Bereich) werden graphisch im Diagramm von Moody dargestellt (ATV-DVWK-A 110 [4], Bollrich [14]).

In offenen natürlichen Gerinnen ist mit einer sehr hohen Reynoldszahl Re zu rechnen. Die Strömung liegt im vollrauen Bereich. Daher ist es möglich, zur Bestimmung des Energieliniengefälles –alternativ zur Berechnung nach Prandtl-Colebrook– der Ansatz von Gauckler-Manning-Strickler (GMS) zu verwenden:

$$I_E = \frac{Q |Q|}{A^2 k_{St}^2 R^{\frac{4}{3}}} \quad (3.61)$$

mit:

Q	Durchfluß [$\frac{m^3}{s}$]
A	durchflossene Fläche [m^2]
k_{St}	GMS-Abflußbeiwert [$\frac{m^{1/3}}{s}$]
R	hydraulischer Radius [m]

3.3.3.3 Freispiegelabfluß

Zur Lösung des vollständigen Differentialgleichungssystems von Saint-Venant (s. Abschnitt 3.3.3.1) wird im vorliegenden Modell ein direktes implizites Differenzenverfahren (Cembrowicz u. Krauter [18], Strelkoff [96], Verworn [100]) verwendet. Es wird folgendes vorausgesetzt: (i) Kein seitlicher Zufluß, (ii) Kanalprofil, Sohlengefälle und Rauigkeit bleiben konstant über die Berechnungsstrecke (Kante).

Am Anfang der Strecke kann eine Zuflußganglinie $Q_{Zu} = f(t)$ vorgegeben werden. Der Anfangszustand mit dem Durchfluß $Q_{Anf} = 0,0$ und der zugehörigen Wassertiefe $y_{Anf} = 0,0$ stellt numerische Schwierigkeiten im Verfahren dar (Cunge et al. [22], Verworn [100]). Um sie zu vermeiden, wird hier mit einem über die Berechnungsstrecke konstanten minimalen Abfluß $Q_{min} > 0,0$ und der dazugehörigen Wassertiefe y_{min} gerechnet.

Die Berechnungsstrecke wird in $(n - 1)$ Intervalle (Raumindex i , $1 \leq i \leq n$, Wegschritt Δx), und der Berechnungszeitraum in $(k - 1)$ Intervalle (Zeitindex j , $1 \leq j \leq k$, Zeitschritt Δt) unterteilt.

Die Differentialquotienten der Gleichungen 3.56 u. 3.57 werden durch folgende Differenzenquotienten ersetzt, wobei β stellvertretend für die abhängigen Variablen steht:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \beta}{\partial t} &\simeq \frac{\beta_i^{j+1} - \beta_i^j}{\Delta t} \\ \frac{\partial \beta}{\partial x} &\simeq \frac{\beta_{i+1}^{j+1} - \beta_{i-1}^{j+1}}{2 \Delta x} \end{aligned}$$

Daraus ergibt sich ein Gleichungssystem der Form:

$$\frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i-1}^{j+1}}{2 \Delta x} + b_i^j \frac{y_i^{j+1} - y_i^j}{\Delta t} = 0 \quad (3.62)$$

$$\begin{aligned} \frac{Q_i^{j+1} - Q_i^j}{A_i^j \Delta t} + \frac{Q_i^j}{(A_i^j)^2} \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i-1}^{j+1}}{\Delta x} \\ + \left(g - b_i^j \frac{(Q_i^j)^2}{(A_i^j)^3} \right) \frac{y_{i+1}^{j+1} - y_{i-1}^{j+1}}{2 \Delta x} = g I_S - g I_{E_i}^{j+1} \end{aligned} \quad (3.63)$$

Die Funktionswerte zum Zeitpunkt $t = j$ sind aus dem vorhergehenden Berechnungsschritt oder der Anfangsbedingung bekannt.

Der nichtlineare Term $I_{E_i}^{j+1}$ kann wie folgt linearisiert werden:

$$I_{E_i}^{j+1} \simeq I_{E_i}^j + \frac{\partial I_E}{\partial Q} \Big|_i^j (Q_i^{j+1} - Q_i^j) + \frac{\partial I_E}{\partial y} \Big|_i^j (y_i^{j+1} - y_i^j) \quad (3.64)$$

Die partiellen Differentiale $\partial I_E/\partial Q$ und $\partial I_E/\partial y$ sind nach Prandtl-Colebrook:

$$\frac{\partial I_E}{\partial Q} = \frac{\partial}{\partial Q} \left(\lambda \frac{Q^2}{8 A^2 R} \right) = I_E \left(\frac{1}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial Q} + \frac{2}{Q} \right)$$

$$\frac{\partial I_E}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{Q^2}{8 A^2 R} \right) = I_E \left(\frac{1}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial y} - b \frac{2}{A} - \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial y} \right)$$

mit:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial Q} = -\frac{\lambda}{Q} \frac{10,04 \log e}{\frac{2,51}{\sqrt{\lambda}} + \frac{k_b Re}{14,84 R} + 5,02 \log e}$$

$$\frac{\partial \lambda}{\partial y} = -\lambda \frac{4 \log e \left[2,51 \left(\frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial y} - \frac{b}{A} \right) + \frac{k_b Re \sqrt{\lambda}}{14,84 R} \frac{\partial R}{\partial y} \right]}{\frac{2,51}{\sqrt{\lambda}} + \frac{k_b Re}{14,84 R} + 5,02 \log e}$$

$$Re = \frac{4 Q R}{A \nu}$$

und nach Gauckler-Manning-Strickler:

$$\frac{\partial I_E}{\partial Q} = \frac{2 Q}{k_{St}^2 A^2 R^{\frac{4}{3}}} = I_E \frac{2}{Q}$$

$$\frac{\partial I_E}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{k_{St}^2 A^2 R^{\frac{4}{3}}} \right) = -I_E \left(b \frac{2}{A} + \frac{4}{3 R} \frac{\partial R}{\partial y} \right)$$

Mit Hilfe der Linearisierung resultiert für die Unbekannten $Q_{i-1}, y_{i-1}, Q_i, y_i, Q_{i+1}, y_{i+1}$, zum Zeitpunkt $t = j + 1$, das lineare Gleichungssystem:

$$C_i Q_{i+1} - C_i Q_{i-1} + D_i y_i = E_i \quad (3.72)$$

$$F_i Q_{i+1} + G_i Q_i - F_i Q_{i-1} + H_i y_{i+1} + J_i y_i - H_i y_{i-1} = K_i \quad (3.73)$$

mit $2n - 4$ Gleichungen ($i = 2, \dots, n - 1$) für die $2n$ unbekanntenen Variablen $Q_1, \dots, Q_n, y_1, \dots, y_n$.

Die Koeffizienten der Gleichungen 3.72 und 3.73 für den Zeitpunkt $t = j$ sind:

$$\begin{aligned}
 C_i &= \frac{1}{2 \Delta x} \\
 D_i &= \frac{b_i^j}{\Delta t} \\
 E_i &= D_i y_i^j \\
 F_i &= \frac{1}{\Delta x} v_i^j \\
 G_i &= \frac{1}{\Delta t} + g A_i^j \frac{\partial I_E}{\partial Q} \Big|_i^j \\
 H_i &= \frac{1}{2 \Delta x} \left(g A_i^j - b_i^j (v_i^j)^2 \right) \\
 J_i &= g A_i^j \frac{\partial I_E}{\partial y} \Big|_i^j \\
 K_i &= g A_i^j I_S + \frac{Q_i^j}{\Delta t} - g A_i^j \left(I_{E_i}^j - \frac{\partial I_E}{\partial Q} \Big|_i^j Q_i^j - \frac{\partial I_E}{\partial y} \Big|_i^j y_i^j \right)
 \end{aligned}$$

Die fehlenden vier Gleichungen ergeben sich aus der Vorwärtscharakteristik, der Rückwärtscharakteristik und zwei Randbedingungen (s. u., jeweils unter *double sweep* und *single sweep*).

Die Gleichung für die Vorwärtscharakteristik lautet:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + (v + c) \frac{\partial Q}{\partial x} - b(v - c) \left(\frac{\partial y}{\partial t} + (v + c) \frac{\partial y}{\partial x} \right) = g A (I_S - I_E) \quad (3.74)$$

und für die Rückwärtscharakteristik:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + (v - c) \frac{\partial Q}{\partial x} - b(v + c) \left(\frac{\partial y}{\partial t} + (v - c) \frac{\partial y}{\partial x} \right) = g A (I_S - I_E) \quad (3.75)$$

Dabei steht c in $[\frac{m}{s}]$ für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Störungen an der Wasseroberfläche:

$$c = \sqrt{g \frac{A}{b}} \quad (3.76)$$

Am Haltungsanfang wird die Froudezahl für $t = j$ berechnet:

$$Fr = \frac{Q}{\sqrt{g \frac{A^3}{b}}} \quad (3.77)$$

Das aus $2n$ Gleichungen bestehende lineare System könnte mit Hilfe von direkten Verfahren oder Iterationsverfahren gelöst werden, wobei der damit zusammenhängende Rechenaufwand beträchtlich werden kann (Cunge et al. [22]). Um den Rechenaufwand zu reduzieren, werden im vorliegenden Modell *sweep*-Methoden eingesetzt, die die Aufgabe mit einem zur Anzahl der Gleichungen proportionalen Aufwand lösen (Cunge et al. [22]).

Ist der Fließzustand strömend ($Fr < 1,0$), wird das System in zwei Schritten, *double sweep*, gelöst. Eine *One-point* Randbedingung wird sowohl am Anfang als auch am Ende der Haltung angenommen (Abbott u. Minns [2]).

Ist der Fließzustand kritisch ($Fr = 1,0$) oder schießend ($Fr > 1,0$), wird das System in einem Schritt, *single sweep*, gelöst. Am Anfang der Haltung wird eine *two-point* Randbedingung, und am Ende eine *zero-point* Randbedingung angenommen (Abbott u. Minns [2]). Das *single sweep* für das hier verwandte direkte implizite Differenzenverfahren wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt.

Double sweep: Im Fall strömender Strömung ($Fr < 1,0$) wird das Gleichungssystem durch ein *double sweep* gelöst. Die Rückwärtscharakteristik wird zwischen $i = 1$ und $i = 2$ aufgestellt, und die Vorwärtscharakteristik zwischen $i = n - 1$ und $i = n$.

Nach Anwendung der Differenzenquotienten:

$$\begin{aligned}\frac{\partial\beta}{\partial t} &\simeq \frac{\beta_1^{j+1} - \beta_1^j}{\Delta t} \\ \frac{\partial\beta}{\partial x} &\simeq \frac{\beta_2^{j+1} - \beta_1^{j+1}}{\Delta x}\end{aligned}$$

für die Rückwärtscharakteristik (s. Gl. 3.75), und:

$$\begin{aligned}\frac{\partial\beta}{\partial t} &\simeq \frac{\beta_n^{j+1} - \beta_n^j}{\Delta t} \\ \frac{\partial\beta}{\partial x} &\simeq \frac{\beta_n^{j+1} - \beta_{n-1}^{j+1}}{\Delta x}\end{aligned}$$

für die Vorwärtscharakteristik (s. Gl. 3.74), und der Linearisierung von $I_{E_1}^{j+1}$ und $I_{E_n}^{j+1}$ (s. Gl. 3.64) folgen die Gleichungen für die Rückwärtscharakteristik:

$$F_1 Q_2 + G_1 Q_1 + H_1 y_2 + J_1 y_1 = K_1 \quad (3.78)$$

und für die Vorwärtscharakteristik:

$$G_n Q_n + F_n Q_{n-1} + J_n y_n + H_n y_{n-1} = K_n \quad (3.79)$$

Die Koeffizienten der Gleichung 3.78 sind:

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{v_1^j - c_1^j}{\Delta x} \\ G_1 &= \frac{1}{\Delta t} - F_1 + g A_1^j \frac{\partial I_E}{\partial Q} \Big|_1^j \\ H_1 &= -b_1^j (v_1^j + c_1^j) F_1 \\ J_1 &= -b_1^j \frac{v_1^j + c_1^j}{\Delta t} - H_1 + g A_1^j \frac{\partial I_E}{\partial y} \Big|_1^j \\ K_1 &= \frac{Q_1^j}{\Delta t} - b_1^j \frac{v_1^j + c_1^j}{\Delta t} y_1^j + g A_1^j \left(I_S - I_{E_1}^j + \frac{\partial I_E}{\partial Q} \Big|_1^j Q_1^j + \frac{\partial I_E}{\partial y} \Big|_1^j y_1^j \right) \end{aligned}$$

Die Koeffizienten der Gleichung 3.79 sind:

$$\begin{aligned} F_n &= -\frac{v_n^j + c_n^j}{\Delta x} \\ G_n &= \frac{1}{\Delta t} - F_n + g A_n^j \frac{\partial I_E}{\partial Q} \Big|_n^j \\ H_n &= -b_n^j (v_n^j - c_n^j) F_n \\ J_n &= -b_n^j \frac{v_n^j - c_n^j}{\Delta t} - H_n + g A_n^j \frac{\partial I_E}{\partial y} \Big|_n^j \\ K_n &= \frac{Q_n^j}{\Delta t} - b_n^j \frac{v_n^j - c_n^j}{\Delta t} y_n^j + g A_n^j \left(I_S - I_{E_n}^j + \frac{\partial I_E}{\partial Q} \Big|_n^j Q_n^j + \frac{\partial I_E}{\partial y} \Big|_n^j y_n^j \right) \end{aligned}$$

Für die obere Randbedingung:

$$a_1 Q_1 + b_1 y_1 = c_1 \quad (3.80)$$

ergeben sich die Koeffizienten bei Vorgabe einer Zulaufganglinie $Q_{Zu} = f(t)$ zu $a_1 = 1$, $b_1 = 0$ und $c_1 = Q_{Zu}^{j+1}$:

$$Q_1^{j+1} = Q_{Zu}^{j+1} \quad (3.81)$$

Für die untere Randbedingung:

$$a_n Q_n + b_n y_n = c_n \quad (3.82)$$

werden die Koeffizienten a_n , b_n und c_n für eine der folgenden Randbedingungen ermittelt:

- (i) Normalabflußtiefe: Das Abflußverhalten am Ende der Rohrstrecke ist derart, als ob das Rohr mit denselben geometrischen und hydraulischen Gegebenheiten weiterführt. Bei der Dimensionierung von neuen Haltungen ist die Annahme sinnvoll, da noch keine Nachfolgekante vorhanden ist. Die Normalabflußtiefe wird aus den Gleichungen 3.50 u. 3.52 oder 3.51 u. 3.52 ermittelt.
- (ii) Grenztiefe: Ist die Nachfolgekante vorhanden, und ergibt sich ein Unterschied zwischen den Sohlentiefen, dann wird am Ende der Rohrstrecke ein vollkommener Absturz angenommen. An der Absturzkante stellt sich die Grenztiefe ein, die über folgende Beziehung (ATV-Handbuch [10]):

$$\frac{Q}{\sqrt{g}} - A \sqrt{\frac{A}{b}} = 0 \quad (3.83)$$

berechnet wird. Im Gegensatz zur Normalabflußtiefe hängt die Grenztiefe – bei einem vorgegebenen Durchfluß – nur von den querschnittsabhängigen Größen ab.

Die Gleichungen 3.72, 3.73, 3.78 u. 3.80 werden in folgende rekursive Gleichungen für $i = 1, \dots, n - 1$ umformuliert:

$$y_i = S_i + T_i Q_{i+1} + U_i y_{i+1} \quad (3.84)$$

$$Q_i = V_i + W_i Q_{i+1} + X_i y_{i+1} \quad (3.85)$$

Koeffizienten der Gleichungen 3.84, 3.85 (für $i = 1$):

$$V_1 = Q_{Zu}^{j+1}$$

$$W_1 = 0$$

$$X_1 = 0$$

$$S_1 = \frac{K_1 - G_1 Q_{Zu}^{j+1}}{J_1}$$

$$T_1 = -\frac{F_1}{J_1}$$

$$U_1 = -\frac{H_1}{J_1}$$

Koeffizienten der Gleichungen 3.84, 3.85 (für $i = 2, \dots, n - 1$):

$$\begin{aligned} V_i &= \frac{\overline{K}_i - \overline{J}_i \overline{S}_i}{Z_i} \\ W_i &= -\frac{F_i + \overline{J}_i \overline{U}_i}{Z_i} \\ X_i &= -\frac{H_i}{Z_i} \\ S_i &= \overline{S}_i + \overline{T}_i V_i \\ T_i &= \overline{U}_i + \overline{T}_i W_i \\ U_i &= \overline{T}_i X_i \end{aligned}$$

mit:

$$\begin{aligned} \overline{S}_i &= \frac{E_i + C_i V_{i-1}}{D_i - C_i X_{i-1}} \\ \overline{T}_i &= \frac{C_i W_{i-1}}{D_i - C_i X_{i-1}} \\ \overline{U}_i &= -\frac{C_i}{D_i - C_i X_{i-1}} \\ Z_i &= \overline{G}_i + \overline{J}_i \overline{T}_i \\ \overline{G}_i &= G_i - F_i W_{i-1} - H_i T_{i-1} \\ \overline{J}_i &= J_i - F_i X_{i-1} - H_i U_{i-1} \\ \overline{K}_i &= K_i + F_i V_{i-1} + H_i S_{i-1} \end{aligned}$$

Im Vorwärtsschritt werden die Koeffizienten bestimmt.

Für $i = n - 1$ folgt aus den Gleichungen 3.84 u. 3.85:

$$\begin{aligned} y_{n-1} &= S_{n-1} + T_{n-1} Q_n + U_{n-1} y_n \\ Q_{n-1} &= V_{n-1} + W_{n-1} Q_n + X_{n-1} y_n \end{aligned}$$

y_{n-1} und Q_{n-1} werden dann in die Gleichung 3.79 eingesetzt. Das ergibt mit der unteren Randbedingung (s. Gl. 3.82) y_n und Q_n .

Im Rückwärtsschritt resultieren dann y_i und Q_i für $i = n - 1, \dots, 1$ aus den Gleichungen 3.84 u. 3.85.

Single sweep: Im Fall kritischer oder schießender Strömung werden zwei Gleichungen durch die Vorwärtscharakteristik (Gl. 3.74) und die Rückwärtscharakteristik (Gl. 3.75) zwischen $i = 1$ und $i = 2$ aufgestellt.

Folgende Differenzenquotienten:

$$\begin{aligned}\frac{\partial\beta}{\partial t} &\simeq \frac{\beta_2^{j+1} - \beta_2^j}{\Delta t} \\ \frac{\partial\beta}{\partial x} &\simeq \frac{\beta_2^{j+1} - \beta_1^{j+1}}{\Delta x}\end{aligned}$$

werden sowohl für die Rückwärtscharakteristik als auch für die Vorwärtscharakteristik verwendet, und der Term $I_{E_2}^{j+1}$ wird entsprechend Gleichung 3.64 linearisiert.

Aus der Vorwärtscharakteristik folgt:

$$A1 Q_2 + A2 Q_1 + A3 y_2 + A4 y_1 = A5 \quad (3.86)$$

mit (im Fall kritischen Fließzustands: $v_2^j = c_2^j$):

$$\begin{aligned}A1 &= \frac{1}{\Delta t} + \frac{v_2^j + c_2^j}{\Delta x} + g A_2^j \frac{\partial I_E}{\partial Q} \Big|_2^j \\ A2 &= \frac{-(v_2^j + c_2^j)}{\Delta x} \\ A3 &= -b_2^j \frac{(v_2^j - c_2^j)}{\Delta t} - b_2^j (v_2^j - c_2^j) \frac{(v_2^j + c_2^j)}{\Delta x} + g A_2^j \frac{\partial I_E}{\partial y} \Big|_2^j \\ A4 &= b_2^j (v_2^j - c_2^j) \frac{(v_2^j + c_2^j)}{\Delta x} \\ A5 &= \frac{Q_2^j}{\Delta t} - b_2^j (v_2^j - c_2^j) \frac{y_2^j}{\Delta t} + g A_2^j \left(I_S - I_{E_2}^j + \frac{\partial I_E}{\partial Q} \Big|_2^j Q_2^j + \frac{\partial I_E}{\partial y} \Big|_2^j y_2^j \right)\end{aligned}$$

Aus der Rückwärtscharakteristik folgt:

$$B1 Q_2 + B2 Q_1 + B3 y_2 + B4 y_1 = B5 \quad (3.87)$$

mit (im Fall kritischen Fließzustands: $v_2^j = c_2^j$):

$$\begin{aligned}
B1 &= \frac{1}{\Delta t} + \frac{(v_2^j - c_2^j)}{\Delta x} + g A_2 \left. \frac{\partial I_E}{\partial Q} \right|_2^j \\
B2 &= \frac{-(v_2^j - c_2^j)}{\Delta x} \\
B3 &= -b_2^j \frac{(v_2^j + c_2^j)}{\Delta t} - b_2^j (v_2^j + c_2^j) \frac{(v_2^j - c_2^j)}{\Delta x} + g A_2 \left. \frac{\partial I_E}{\partial y} \right|_2^j \\
B4 &= b_2^j (v_2^j + c_2^j) \frac{(v_2^j - c_2^j)}{\Delta x} \\
B5 &= \frac{Q_2^j}{\Delta t} - b_2^j (v_2^j + c_2^j) \frac{y_2^j}{\Delta t} + g A_2 \left(I_S - I_{E_2}^j + \left. \frac{\partial I_E}{\partial Q} \right|_2^j Q_2^j + \left. \frac{\partial I_E}{\partial y} \right|_2^j y_2^j \right)
\end{aligned}$$

Für die zwei oberen Randbedingungen gilt:

$$a_1 Q_1 + b_1 y_1 = c_1 \quad (3.88)$$

$$d_1 Q_1 + e_1 y_1 = f_1 \quad (3.89)$$

Die Grenztiefe stellt sich am Haltungsanfang ein. Daher ergibt sich aus der Gleichung 3.88 für $a_1 = 1$, $b_1 = 0$ und $c_1 = Q_{Zu}^{j+1}$:

$$Q_1^{j+1} = Q_{Zu}^{j+1} \quad (3.90)$$

und aus der Gleichung 3.89 für $d_1 = 0$, $e_1 = 1$ und $f_1 = y_{gr}(Q_{Zu}^{j+1})$:

$$y_1^{j+1} = y_{gr}(Q_{Zu}^{j+1}) \quad (3.91)$$

Das Gleichungssystem wird durch ein *single sweep* gelöst. Dafür werden die Gleichungen 3.72, 3.73, 3.86 u. 3.87 umformuliert:

für $i = 2, \dots, n - 1$:

$$y_{i+1} = C_{i+1}^* + A_{i+1}^* Q_i + B_{i+1}^* y_i \quad (3.92)$$

$$Q_{i+1} = F_{i+1}^* + D_{i+1}^* Q_i + E_{i+1}^* y_i \quad (3.93)$$

für $i = 1$:

$$y_2 = C_2^* + A_2^* Q_1 + B_2^* y_1 \quad (3.94)$$

$$Q_2 = F_2^* + D_2^* Q_1 + E_2^* y_1 \quad (3.95)$$

Die Koeffizienten der Gleichungen 3.92, 3.93 (für $i = 2, \dots, n - 1$) sind:

$$\begin{aligned}
 C_{i+1}^* &= \frac{K_i}{H_i} - \frac{E_i F_i}{C_i H_i} + y_{i-1} \\
 A_{i+1}^* &= \frac{-G_i}{H_i} \\
 B_{i+1}^* &= \frac{D_i F_i}{C_i H_i} - \frac{J_i}{H_i} \\
 F_{i+1}^* &= \frac{E_i + C_i Q_{i-1}}{C_i} \\
 D_{i+1}^* &= 0 \\
 E_{i+1}^* &= \frac{-D_i}{C_i}.
 \end{aligned}$$

Die Koeffizienten der Gleichungen 3.94, 3.95 (für $i = 1$) sind:

$$\begin{aligned}
 C_2^* &= \frac{A1 B5 - A5 B1}{A1 B3 - A3 B1} \\
 A_2^* &= \frac{-(A1 B2 - A2 B1)}{A1 B3 - A3 B1} \\
 B_2^* &= \frac{-(A1 B4 - A4 B1)}{A1 B3 - A3 B1} \\
 F_2^* &= \frac{B5 - B3 C_2^*}{B1} \\
 D_2^* &= \frac{-(B2 + B3 A_2^*)}{B1} \\
 E_2^* &= \frac{-(B3 B_2^* + B4)}{B1}
 \end{aligned}$$

Die Unbekannten y_i und Q_i für $i = 2, \dots, n$ werden dann in einem Vorwärtsschritt aus den Gleichungen 3.92 u. 3.93 berechnet.

3.3.3.4 Druckabfluß

Das entwickelte Modell kann außerdem bereits vorhandene Haltungen in den Optimierungsprozeß einer Planung einbeziehen. Wird die Vollfüllungsleistung dieser Kanäle überschritten, dann kommt es zur Druckentwässerung.

Das Überstauen von Kanalrohren wird im vorliegenden Verfahren mit Hilfe der Energiegleichung und der Kontinuitätsbedingung berechnet. Die Energie-Gleichung mit Verlusten zwischen Haltungsanfang und -ende lautet (Engel [30]):

$$\left(z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}\right)_1 = \left(z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}\right)_n + h_V \quad (3.96)$$

mit:

z	geodätische Höhe [$m + NN$]
p	mittlerer Druck im Querschnitt [$\frac{N}{m^2}$]
v	Fließgeschwindigkeit im Querschnitt [$\frac{m}{s}$]
ρ	Dichte [$\frac{kg}{m^3}$]
g	Gravitationskonstante [$\frac{m}{s^2}$]
h_V	Energiehöhenverlust [m],

und die Kontinuitätsbedingung:

$$Q = v A \quad (3.97)$$

Am Haltungsende wird freier Ausfluß angenommen. Der Energiehöhenverlust setzt sich zusammen aus dem kontinuierlichen Energiehöhenverlust $h_{V,k}$ (s. Gl. 3.58) und dem Einlaufverlust $h_{V,e}$:

$$h_V = h_{V,k} + h_{V,e} \quad (3.98)$$

Der Einlaufverlust wird nach folgender Beziehung bestimmt (Abbot [1], Engel [30]):

$$h_{V,e} = K^S \left(1 - \frac{A}{A^S}\right)^2 \frac{v^2}{2g} \quad (3.99)$$

mit:

K^S	Verlustbeiwert
A^S	Schachtquerschnittsfläche [m^2]

Der Verlustbeiwert bei plötzlicher Verengung K^S nimmt Werte zwischen 0,0 und 0,5 an, abhängig von der Einlauform (Abbot [1], Bollrich [14], Idelčík [51]), hier wird

$K^S = 0,5$ angenommen. Die Schachtquerschnittsfläche A^S wird mit $5 m^2$ (Kibler et al. [54]) angesetzt. Die Summe $\left(z + \frac{p}{\gamma}\right)_n$ in Gleichung 3.96 ist die piezometrische Höhe, die gleich der Kronhöhe am Haltungsende angesetzt wird.

Zu jedem Zeitschritt $t = j + 1$ wird der Abfluß am Haltungsende nach $Q_n^{j+1} = Q_{Zu}^{j+1}$, und die Energiehöhe am Haltungsanfang gleich $\left(z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}\right)_n + h_V$ bestimmt. Im vorliegenden Verfahren erfolgt die Druckabflußberechnung haltungsbezogen, und das Speichervermögen der in den eingestauten Schacht einmündenden Rohre sowie des Schachts selbst wird nicht berücksichtigt.

3.3.3.5 Vereinfachte Abflußberechnung

Um Rechenzeit zu sparen, kann das Saint-Venant Gleichungssystem vereinfacht werden. Das kann zur Einschränkung des Gültigkeitsbereichs der Gleichungen führen (Schmitt [86], Verworn [100]). Im Verfahren zur Abflußberechnung ist im vorliegenden Modell ein Umschalter implementiert, so daß für Haltungen mit Sohlengefällen kleiner als 0,005 das vollständige Saint-Venant Gleichungssystem gelöst wird, andernfalls schaltet der Algorithmus auf die Berechnungsweise nach dem kinematischen Wellenansatz (Cembrowicz u. Krauter [18]) um. Durchgeführte Untersuchungen dokumentieren, daß sich für Sohlengefälle größer gleich 0,005 die Ergebnisse beider Ansätze nur gering voneinander unterscheiden (Verworn [100]).

3.4 Layout- und Designoptimierung

3.4.1 Algorithmus des gesamten Modells

Im folgenden wird das gesamte Modell zusammengefaßt dargestellt. Abbildung 3.5 zeigt den Algorithmus zur Entwurfsoptimierung als Flußdiagramm. Der detaillierte Ablauf und Notation der Layout- und Designoptimierung sind jeweils den Abschnitten 3.2 und 3.3 zu entnehmen. Der gesamte Lösungsalgorithmus besteht aus folgenden Schritten:

1. Zufallswahl von μ Elternindividuen und Berechnung der zugehörigen Tauglichkeitswerte mit Hilfe der Designoptimierung
2. Ermittlung einer neuen Generation:
 - **if** Evolutionsstrategie mit Populationswelle:
 - 2.1 Überprüfung der Anzahl der Elternindividuen (μ)
 - else** :
 - 2.1 weiter
 - 2.2 Erzeugung der λ Nachkommenindividuen ($i = 1, \dots, \lambda$):
 - **if** $\rho = 1$:
 - 2.2.1 Zufallswahl von einem der μ Elternindividuen
 - 2.2.2 durch Mutation dieses Elters wird ein Nachkomme erzeugt
 - else** :
 - 2.2.1 Zufallswahl von ρ der μ Elternindividuen
 - **if** Rekombination vor Mutation:
 - 2.2.2 durch Zufallswahl von Komponenten aus den ρ Eltern wird ein Nachkomme zusammengesetzt, dann Mutation dieses Nachkommen
 - else** :
 - 2.2.2 Mutation der einzelnen ρ Eltern, dann wird durch Zufallswahl von ihren Komponenten ein Nachkomme zusammengesetzt
- **if** graphentheoretische Zulässigkeit des Nachkommen:
 - **if** die Plus-Version der Evolutionsstrategie:

-
- **if** der Nachkomme innerhalb der $(\mu + i - 1)$ Individuen der Population enthalten:
 - 2.2.3** ab 2.2.1 wiederholen
 - else** :
 - 2.2.3** weiter
 - else** (die Komma-Version):
 - **if** der Nachkomme innerhalb der $(i - 1)$ Individuen der Population enthalten:
 - 2.2.3** ab 2.2.1 wiederholen
 - else** :
 - 2.2.3** weiter
 - else** :
 - 2.2.3** ab 2.2.1 wiederholen
 - **if** technische Zulässigkeit des Nachkommen:
 - 2.2.4** Berechnung des zugehörigen Tauglichkeitswertes mittels der Designoptimierung
 - else** :
 - 2.2.4** ab 2.2.1 wiederholen
 - **if** die Plus-Version der Evolutionsstrategie:
 - 2.3** aus den $(\mu + \lambda)$ Individuen werden die μ besten Individuen ausgelesen
 - else** (die Komma-Version):
 - 2.3** aus den λ Individuen werden die μ besten Individuen ausgelesen
 - **if** die Zielfunktionswerte aufeinanderfolgender Generationen innerhalb der letzten n Generationen die vorgegebene Konvergenzbedingung erfüllen, oder eine festgelegte Anzahl von Generationen erreicht wird:
 - 3.** das Verfahren wird beendet, und das hydraulische Verhalten jedes Individuums –d.h. jedes Kanalsystems– der Lösungsgeneration wird mit Hilfe eines hydraulischen Simulationsmodells verifiziert
 - else** :
 - 3.** der Prozeß wiederholt sich ab 2.

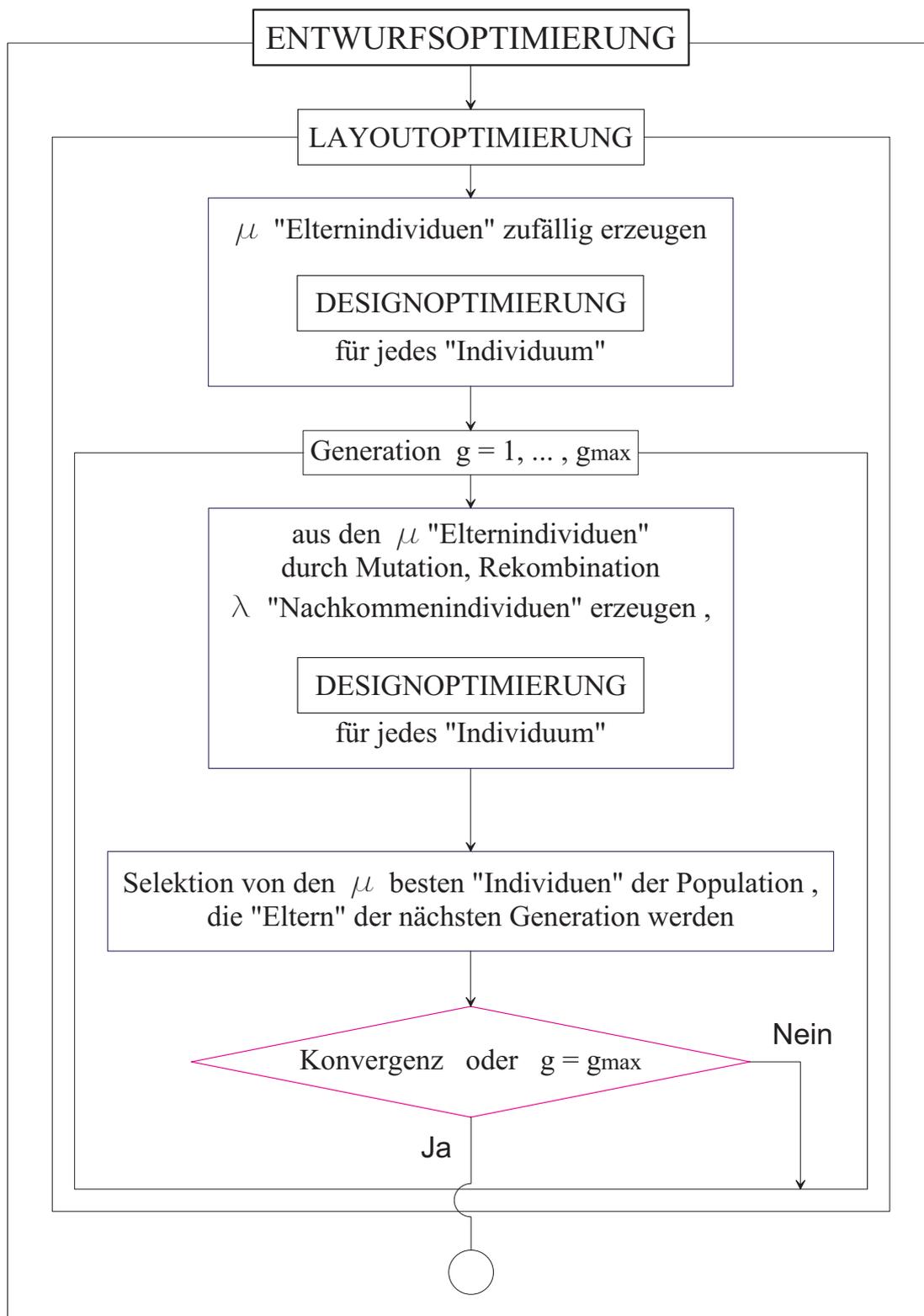


Abbildung 3.5: Flußdiagramm für die Entwurfsoptimierung

4 Planungsbeispiel

Als Planungsbeispiel wurde das Abwasserentsorgungssystem von Fitten und Ballern, Stadtteilen der Kreisstadt Merzig, optimiert. Das Datenmaterial wurde von AQUA-PC, Saarbrücken ¹, zur Verfügung gestellt. Das gesamte Entwässerungsgebiet beträgt 435,71 ha. Es wird im Mischverfahren entwässert, ohne Kläranlage, mit der Saar als Hauptvorfluter. Das Layout des vorhandenen Netzes zeigt Abb. 4.7, wobei vier kleine Netzteile (insges. 397,85 m) nicht berücksichtigt werden, weil sie mit dem Kanalnetz insgesamt nicht zusammenhängend sind. Knotenindizes und -koordinaten sind im Anhang A enthalten. Auf der Basis des realen Entsorgungnetzes wurde nach Testrechnungen zur Untersuchung weiterer graphentheoretisch und für die vorhandenen Systemgegebenheiten zulässiger Knotenverbindungen der Graph in Abb. 4.8 zur Kanalnetzoptimierung ermittelt. Die neu generierten Kanten sind im Vergleich zu den Kanten des bestehenden Netzes in dunkler Farbe zu sehen. Die Abwasserentsorgung des Stadtteils Fitten erfolgt in das Kanalsystem Ballern. Der Übergabepunkt ist der Knoten 1289 (s. Abb. 4.7). Als Senke des Systems wurde der Knoten 5000 (s. Abb. 4.8) angenommen.

Im Beispiel wurde das gesamte Netz neu geplant. Die Belastungsabflüsse waren gegeben, Ergebnis eines Oberflächenabflußmodells. Es wurden nur die Regenwasserabflüsse berücksichtigt, die auch im Mischverfahren die entscheidene Belastung darstellen. Die gegebenen Daten zur Berechnung der Kosten berücksichtigen nur die Baukosten der Abwasserkanäle einschließlich Schächte, in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser und der Sohlentiefe. Sie sind Tab. 4.3 zu entnehmen. Sonderbauwerke waren nicht einzuplanen. Außer der Zuflußganglinien und Kostenfunktionen befinden sich unter den Eingabedaten die verfügbaren Profile, die Längen, Anfangs- und Endknoten der Kanten sowie die Geländehöhen an den Knoten des Entwässerungssystems.

Zur Kanalnetzoptimierung wurde folgendes angesetzt: Abflußkapazität der Kanäle bis auf 90,0 % der Vollfüllungsleistung, Profile kleinerer Durchmesser als stromaufwärts sind unzulässig, min. und max. zulässige Fließgeschwindigkeit: $v^{min} = 0,5 \text{ m/s}$ und

¹Arbeitsgemeinschaft AQUA-PC/Zimmer & Partner, Ingenieurgesellschaft für Siedlungswasserwirtschaft mbH, Dudweiler Landstr. 99, 66123 Saarbrücken

s/DN	<= 300	350	400	450	500	600	700	800	900	1000	1200
2,0	447,3	491,8	536,3	580,8	625,3						
2,5	514,3	558,8	603,3	647,8	692,2	748,0	792,5	836,9			
3,0	581,3	625,8	670,3	714,7	759,2	814,9	859,4	903,9	970,9	1037,9	
3,5	648,3	692,8	737,2	781,7	826,2	881,9	926,4	970,9	1037,9	1104,9	1171,8
4,0	715,3	759,7	804,2	848,7	893,2	948,9	993,4	1037,9	1104,9	1171,8	1238,8
4,5	782,2	826,7	871,2	915,7	960,2	1015,9	1060,4	1104,9	1171,8	1238,8	1305,8
5,0	849,2	893,7	938,2	982,7	1027,1	1082,9	1127,4	1171,8	1238,8	1305,8	1372,8
> 5,0	916,2	960,7	1005,2	1049,6	1094,1	1149,8	1194,3	1238,8	1305,8	1372,8	1439,7

Tabelle 4.3: Baukosten der Kanäle in [EUR/lfdm] (Sohlentiefe s [m] / DN [mm])

$v^{max} = 7,0$ m/s, min. zulässige Überdeckung $\ddot{u}^{min} = 1,0$ m, min. und max. zulässige Sohlentiefe: $s^{min} = 1,25$ m und $s^{max} = 8,0$ m, Sohliefeninkrement $\Delta s = 0,20$ m (ausgenommen eine Rechenvariante, wobei $\Delta s = 0,10$ m), Bemessung der Kanäle nach der Prandtl-Colebrook Gleichung mit der betrieblichen Rauheit $k_b = 0,0015$ m, kinematische Viskosität $\nu = 1,31 \cdot 10^{-6}$ m²/s, Weg- und Zeitschritt zur Abflußberechnung: $\Delta x_{max} = 50,0$ m und $\Delta t = 50$ s. Zur Abflußberechnung wird die Länge einer Haltung (l_j) durch $i = 1, 2, 3, \dots, n$ geteilt bis die Bedingung: $\Delta x \leq \Delta x_{max}$, mit $\Delta x = l_j/i$, erfüllt wird.

Die Optimierungsrechnungen wurden auf der IBM SP-SMP, Rechenzentrum der Universität Karlsruhe ² durchgeführt. Insgesamt wurden 6 Rechenvarianten der Evolutionsstrategien untersucht. Durchschnittlich war die Rechenzeit pro Individuum im Optimierungsprozeß, d. h. zur Ermittlung eines Netzlayouts und dessen Bewertung mit Hilfe der Designoptimierung, 15 Minuten. Bestes Ergebnis jeder untersuchten Spielvariante wird in der Tab. 4.4 dargestellt.

Die Evolutionsstrategien ohne Rekombination, die $(\mu + 6)$ -ES mit Populationswelle und die $(1 + 5)$ -ES, konvergierten schneller als die anderen. Dieses Konvergenzverhalten zu einem lokalen Optimum kann auf den relativ zu den anderen Spielvarianten hohen Selektionsdruck (μ/λ , s. Abschnitt 3.2.2) zurückgeführt werden. Die Rechen-

²<http://www.uni-karlsruhe.de/Uni/RZ/Hardware/SP>

ES	Anfangspopulation Minimum [EUR] Maximum [EUR]	Lösungspopulation Minimum [EUR] Maximum [EUR]	Anzahl der Generationen bis zur Konvergenz
$(3/2 + 6)$	8 993 147,67 9 287 889,03	8 808 334,06 8 956 298,86	38
$(5/2 + 8)$	9 168 433,86 9 447 680,01	8 812 994,99 9 028 062,77	33
$(3/2 + 6)$ $\Delta s = 0,10 m$	9 051 004,43 9 266 346,26	8 845 141,96 9 124 493,44	16
$(3/2, 6)$	9 202 917,43 9 421 987,60	8 877 725,57 8 908 234,36	69
$(\mu+6)$ mit Pop.-welle: $\mu_{min} = 1 \quad \mu_{max} = 3$	8 942 106,42 9 415 525,89	8 892 203,31 9 314 504,84	13
$(1 + 5)$	8 946 859,39 9 126 182,75	8 914 364,75 9 343 902,08	11

Tabelle 4.4: Ergebnisse der ausgeführten Evolutionsstrategien

variante mit einem relativ niedrigen Selektionsdruck, die $(5/2 + 8)$ -ES, erreichte ein besseres Ergebnis in 33 Generationen, wobei die Mehrzahl der Individuen pro Generation eine längere Rechenzeit des gesamten Evolutionsablaufs bedeutet. Eine weitere Spielvariante mit einem relativ mittleren Selektionsdruck, die $(3/2 + 6)$ -ES, wurde gewählt. Diese Evolutionsstrategie wurde auch mit einem kleineren Sohltiefeninkrement ($\Delta s = 0,10 m$) sowie in der Komma-Version untersucht. Erwartungsgemäß brauchte die Komma-Version, $(3/2, 6)$ -ES, von allen Rechenvarianten am längsten bis zur Konvergenz. Bei den Rechenläufen dieser Version wurde beobachtet, wie es, indem die Elternindividuen bei der Selektion nicht mitberücksichtigt werden, zu „Sprüngen“ im Suchraum kommen und somit eine weiträumigere Suche als in der Plus-Version erfolgen kann, was dennoch nicht unbedingt ein Vorteil für das Auffinden des globalen Optimums bedeutet. Die besten Ergebnisse wurden mit der $(3/2 + 6)$ -ES mit $\Delta s = 0,20 m$ erreicht. Deshalb wurde diese Spielvariante am meisten (sechsmal) gestartet, um die Chance für Startwerte in der Nähe des globalen Optimums zu erhöhen (s. Abschnitt 3.2.2).

Die beste Lösung für das Abwasserentsorgungssystem Fitten-Ballern mit 323 Knoten und 322 Kanten ergab eine $(3/2 + 6)$ -ES, mit nachstehenden Ergebnissen:

- Gesamtlänge : 13 896,62 m
- Netzvolumen (Kanäle): 3 363,9 m^3
- Volumenbilanz (Zuflußvolumen-Abflußvolumen)/Zuflußvolumen) : 0,99 %
- Gesamtdauer des Abflußereignisses : 8 h 25 m 50 s
- Kosten : 8 808 334,06 EUR
- Anzahl der Generationen/Individuen bis zur Konvergenz : 38/231
- Rechenzeit : 2 d 10 h 30 m 7,63 s .

Daraus läßt sich schließen, daß im Durchschnitt für diesen Rechenlauf die Rechenzeit pro Kanalnetzentwurf 15 Minuten und 11,72 Sekunden beträgt, wobei zu beachten ist, daß insgesamt mehr Individuen als die, die in eine Population aufgenommen, ausgewertet werden. Sie werden während des Optimierungsprozesses ausgeschieden, weil sie graphentheoretisch oder ingenieur-technisch unzulässig sind. Abb. 4.6 zeigt Minimal- und Maximalwert jeder Generation der $(3/2 + 6)$ -ES, die die beste Lösung erzielte. Abb. 4.9 zeigt die optimale Netztopologie. Minimal-, Maximal- und Mittelwert für die Sohlentiefe, Kanalneigung, Scheitelabfluß und -fließgeschwindigkeit sowie Auslastungsgrad in Bezug auf die Profildurchmesser sind in der Tab. 4.5 aufgelistet.

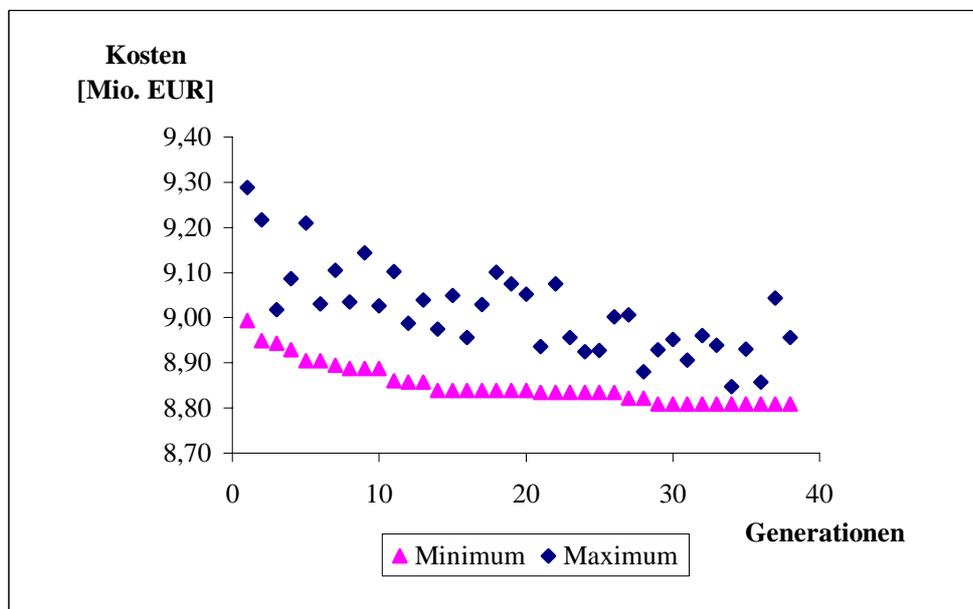


Abbildung 4.6: $(3/2 + 6)$ -ES mit der besten Lösung für Fitten-Ballern

DN [mm]	150	200	250	300	350	400	450
Länge [m]	533,53	418,39	1028,43	4321,66	1203,30	990,28	590,20
Kosten [EUR]	238690,88	187179,49	460099,43	1938399,18	622935,48	539104,51	349570,01
Anzahl	12	14	24	104	30	27	16
Sohltiefe min [m]	1,25	1,25	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45
Sohltiefe max [m]	2,06	1,83	2,49	2,85	3,57	3,07	3,07
Sohltiefe mittel [m]	1,38	1,33	1,37	1,42	1,93	1,62	1,68
I_S min	0,00733	0,00175	0,00138	0,00106	0,00625	0,01153	0,01205
I_S max	0,11385	0,11733	0,10818	0,26747	0,13640	0,13780	0,11808
I_S mittel	0,03118	0,02870	0,02902	0,03765	0,02959	0,06331	0,04777
Q_{max} min [$\frac{m^3}{s}$]	0,0091	0,0035	0,0078	0,0025	0,1047	0,2029	0,2833
Q_{max} max [$\frac{m^3}{s}$]	0,0280	0,0836	0,1069	0,2369	0,4915	0,6908	0,8185
Q_{max} mittel [$\frac{m^3}{s}$]	0,0182	0,0282	0,0468	0,0866	0,1988	0,3808	0,4700
$v_{Q_{max}}$ min [$\frac{m}{s}$]	0,80	0,49	0,49	0,48	1,36	2,02	2,23
$v_{Q_{max}}$ max [$\frac{m}{s}$]	2,47	3,96	3,74	5,68	6,38	6,93	6,89
$v_{Q_{max}}$ mittel [$\frac{m}{s}$]	1,52	1,55	1,76	2,22	2,73	4,26	4,06
A.-Grad min %	25,2	6,7	5,4	1,2	50,9	52,0	53,0
A.-Grad max %	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0
A.-Grad mittel %	76,2	56,8	60,5	56,8	85,7	80,3	82,0
DN [mm]	500	600	700	800	900	1000	1200
Länge [m]	305,30	435,03	2063,50	330,97	739,59	62,85	873,59
Kosten [EUR]	194287,59	325411,15	1847761,57	277016,86	722107,95	65233,44	1040536,52
Anzahl	7	10	38	7	14	1	18
Sohltiefe min [m]	1,50	1,60	1,70	1,93	1,90	2,74	2,20
Sohltiefe max [m]	2,75	2,85	4,82	2,50	3,37	3,13	5,96
Sohltiefe mittel [m]	1,79	1,85	2,93	2,12	2,43	2,93	2,78
I_S min	0,01144	0,00771	0,00256	0,00563	0,00850	0,01631	0,00630
I_S max	0,02999	0,08307	0,04151	0,02770	0,01904	0,01631	0,04717
I_S mittel	0,01806	0,03646	0,01123	0,01232	0,01455	0,01631	0,02346
Q_{max} min [$\frac{m^3}{s}$]	0,3646	0,4843	0,4184	0,8827	1,4801	2,7077	2,7130
Q_{max} max [$\frac{m^3}{s}$]	0,5100	1,3905	1,6167	1,9623	2,2174	2,7077	6,3307
Q_{max} mittel [$\frac{m^3}{s}$]	0,4416	0,8430	0,7244	1,2239	1,9097	2,7077	3,2984
$v_{Q_{max}}$ min [$\frac{m}{s}$]	2,32	2,14	1,36	2,19	2,91	4,31	3,00
$v_{Q_{max}}$ max [$\frac{m}{s}$]	3,68	6,87	5,40	4,88	4,35	4,31	6,99
$v_{Q_{max}}$ mittel [$\frac{m}{s}$]	2,87	4,09	2,43	3,04	3,77	4,31	4,92
A.-Grad min %	77,6	65,5	60,6	90,0	82,8	90,0	37,6
A.-Grad max %	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0
A.-Grad mittel %	88,2	80,6	88,0	90,0	89,4	90,0	68,1

Tabelle 4.5: Synopsis des optimalen Kanalnetzentwurfs



Abbildung 4.7: Bestehendes Abwasserentsorgungsnetz Fitten-Ballern



Abbildung 4.8: Systemgraph zur Kanalnetzoptimierung



Abbildung 4.9: Optimale Lösung für Fitten-Ballern

Das entwickelte Optimierungsmodell verfügt über eine Schnittstelle zum Simulationsmodell SWMM (*Storm Water Management Model*, Version 4.4h, März 2002 [50, 80]), so daß die Hydraulik jedes resultierenden Kanalsystems der Lösungspopulation mit Hilfe des Moduls EXTRAN (*Extended Transport*) verifiziert werden kann. Allerdings ist eine Verifikation nur unter Windows möglich, weil SWMM nur auf dieser Plattform lauffähig ist, während das vorliegende Modell sowohl unter Windows als auch unter Unix/Linux läuft. Während das entwickelte Verfahren, wie oben erwähnt, zur kompletten Ermittlung eines Kanalsystems einschließlich hydraulischer Berechnung durchschnittlich 15 Minuten braucht, brauchte SWMM zur hydrodynamischen Simulation der besten Lösung für Fitten-Ballern 1 Minute und 28,68 Sekunden. Die Volumenbilanz ergab 0,01 %. Die Ergebnisse der Abflußsimulation für die beste Lösung zeigen eine sehr gute Übereinstimmung der Scheitelabflüsse, -fließgeschwindigkeiten und Auslastungsgrad der Kanäle mit der hydraulischen Berechnung des entwickelten Optimierungsmodells (vgl. Anhang B und C). Abb. 4.10 zeigt die Abflußganglinie der Kanalnetzoptimierung („KANOP“) und der Simulation mit SWMM am Systemende.

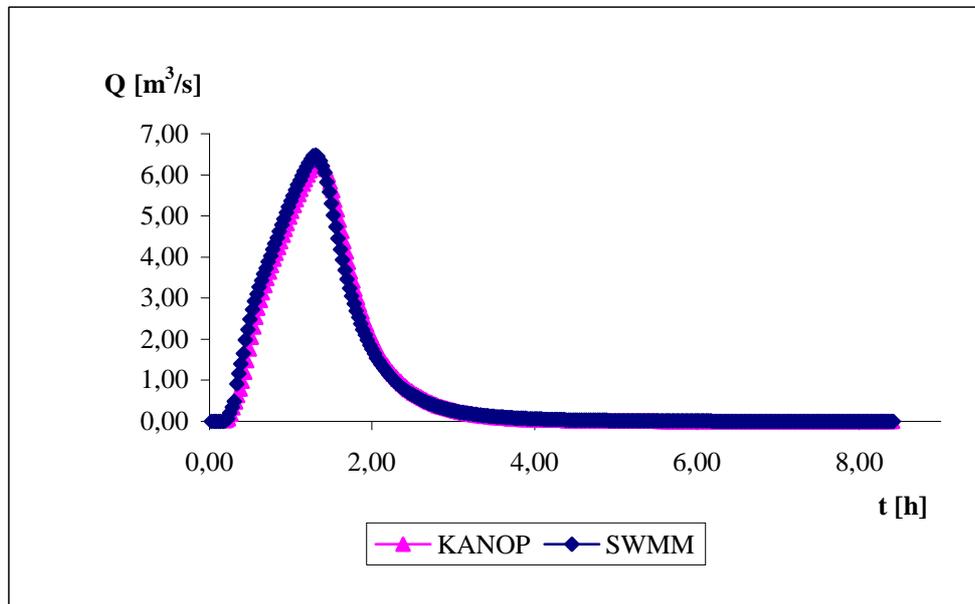


Abbildung 4.10: Abflußganglinie am Systemende

Eine Wellendämpfung ist z.B. im Kanalstrang vom Knoten 1031 bis Knoten 1035 (s. Abb. 4.9) zu beobachten. Der Wellenspitzenwert wird um $0,0111 \text{ m}^3/\text{s}$ geringer, geht von $0,4295$ auf $0,4184 \text{ m}^3/\text{s}$ zurück. Die Sohlenneigung der Kanäle in diesem Abschnitt liegt zwischen $0,0026$ und $0,0041$. Alle Profile sind vom Durchmesser $0,70 \text{ m}$. Dieses Ergebnis zeigt, wie die hydrodynamische Abflußberechnung sich auf die Optimalität der Lösung auswirken kann. Der Wellendämpfungseffekt kann in flachen Gebieten zu signifikanten Kostensenkungen führen.

Eine mit dem Simulationsmodell HYSTEM-EXTRAN [35] durchgeführte vorliegende Berechnung der für denselben Lastfall notwendigen Erweiterung der Profilquerschnitte im bestehenden Netz ³ diene als Grundlage für einen Vergleich mit der Optimierung. Zur Ermittlung von Kanalquerschnitten führt das Modell HYSTEM-EXTRAN zunächst eine Vordimensionierung mit dem Modul ZEBEV aus, wofür die Einbautiefen der Kanäle eingegeben werden müssen. Im Fall eines bestehenden Kanalsystems werden die bestehenden Einbautiefen und Profile übernommen, dann wird die Hydraulik des Systems mit dem Modul EXTRAN solange überprüft und ggf. dabei die Profile korrigiert bis im gesamten Kanalnetz die geforderte Überstauhäufigkeit eingehalten wird.

Das bestehende Netz ist $13\,183,25 \text{ m}$ lang, und das Netzlayout ist festgelegt. Bei der Redimensionierung wurden Rohrdurchmesser bis DN 1400 berücksichtigt. Außerdem ist im realen Netz ein Regenüberlauf am Knoten 1080 (s. Abb. 4.7) vorhanden, so daß ein genauer Vergleich zwischen der Simulation und der Optimierung nicht möglich ist. Dennoch läßt sich zeigen, in welcher Größenordnung ein besseres Ergebnis durch die Optimierung erzielt werden kann. Die minimale Überdeckung beträgt im redimensionierten Netz $0,22 \text{ m}$, im optimalen $1,00 \text{ m}$. Die maximale Sohlentiefe im bestehenden Netz ist gleich $5,96 \text{ m}$, während im optimalen Netz die Sohlentiefen kleiner als $5,00 \text{ m}$ sind (bis $4,83 \text{ m}$, s. Tab.4.5), mit Ausnahme der fiktiven Haltung zwischen den Knoten 1035 und 5000 (s. Abb. 4.9), mit $5,32 \text{ m}$ am Anfang und $5,96 \text{ m}$ am Ende. Diese Haltung wurde aus einem modelltechnischen Grund erfunden, nämlich das Modell SWMM setzt voraus, daß nicht mehr als eine Haltung in die Systemsenke einmündet. Das ma-

³Arbeitsgemeinschaft AQUA-PC/Zimmer & Partner, Ingenieurgesellschaft für Siedlungswasserwirtschaft mbH: Hydraulische Berechnungen - Soll-Zustand, Saarbrücken, Januar 1997

ximale Gefälle im vorhandenen Netz ist 0,34539, im optimalen 0,26747, während die maximale Fließgeschwindigkeit jeweils 7,93 m/s und 6,99 m/s beträgt. Für einen Kostenvergleich wurden die Kosten des Kanalsystems mit erweiterten Profilquerschnitten mit den gegebenen Kostenfunktionen (s. Tabelle 4.3) errechnet. Das Profil DN 1400 wurde wie DN 1200 berücksichtigt. Die Kosten der redimensionierten Kanalisation belaufen sich auf 10 151 786,96 EUR. Demgegenüber stellen die Kosten des optimalen Kanalsystems (8 808 334,06 EUR) eine Ersparnis von 13,23% dar.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Kanalnetzberechnung existieren konventionelle Verfahren und Niederschlag-Abfluß-Modelle, die den Niederschlagsabflußvorgang in urbanen Einzugsgebieten simulieren. Konventionelle Verfahren rechnen mit Maximalabflußwerten. Niederschlag-Abfluß-Modelle berücksichtigen den zeitlichen und räumlichen Ablauf des Regenabflusses. Allgemein werden konventionelle Verfahren weiterhin zur Neubemessung der Kanalisation kleiner Einzugsgebiete sowie zur Vordimensionierung größerer Kanalnetze eingesetzt, während hydrologische Modelle zur Speicherbewirtschaftung oder Schmutzfrachtberechnung und hydrodynamische Modelle zum Nachweis der hydraulischen Leistungsfähigkeit neuer oder bestehender Netze verwendet werden.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Modell zur Kanalnetzoptimierung präsentiert, das unter Einhaltung technischer Restriktionen die Netztopologie, die Profile, Sohlentiefen einschließlich Sohlengefälle der Kanäle, Förderhöhen und Pumpensumpfvolumina von Pumpwerken, Regenbeckenvolumina und die minimalen Kosten des gesamten Abwasserentsorgungsnetzes systemanalytisch für vorgegebene Bemessungsabflüsse ermittelt und dabei eine haltungsbezogene hydrodynamische Abflußsimulation vollzieht.

Der Stand der Entwicklung zeigt, wie der Kanalnetzentwurf der gegenwärtigen Praxis auf vereinfachte Methoden und Iterationsverfahren zurückgreift: Die Auswahl der Trassenführung erfolgt in der Regel nach dem Straßenmuster, den Geländegegebenheiten etc, die Bemessung und Nachrechnung von Entwässerungsnetzen geht von der Summation der Trockenwetterabflüsse über die Fließzeitverfahren bis zu den hydrologischen und hydrodynamischen Simulationsmodellen; während in der Forschung Optimierungs-

methoden seit den 1960-er Jahren eingesetzt worden sind. Allgemein wird die Kanalnetzoptimierung in zwei Aufgabenstellungen aufgegliedert: Die Ermittlung des optimalen Netzlayouts und des optimalen Designs der Kanäle. Zur Layoutoptimierung werden Verfahren wie Evolutionsstrategien und Genetische Algorithmen eingesetzt, während zur Designoptimierung sich Verfahren der Dynamischen Programmierung durchgesetzt haben. Aufgrund der Komplexität der Aufgabe werden Vereinfachungen vorgenommen, z. B. wird die Hydraulik des Ableitungssystems auf die Berechnung mit stationären Abflüssen reduziert, was sich auf die Optimalität der Lösung auswirkt. Aus dem Stand der Kanalnetzberechnung läßt sich erkennen, daß noch kein anwendungsreifes Modell zur Optimierung städtischer Kanalisationen zur Verfügung steht.

Auch die vorliegende Modellentwicklung ist in die Layout- und die Designoptimierung aufgegliedert. Zur Layoutoptimierung werden die Evolutionsstrategien mit Mutations-Schrittweiten-Regelung, einem an die lokale Topologie des Lösungsraums selbsttätigen Adaptationsmechanismus, der die Suche nach dem Optimum steuert, verwendet. Evolutionsstrategien erweisen sich als effiziente Suchverfahren zur Auswahl optimaler graphentheoretischer Bäume aus dem in der Regel zugrundegelegten vermaschten Straßennetz. Im Übertragungsmodell wird eine Analogie zwischen den Chromosomen eines Lebewesens und den Knoten und Kanten eines Kanalsystemgraphs aufgestellt. Ausgehend von einer Menge (Population) zufällig generierter Netzlayouts werden durch Zufallsmechanismen (Mutation, Crossover/Rekombination oder Multirekombination) weitere Lösungen (Individuen) erzeugt. In diesem Prozeß erfolgt die Bewertung jeder Lösung mit Hilfe der Designoptimierung. Nach der Selektion der besten Lösungen einer Population werden diese an die nächste Generation übergeben. Nach mehreren Generationen konvergiert das Verfahren zum globalen Optimum, oder es werden annähernd optimale Lösungen erreicht. Im entwickelten Lösungsalgorithmus sind die Evolutionsstrategien in der Plus- und Komma-Version, mit Mutation, mit/ohne Rekombination oder Multirekombination und mit/ohne Populationswelle implementiert worden.

Zur Designoptimierung wird die Dynamische Programmierung verwendet. Das Verästelungsnetz wird durch Iso-Knoten-Linien in Stufen zerlegt, was den haltungsbezogenen Entscheidungsprozeß des Entwurfs für vorgegebene Belastungsabflüsse und die Einbeziehung der planungstechnischen Aspekte –Berechnung der Kanalneigung je nach Wahl

des hydraulischen Ansatzes, haltungsbezogenen hydrodynamischen Abflußberechnung, beliebigen Querschnittsformen der Profile, beliebig strukturierten Kostenfunktionen, technischen Restriktionen für die Fließgeschwindigkeit, Einbautiefe, Volumen der Speicherelemente etc– gestattet.

Jede Stufe kann aus mehreren Haltungen bestehen. Sohlentiefen, Abflüsse und Kosten stellen die Zustandsvariablen und Profile die Entscheidungsvariable dar. Der Bereich zwischen der minimal und maximal zulässigen Sohlentiefe wird diskretisiert. Das Tiefeninkrement (Δs) ist ein Eingabeparameter. Eine durchgeführte Untersuchung dieses Parameters ergab, daß $\Delta s = 0,20$ m angesetzt werden kann, was eine Diskretisierung impliziert, die außer der besten Lösung weitere kostengünstige Designs des gesamten Kanalsystems zur Verfügung stellt und den damit verbundenen Rechenaufwand in Grenzen hält. Für jede Haltung auf einer Stufe wird folgender Prozeß ausgeführt: Für jedes zur Verfügung stehende Profil werden der Systemzustand und die zugehörigen Kosten berechnet und dem entsprechenden Tiefenintervall am Haltungsende zugeordnet, dabei wird für das verfügbare Profil unter Berücksichtigung der Restriktionen das Sohlengefälle zur Ableitung des Maximalwerts der Abwasserwelle nach dem Prandtl-Colebrook- oder Gauckler-Manning-Strickler-Ansatz ermittelt, dann wird von jedem Intervall am Haltungsende die kostenminimale Lösung weiterverfolgt. In einem Verfahrensschritt werden die Kanten zwischen zwei in Richtung Systemende aufeinanderfolgenden Iso-Knoten-Linien bearbeitet.

Unter Vorgabe der Standorte können Sonderbauwerke wie Pumpwerke und Regenbecken in die Optimierung eingebunden werden. Im Fall eines Pumpwerks wird zur Ermittlung der wirtschaftlich besten Lösung der Zustandsraum um den Förderstrom und das Pumpensumpfvolumen erweitert, während die Förderhöhe eine weitere Entscheidungsvariable darstellt. Im Fall eines Regenbeckens werden als Entscheidungsvariable der Beckenzufluß und als Zustandsvariable das Beckenvolumen, das kostenminimal ermittelt wird, berücksichtigt. Das Lösungsverfahren gestattet, vorhandene Haltungen im Netz im Optimierungsprozeß mitzubearbeiten, so daß es auch der Sanierung von Kanalnetzen dienen kann.

Im entwickelten Modell wird die Abflußberechnung in den Haltungen über ein direktes implizites Differenzenverfahren zur Lösung des Saint-Venant

Differentialgleichungssystem, das die hydraulischen Gesetzmäßigkeiten des instationären, ungleichförmigen Fließvorgangs im Kanalnetz mathematisch beschreibt, vollzogen. Um den Rechenaufwand zu reduzieren, werden *sweep*-Methoden eingesetzt. Im Fall strömenden Fließzustands wird das Gleichungssystem durch ein *double sweep*, im Fall kritischer oder schießender Strömung durch ein *single sweep*, das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt wurde, gelöst. Das Verfahren zur haltungsbezogenen Abflußsimulation wurde eingehend anhand von Beispielen überprüft. Darüber hinaus wurde eine parameterorientierte Analyse der zeitlichen und räumlichen Diskretisierung des Abflußgeschehens durchgeführt, um zu untersuchen, wie sich der Zeitschritt Δt und der Wegschritt Δx auf die Wellenverformung und die Volumenbilanz auswirken. Allgemein können Δt zwischen 20 s und 50 s und Δx zwischen 20,00 m und 50,00 m angesetzt werden. Dennoch sind beide Parameter jeweils in Abhängigkeit von den vorgegebenen Zuflußdaten zu wählen.

Indem die hydrodynamische Abflußberechnung simultan zum Design des Kanals haltungsweise erfolgt, wird die aufgrund des Retentionsvorgangs im Kanal auftretende Wellendämpfung, die im Fall einer Haltung mit flachem Sohlengefälle nicht vernachlässigbar ist, mitberücksichtigt, so daß damit eine Überdimensionierung der Nachfolgehaltung vermieden wird. Im Fall einer Haltung mit steiler Kanalneigung unterscheiden sich die Ergebnisse der Abflußberechnung mit einer vereinfachten und der vollständigen Form des Saint-Venant Gleichungssystems wenig voneinander. Um die Rechenzeit zu reduzieren, wird deshalb im entwickelten Verfahren der Abflußtransport im Kanal ab Sohlengefällen größer oder gleich 0,005 nach dem kinematischen Wellenansatz berechnet.

Im entwickelten Modell besteht die Option, die Designoptimierung einzeln für eine vorgegebene Netztopologie auszuführen. Wie oben erwähnt werden außer dem besten Design andere kostengünstige Lösungen für das vorgegebene Netzlayout ermittelt. Mit der Einbindung der Design- in die Layoutoptimierung sind dann entsprechend in der Lösungspopulation außer der besten Lösung, die Layout und Design einschließt, andere Layouts mit jeweils dazugehörenden Lösungsdesigns enthalten.

Programmtechnisch ist das entwickelte Modell modular aufgebaut und plattformunabhängig. Es läuft sowohl unter Windows als auch unter Unix/Linux. Das Modul zur

Designoptimierung ist in FORTRAN geschrieben. Das Modul zur Layoutoptimierung sowie der Gesamtalgorithmus, der die Design- in die Layoutoptimierung einbindet und über eine Schnittstelle zum Simulationsmodell SWMM (*Storm Water Management Model*) zur Verifikation des hydraulischen Verhaltens der resultierenden Kanalnetze verfügt, ist in C++ geschrieben.

Das vorliegende Modell ist anhand eines Planungsbeispiels verifiziert worden. Die Ergebnisse bestätigen das Modellkonzept. Das Optimierungsmodell ermittelt eine Lösung, die die einzuhaltenden planungstechnischen Kriterien berücksichtigt und zugleich wirtschaftlich besser als eine mit Hilfe eines Simulationsmodells durchgeführte Redimensionierung des realen Entwässerungsnetzes ist (s. Kapitel 4: Kostenersparnis von 13,23%). Im bestehenden Kanalnetz Fitten-Ballern liegt das Geländegefälle zwischen zwei Knoten, die durch eine Haltung miteinander verknüpft sind, zwischen 0,2 m und 7,0 m, so daß in einem Abwassernetz wie diesem zum Teil die Trasse, die Fließrichtung, ggf. auch das Sohlgefälle, der Haltungen –je größer das Geländegefälle– durch die Geländegegebenheiten definiert werden, ohne viel Raum für andere Varianten zu bieten. Durch diese örtlichen Randbedingungen war das Einfügen von neuen Kanten im Ableitungsnetz Fitten-Ballern zur Untersuchung der Netztopologie beschränkt (vgl. das bestehende Netz (Abb. 4.7) mit dem daraus generierten Systemgraph zur Kanalnetzoptimierung (Abb. 4.8)).

Dennoch konnte ein Ergebnis in der oben erwähnten Größenordnung erreicht werden, das eine Verbesserung der Kosteneffizienz im Vergleich zu einem Design mit einem Verfahren aus der gegenwärtigen Praxis darstellt. Am Planungsbeispiel (s. Kapitel 4) läßt sich zeigen, daß auch im Fall eines Entwässerungsnetzes wie in Fitten und Ballern, mit den oben beschriebenen Systemgegebenheiten, ein Optimierungspotenzial, das durch die existierenden Entwurfsverfahren nicht genutzt wird, vorhanden ist.

In Fällen wie: Kanalsysteme mit einem stark vermaschten Basisgraph, so daß die Möglichkeiten zur Auslegung der Kanäle sich vervielfachen; oder Kanalnetze in flachen Geländen, so daß die Richtung der Kanten nicht vorab definierbar ist; oder Kanalisationen, bei denen die Kanäle sowohl mit einem kleinen Profil und steilem Sohlgefälle als auch mit einem größeren Profil und flachem Gefälle verlegt werden können, so daß den Baukosten die laufenden Kosten wie für den Betrieb und die Instandhaltung ge-

genüberzustellen sind (denn für den Kanal mit steilem Gefälle können die Baukosten überwiegen, während für den Kanal mit flachem Gefälle die laufenden Kosten entscheidend sein können); in Fällen wie diesen sind dann mit dem vorliegenden entwickelten Modell noch bessere Ergebnisse der Optimierung im Vergleich zu anderen Methoden zu erwarten.

Eine mögliche Weiterentwicklung des Modells könnte die Berechnung des Oberflächenabflusses zur Ermittlung der Abflußganglinien beinhalten.

Das Modell könnte auch auf die hydraulische Nachbildung von Entlastungsbauwerken wie Regenüberläufen und Regenüberlaufbecken erweitert werden, um die Einsatzmöglichkeiten in der Praxis auszudehnen.

Ebenfalls könnte das Modell auf die Schmutzfrachtberechnung erweitert werden, um die Planung eines Entwässerungssystems unter Berücksichtigung des Schmutzstofftransports zu gestatten.

Darüber hinaus könnte das entwickelte Modell mit einem Kläranlagenmodell verkoppelt werden, um eine übergreifende Planung von Kanalnetz und Kläranlage zu ermöglichen. Programmtechnisch wäre die Parallelisierung des Rechenprogramms sinnvoll, denn der Einsatz mehrerer Prozessoren zur Lösung der Aufgabe würde die Rechenleistung des Programms steigern, was die Rechenzeit wesentlich reduzieren würde. Indem die Individuen (die Netzlayouts) einer Generation durch die Designoptimierung parallel bewertet werden würden, könnte z. B. die Rechenzeit der $(3/2 + 6)$ -ES, die die beste Lösung für das Abwasserentsorgungssystem Fitten-Ballern ergab, von 2 d 10 h 30 m 7,63 s (s. Kapitel 4) auf ca. 9 h 45 m reduziert werden.

Bisher können Rechenergebnisse des Optimierungsmodells in eine Microsoft Access Datenbank zur grafischen Darstellung gelesen werden. Die grafische Oberfläche dient der Visualisierung und Interpretation der Eingabe- und Ausgabedaten. Das Kanalnetz wird auf dem Lageplan in Abhängigkeit von den verschiedenen Parametern, mit Optionen für Detailausschnitte, Abflußdiagramme etc dargestellt. Es wäre von Nutzen, diese grafische Oberfläche zur Darstellung der Kanalnetzdaten weiterzuentwickeln, ferner sie mit einem Kanalinformationssystem zu verknüpfen.

Literatur

- [1] Abbott, M. B.: A modelling system for the design and operation of storm-sewer networks. In: Engineering applications of computational hydraulics, Vol. 1: Homage to Alexandre Preissmann, Boston: Pitman 1982 (Monographs and surveys in water resources engineering, 5), pp. 11-36
- [2] Abbott, M. B., Minns, A. W.: Computational Hydraulics, Ashgate Publ. 1998, 2nd ed.
- [3] Argaman, Y., Shamir, U., Spivak, E.: Design of optimal sewerage systems. Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, Vol. 99, No. EE5, 1973, pp. 703-716
- [4] ATV-DVWK. Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 110: Hydraulische Dimensionierung und Leistungsnachweis von Abwasserkanälen und -leitungen, September 2001
- [5] ATV-DVWK. Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 117: Bemessung von Regenrückhalteräumen, März 2001
- [6] ATV. Arbeitsblatt ATV - A 118: Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen, November 1999
- [7] ATV. Arbeitsblatt ATV - A 119: Grundsätze für die Berechnung von Entwässerungsnetzen mit elektronischen Datenverarbeitungsanlagen, Oktober 1984
- [8] ATV, DVWK. Arbeitsblatt ATV - A 120: Richtlinien für das Prüfen elektronischer Berechnungen von Kanalnetzen, August 1979
- [9] ATV. Merkblatt ATV - M 165: Anforderungen an Niederschlag-Abfluß-Berechnungen in der Stadtentwässerung, April 1994
- [10] ATV. ATV - Handbuch: Planung der Kanalisation. Berlin: Ernst & Sohn Verl. 1995, 4. Aufl.
- [11] Bellman, R.: Dynamic Programming, Princeton Univ. Pr. 1972, 6th print.
- [12] Bellman, R., Dreyfus, S. E.: Applied Dynamic Programming, Princeton Univ. Pr. 1962
- [13] Berge, C.: Graphs, North-Holland 1985, 2nd rev. ed. (North-Holland Mathematical Library 6,1)

-
- [14] Bollrich, G.: Technische Hydromechanik, Bd. 1: Grundlagen, Berlin: Verl. f. Bauwesen 1996, 4. durchges. Aufl.
- [15] Cembrowicz, R. G.: Siedlungswasserwirtschaftliche Planungsmodelle: Methoden und Beispiele, Springer-Verl. 1988
- [16] Cembrowicz, R. G.: Evolution Strategies and Genetic Algorithms in water supply and waste water systems design. In: Water Resources and Distribution, Eds.: W. R. Blain et al., Southampton: Computational Mechanics Publ. 1994 (Hydraulic Engineering Software 5,1), pp. 27-39
- [17] Cembrowicz, R. G., Krauter, G. E.: Anwendung von Operations Research Verfahren zur Planung von städtischen Kanalisationsnetzen. 1. Zwischenbericht i. A. der DFG, Univ. Karlsruhe, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, 1983
- [18] Cembrowicz, R. G., Krauter, G. E.: Anwendung von Operations Research Verfahren zur Planung von städtischen Kanalisationsnetzen. 2. Zwischenbericht i. A. der DFG, Univ. Karlsruhe, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, 1986
- [19] Cembrowicz, R. G., Krauter, G. E.: Design of cost optimal sewer networks. In: Topics in urban storm water quality, planning and management, Proc. of the 4th International Conference in Urban Storm Drainage, 22. Congress IAHR, Lausanne, 31.8.-4.9.1987, Eds.: W. Gujer et al., pp. 367-372
- [20] Charalambous, C., Elinam, A. A.: Heuristic design of sewer networks. Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 6, 1990, pp. 1181-1199
- [21] Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W.: Applied Hydrology, McGraw-Hill 1988
- [22] Cunge, J. A., Holly, F. M., Verwey, A.: Practical Aspects of Computational Hydraulics, Pitman 1980 (Monographs and surveys in water resources engineering, 3)
- [23] Dajani, J. S., Gemmel, R. S., Morlok, E. K.: Optimal design of urban wastewater collection networks. Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol. 98, No. SA6, 1972, pp. 853-867
- [24] Dajani, J. S., Hasit, Y.: Capital cost minimization of drainage networks. Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, Vol. 100, No. EE2, 1974, pp. 325-337

-
- [25] Darwin, C.: On the Origin of Species, Harvard Univ. Pr. 1979, 5th print. A facsimile of the 1st ed. (1859) with an introd. by Ernst Mayr.
- [26] Davis, L. D., De Jong, K., Vose, M. D., Whitley, L. D. (Eds.): Evolutionary Algorithms, The IMA Volumes in Mathematics and its Applications, Vol. 111, Springer-Verl. 1999
- [27] DHI. MOUSE: An integrated modelling package for urban drainage and sewer systems, 1998, <http://www.dhi.dk>
- [28] DIN. DIN EN 752-2: Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden-Teil 2, Anforderungen, September 1996
- [29] Elimam, A. A., Charalambous, C., Ghobrial, F. H.: Optimal design of large sewer networks. Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 115, No. 6, 1989, pp. 1171-1190
- [30] Engel, N.: Hydrologische Simulation der Abflußtransformation in Kanalisationsnetzen. TH Darmstadt, Institut für Wasserbau, Technische Berichte über Ingenieurhydrologie u. Hydraulik Nr. 52, 1994
- [31] Falkenauer, E.: Applying Genetic Algorithms to real-world problems. In: The IMA Volumes in Mathematics and its Applications, Vol. 111, Springer-Verl. 1999, pp. 65-88
- [32] Franke, P. G.: Die Rauigkeitsverhältnisse im teilgefüllten Rohr. Die Wasserwirtschaft, Bd. 46, Nr. 12, 1956, S. 315-318
- [33] Froise, S., Burges, S. J.: Least-cost design of urban-drainage networks. Journal of the Water Resources Planning and Management Division, ASCE, Vol. 104, No. WR1, 1978, pp. 75-92
- [34] Fuchs, L.: Hydrologische Leistungsfähigkeit städtischer Kanalnetze. Univ. Hannover, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Mitteilungen H. 63, 1987, zugl. Dissertation
- [35] Fuchs, L., Verworn, H. R.: Modellbeschreibung HYSTEM-EXTRAN, Version V.1, itwh, Hannover, 1993, <http://www.itwh.de>
- [36] Goldberg, D. E.: Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989

-
- [37] Goldberg, D. E., Kuo, C. H.: Genetic Algorithms in pipeline optimization. *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 1, No. 2, 1987, pp. 128-141
- [38] Groot, C. de, Würtz, D., Hoffmann, K. H.: Optimizing complex problems by nature's algorithms: Simulated Annealing and Evolution Strategy– a comparative study. In: *Parallel Problem Solving from Nature*, Proc. of the 1st Workshop, PPSN I, Dortmund, FRG, October 1-3, 1990, Eds.: H. P. Schwefel et al., Springer-Verl. 1991 (Lecture Notes in Computer Science, 496), pp. 445-454
- [39] Gupta, J. M., Agarwal, S.K., Khanna, P.: Optimal design of wastewater collection systems. *Journal of the Environmental Engineering Division*, ASCE, Vol. 102, No. EE5, 1976, pp. 1029-1040
- [40] Hager, W. H.: *Abwasserhydraulik: Theorie und Praxis*, Springer-Verl. 1994, korrig. Nachdruck 1995
- [41] Hahn, H. H.: *Dynamisches Programmieren. Wasser und Abwasser in Forschung und Praxis*, Bd. 5: Operations Research und seine Anwendung in der Siedlungswasserwirtschaft. E. Schmidt Verl. 1972, S. 143-174
- [42] Haith, D.: Vertical alignment of sewers and drainage systems by Dynamic Programming. Master's thesis, MIT Cambr. Mass. 1966
- [43] Heidari, M.: A Differential Dynamic Programming approach to water resources analysis. PhD thesis, Department of Civil Engineering, Univ. of Illinois, Urbana-Champaign Ill. 1970
- [44] Heidari, M., Chow, V. T., Kokotović, P. V., Meredith, D. D.: Discrete Differential Dynamic Programming approach to water resources systems optimization. *Water Resources Research*, Vol. 7, No. 2, 1971, pp. 273-282
- [45] Hillier, F. S., Lieberman, G. J.: *Introduction to Operations Research*, Holden-Day 1967
- [46] Hillier, F. S., Lieberman, G. J.: *Operations Research: Einführung*, Oldenbourg Verl. 1997, 5. Aufl.
- [47] Hoffmeister, F., Bäck, T.: Genetic Algorithms and Evolution Strategies: similarities and differences. In: *Parallel Problem Solving from Nature*, Proc. of the 1st Workshop, PPSN I, Dortmund, FRG, October 1-3, 1990, Eds.: H. P. Schwefel et al., Springer-Verl. 1991 (Lecture Notes in Computer Science, 496), pp. 455-469

-
- [48] Holland, J. H.: *Adaptation in natural and artificial systems*, Univ. of Michigan Pr. 1975.
- [49] Holland, J. H.: *Adaptation in natural and artificial systems*, 5th print. MIT Pr. 1998
- [50] Huber, W. C., Dickinson, R. E.: *Storm Water Management Model (SWMM) Version 4, User's Manual*. Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U. S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia 30613, EPA/600/3-88/001a, NTIS PB88-236641/AS, 1st print. August 1988, 2nd print. October 1992, <http://www.ccee.orst.edu/swmm>
- [51] Idelçik, I. E.: *Handbook of Hydraulic Resistance*, Washington, DC: Hemisphere Publ. 1986, 2nd rev. and augm. ed.
- [52] Jakobs, J.: *Quantifizierung der Wirkung von Kanalnetzbewirtschaftungsmaßnahmen mit Hilfe des detailliert hydrodynamischen Schmutzfrachtmodells HAUSS*. Univ. Karlsruhe, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Schriftenreihe 84, 1998, zugl. Dissertation
- [53] Ji, Z.: *General hydrodynamic model for sewer/channel network systems*. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 3, 1998, pp. 307-315
- [54] Kibler, D. F., Mehler, H., Mühlbauer, J., Shubinski, R. P., Stottmann, W.: *Berechnung von städtischen Kanalisationsnetzen mit Hilfe von Simulationsmodellen*. In: *Methoden der Kanalnetzberechnung*, Dortmunder Arbeitstagung vom 6. Dezember 1973, Hrsg.: B. Haendel, Univ. Dortmund, Institut für Umweltschutz und Umweltgüteplanung, 1974, S. 111-187
- [55] Kölling, C.: *Finite-Element-Simulation der Geschwindigkeitsverteilung in Kanälen und teilgefüllten Rohrleitungen*. TU München, Lehrstuhl für Hydraulik und Gewässerkunde, Mitteilung 60, 1994, zugl. Dissertation
- [56] Kölling, C., Valentin, F.: *SIMK - Simulation von Teilfüllungskurven*. *Korrespondenz Abwasser*, Bd. 46, Nr. 3, 1999, S. 410-413
- [57] Kuo, J. T., Yen, B. C., Hwang, G. P.: *Least-cost optimal sewer system design considering box-sewers*. In: *Topics in urban storm water quality, planning and management*, Proc. of the 4th International Conference in Urban Storm Drainage, 22. Congress IAHR, Lausanne, 31.8.-4.9.1987, Eds.: W. Gujer et al., pp. 391-396

-
- [58] Kuo, J. T., Yen, B. C., Hwang, G. P.: Optimal design for storm sewer system with pumping stations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 117, No. 1, 1991, pp. 11-27
- [59] Li, G. Y., Matthew, R. G. S.: New approach for optimization of urban drainage systems. *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 5, 1990, pp. 927-944
- [60] Liebman, J. C.: A heuristic aid for the design of sewer networks. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, ASCE, Vol. 93, No. SA4, 1967, pp. 81-90
- [61] Lohbeck, T. K.: Genetic Algorithms in layout selection for tree-like pipe networks. Master's thesis, Faculty of Engineering, Univ. of Exeter, Exeter, UK, January 1993
- [62] Machado, J. M., Shiyou, Y., Ho, S. L., Peihong, N.: A common Tabu Search algorithm for the global optimization of engineering problems. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Elsevier Science, Volume 190, Issues 26-27, 2001, pp. 3501-3510
- [63] Mays, L. W., Wenzel, H. G.: Optimal design of multilevel branching sewer systems. *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 5, 1976, pp. 913-917
- [64] Mays, L. W., Wenzel, H. G., Liebman, J. C.: Model for layout and design of sewer systems. *Journal of the Water Resources Planning and Management Division*, ASCE, Vol. 102, No. WR2, 1976, pp. 385-405
- [65] Mays, L. W., Yen, B. C.: Optimal cost design of branched sewer systems. *Water Resources Research*, Vol. 11, No. 1, 1975, pp. 37-47
- [66] Michalewicz, Z.: *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer-Verl. 1996, 3rd ed.
- [67] Miles, S. W., Heaney, J. P.: Better than 'optimal' method for designing drainage systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 114, No. 5, 1988, pp. 477-499
- [68] Mulligan, A. E., Brown, L. C.: Genetic Algorithms for calibrating water quality models. *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 3, 1998, pp. 202-211
- [69] Müller-Merbach, H.: *Operations Research*, Verl. F. Vahlen München 1985, 3. durchges. Aufl.

-
- [70] Neumann, K., Morlock, M.: Operations Research, C. Hanser Verl. 1993
- [71] Orth, H.: Operations Research in der Praxis der Siedlungswasserwirtschaft. gwf-wasser/abwasser, Bd. 118, H. 7, 1977, S. 333-340
- [72] Orth, H.: Model-based Design of Water Distribution and Sewage Systems, John Wiley & Sons 1986
- [73] Parker, M. A., Savic, D. A., Walters, G. A., Kappelan, Z.: SewerNet: A Genetic Algorithm application for optimising urban drainage systems. International Conference on Urban Drainage via Internet, 18-25 May 2000
- [74] Pereira, D. J. F., Walters, G. A.: A computer package for global design and planning of storm and foul sewerage. Proc. of the Drainage and Waste Management Conference, Dundee, May 1989
- [75] Preissmann, A.: Numerische Verfahren zur Berechnung instationärer Gerinneströmungen. In: Elektronische Berechnung von Rohr- und Gerinneströmungen, Hrsg.: W. Zielke, E. Schmidt Verl. 1974, S. 393-422
- [76] Price, R. K.: Simulation of urban drainage systems. In: Computer Modelling of Free Surface and Pressurized Flows, Eds.: M. H. Chaudhry et al., Kluwer Acad. Publ. 1994 (Nato ASI series/E, 274), pp. 409-443
- [77] Rauch, W., Harremoës, P.: On the application of evolution programs in urban drainage modelling. 4th International Conference on Developments in Urban Drainage Modelling, London, 21-24 September 1998, Ed.: D. Butler, Oxford, 1999, pp. 781-788
- [78] Rechenberg, I.: Evolutionsstrategie - Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution, F. Frommann Verl. 1973, Problematika Bd. 15
- [79] Rechenberg, I.: Evolutionsstrategie, F. Frommann Verl. 1994
- [80] Roesner, L. A., Dickinson, R. E.: Storm Water Management Model (SWMM) Version 4, User's Manual - EXTRAN Addendum. Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U. S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia 30613, EPA/600/3-88/001b, NTIS PB88-236658/AS, 1st print. August 1988, 2nd print. February 1989, 3rd print. October 1992

-
- [81] Rohlfing, R.: Echtzeitsteuerung von Entwässerungssystemen mit Optimierungsverfahren - Durchführbarkeitsanalyse mit hydrodynamischer Simulation der Abflußvorgänge. Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz H. 8, 1994
- [82] Saint-Venant, A. J. C. Barré de: Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l'introduction des marées dans leur lit (Theory of nonpermanent movement of waters with application to the floods of rivers and to the introduction of the tides within their bed). Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences, Paris 1871, t. LXXIII, pp. 147-154, 237-240
- [83] Sauerbrey, M.: Wasser und Abwasser in Forschung und Praxis, Bd. 1: Abfluß in Entwässerungsleitungen unter besonderer Berücksichtigung der Fließvorgänge in teilgefüllten Rohren. E. Schmidt Verl. 1969
- [84] Schilling, W.: Operationelle Siedlungsentwässerung: Konzeptionen zur Abflußsteuerung und Speicherbewirtschaftung in Entwässerungssystemen, Oldenbourg Verl. 1990
- [85] Schmitt, T. G.: Der instationäre Kanalabfluß in der Schmutzfrachtmodellierung. Univ. Karlsruhe, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Schriftenreihe 42, 1985, zugl. Dissertation
- [86] Schmitt, T. G.: Abflußmodelle zur Kanalnetzberechnung und ihre Prüfung. Entsorgungspraxis, Nr. 7-8, 1997, S. 53-58
- [87] Schmitt, T. G. (Hrsg.): Stoffströme in der Urbanhydrologie, Bd. 2: Stofftransport und -retention in der Kanalisation. Univ. Karlsruhe, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Schriftenreihe 86, 1997
- [88] Schmitt, T. G., Thomas, M.: Rechnerischer Nachweis der Überstauhäufigkeit auf der Basis von Modellregen und Starkregenserien. KA - Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall, Bd. 47, Nr. 1, 2000, S. 63-69
- [89] Schöneburg, E., Heinzmann, F., Feddersen, S.: Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien, Addison-Wesley 1994
- [90] Schwefel, H. P.: Evolutionsstrategie und numerische Optimierung. Technische Universität Berlin, Dissertation, 1975

-
- [91] Sevük, A. S.: Unsteady flow in sewer networks. PhD thesis, Univ. of Illinois, Urbana-Champaign Ill. 1973
- [92] Sevük, A. S., Yen, B. C., Peterson, G. E.: Illinois Storm Sewer System Simulation Model: User's Manual. Water Resources Center Research, Univ. of Illinois, Urbana-Champaign Ill., Report 73, October 1973
- [93] Sieker, F.: Bildung und Anwendung von Starkregenserien für den Überstaunachweis bei Misch- und Regenwasserkanälen. *gwf-Wasser/Abwasser*, Bd. 138, Nr. 5, 1997, S. 260-263
- [94] Sieker, H.: Generelle Planung der Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten. TU Darmstadt, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Mitteilungen H. 116, 2001, zugl. Dissertation
- [95] Simpson, A. R., Dandy, G. C., Murphy, L. J.: Genetic Algorithms compared to other techniques for pipe optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 120, No. 4, 1994, pp. 423-443
- [96] Strelkoff, T. S.: Numerical solution of Saint-Venant equations. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 96, No. HY1, 1970, pp. 223-252
- [97] Tiedt, W.: Hydrodynamische Untersuchung des Teilfüllungsproblems. TH Darmstadt, Institut für Hydraulik und Hydrologie, Technischer Bericht 7, 1971
- [98] Valentin, F., Kölling, C.: SIMK - Simulation von Teilfüllungskurven. *KA - Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall*, Bd. 48, Nr. 1, 2001, S. 29-32
- [99] Verworn, H. R.: Die Anwendung von Kanalnetzmodellen in der Stadthydrologie. *Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz*, H. 18, 1999
- [100] Verworn, W.: Hydrodynamische Kanalnetzberechnung und die Auswirkungen von Vereinfachungen der Berechnungsgleichungen. Univ. Hannover, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Mitteilungen H. 47, 1980, S. 177-324
- [101] Walsh, S., Brown, L. C.: Least cost method for sewer design. *Journal of the Environmental Engineering Division*, ASCE, Vol. 99, No. EE3, 1973, pp. 333-345
- [102] Walters, G. A.: The design of the optimal layout for a sewer network. *Engineering Optimization*, Vol. 9, 1985, pp. 37-50

-
- [103] Walters, G. A., Cembrowicz, R. G.: Optimal design of water distribution networks. In: Water Supply Systems, Eds.: E. Cabrera, F. Martínez, Southampton: Computational Mechanics Publ. 1993, pp. 91-117
- [104] Walters, G. A., Lohbeck, T.: Optimal layout of tree networks using Genetic Algorithms. Engineering Optimization, Vol. 22, 1993, pp. 27-48
- [105] Walters, G. A., Pereira, D. J. F.: Optimal design of parallel storm and foul sewer systems. Civil Engineering Systems, Vol. 7, No. 4, 1990, pp. 191-198
- [106] Walters, G. A., Smith, D. K.: Evolutionary design algorithm for optimal layout of tree networks. Engineering Optimization, Vol. 24, 1995, pp. 261-281
- [107] Weinberg, L.: Network Analysis and Synthesis, McGraw-Hill 1962
- [108] Weiß, G.: Hydraulische Bemessung von Abwasserrohrleitungen nach ATV-Arbeitsblatt A 110. In: Hydromechanische Beiträge zum Betrieb von Kanalnetzen – Wasserbaukolloquium '95– an der TU Dresden, am 12. Oktober 1995, Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen H. 7, 1995, S. 33-49
- [109] Wu, Z. Y., Simpson, A. R.: Competent genetic-evolutionary optimization of water distribution systems. Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, Vol. 15, No. 2, 2001, pp. 89-101
- [110] Yen, B. C.: Methodologies for flow prediction in urban storm drainage systems. Water Resources Center Research, Univ. of Illinois, Urbana-Champaign Ill., Ill., Report 72, August 1973
- [111] Yen, B. C.: Further study on open-channel flow equations. SFB 80/T/49: Ausbreitungs- und Transportvorgänge in Strömungen, Univ. Karlsruhe, 1975
- [112] Yen, B. C., Sevük, A. S.: Design of storm sewer networks. Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, Vol. 101, No. EE4, 1975, pp. 535-553

Anhang A: Knotenindices u. -koordinaten

1	FIT12190M10	2542717.25	5478424.11
2	FIT12190M15	2542681.92	5478429.42
3	FIT12190M20	2542662.90	5478422.01
4	FIT12190M25	2542644.59	5478406.81
6	FIT12190M35	2542668.37	5478358.74
7	FIT12190M40	2542679.87	5478336.76
10	FIT12190M50	2542708.29	5478277.08
11	FIT12190M55	2542730.94	5478229.09
12	FIT12191M10	2543002.27	5478679.51
13	FIT12191M15	2542986.89	5478736.36
15	FIT12191M25	2542942.73	5478784.61
17	FIT12191M35	2542904.40	5478819.59
18	FIT12191M40	2542864.98	5478856.56
19	FIT12191M45	2542835.19	5478908.71
20	FIT12191M5	2543023.79	5478640.38
21	FIT12191M50	2542803.46	5478966.42
22	FIT12191M55	2542782.63	5478985.52
24	FIT12191M65	2542924.66	5478801.75
26	FIT12191XM10	2542957.64	5478803.07
27	FIT12191XM15	2542940.67	5478834.78
28	FIT12191XM20	2542921.00	5478861.77
29	FIT12191XM5	2542974.82	5478771.40
30	FIT12192M10	2543350.22	5478737.65
31	FIT12192M15	2543310.37	5478741.38
32	FIT12192M20	2543294.24	5478771.18
33	FIT12192M5	2543323.34	5478720.48
34	FIT12194M10	2542950.85	5478657.41
35	FIT12194M15	2542954.25	5478692.30
36	FIT12194M20	2542946.44	5478724.82
37	FIT12194M25	2542933.78	5478772.97
38	FIT12194M5	2542947.41	5478624.88
39	FIT12195M10	2543743.22	5478600.38
41	FIT12195M15	2543693.06	5478594.76
42	FIT12195M20	2543645.25	5478589.40
43	FIT12195M25	2543582.88	5478583.63
45	FIT12195M35	2543505.30	5478567.95
46	FIT12195M40	2543440.64	5478561.46
47	FIT12195M45	2543390.12	5478556.89
49	FIT12195M50	2543366.19	5478573.23
50	FIT12195M55	2543343.85	5478601.33
51	FIT12195M60	2543348.38	5478601.50
53	FIT12195M66	2543308.56	5478651.13
55	FIT12196M15	2543208.00	5478658.45
56	FIT12196M20	2543164.30	5478639.78
57	FIT12196M25	2543135.94	5478631.98
59	FIT12196M30	2543197.07	5478698.25
60	FIT12196M35	2543275.86	5478718.26
61	FIT12196M5	2543230.73	5478679.66
62	FIT12197M10	2543514.77	5478684.91
63	FIT12197M15	2543484.18	5478730.44
64	FIT12197M20	2543451.46	5478706.29
66	FIT12197M30	2543503.49	5478715.84
67	FIT12197M35	2543426.11	5478692.99
68	FIT12197M5	2543551.15	5478629.24
69	FIT12198M5	2543287.44	5478634.19
70	FIT12199M10	2543281.00	5478584.44
71	FIT12199M15	2543251.71	5478610.06
72	FIT12199M20	2543371.41	5478662.73
73	FIT12199M25	2543381.01	5478627.24
74	FIT12199M30	2543342.47	5478697.67
75	FIT12199M5	2543310.81	5478597.08
76	FIT12200M10	2543136.95	5478591.69
77	FIT12200M15	2543118.75	5478589.70

78	FIT12200M16	2543090.15	5478579.95
79	FIT12200M20	2543054.22	5478582.64
81	FIT12200M22	2543025.64	5478580.78
83	FIT12200M25	2543155.74	5478599.37
86	FIT12201M10	2542887.40	5478760.84
87	FIT12201M15	2542876.70	5478712.16
88	FIT12201M20	2542868.39	5478663.59
89	FIT12201M25	2542865.18	5478613.66
92	FIT12201M5	2542894.02	5478784.23
93	FIT12202M100	2543538.99	5478831.45
94	FIT12202M105	2543544.88	5478830.91
95	FIT12202M110	2543496.03	5478792.26
96	FIT12202M115	2543444.02	5478763.41
97	FIT12202M120	2543392.09	5478734.55
98	FIT12202M125	2543338.99	5478703.47
99	FIT12202M130	2543290.06	5478672.51
100	FIT12202M132	2543290.60	5478675.02
101	FIT12202M135	2543265.63	5478660.05
102	FIT12202M140	2543237.92	5478642.74
103	FIT12202M145	2543184.46	5478612.26
106	FIT12202M155	2543134.11	5478607.82
108	FIT12202M165	2543118.37	5478607.33
110	FIT12202M170	2543109.82	5478615.79
111	FIT12202M175	2543040.86	5478632.00
112	FIT12202M176	2543071.85	5478621.66
113	FIT12202M180	2543023.34	5478629.41
114	FIT12202M185	2542990.06	5478617.29
115	FIT12202M195	2542954.60	5478603.49
116	FIT12202M200	2542902.93	5478580.57
117	FIT12202M205	2542853.02	5478565.51
118	FIT12202M210	2542800.25	5478550.06
119	FIT12202M211	2542794.56	5478578.18
122	FIT12202M215	2542766.62	5478539.19
123	FIT12202M216	2542750.46	5478534.65
124	FIT12202M220	2542731.22	5478524.41
126	FIT12202M230	2542716.41	5478504.35
127	FIT12202M232	2542719.21	5478487.76
128	FIT12202M235	2542729.58	5478459.38
129	FIT12202M240	2542732.02	5478442.39
130	FIT12202M245	2542753.62	5478395.35
131	FIT12202M250	2542771.34	5478350.62
133	FIT12202M50	2543469.40	5479165.38
135	FIT12202M60	2543456.42	5479127.15
136	FIT12202M65	2543483.61	5479084.14
137	FIT12202M70	2543502.04	5479048.83
138	FIT12202M75	2543518.60	5478992.10
139	FIT12202M80	2543536.15	5478934.86
140	FIT12202M85	2543550.51	5478888.93
141	FIT12202M90	2543553.65	5478870.29
142	FIT12202M95	2543547.02	5478848.65
143	FIT12202XM10	2543577.97	5479097.60
144	FIT12202XM11	2543608.00	5479046.00
145	FIT12202XM15	2543639.15	5478994.93
146	FIT12202XM20	2543708.73	5478879.08
147	FIT12202XM21	2543666.00	5478951.00
148	FIT12202XM25	2543739.49	5478825.01
149	FIT12202XM30	2543758.96	5478790.03
150	FIT12202XM32	2543759.96	5478747.42
151	FIT12202XM35	2543760.23	5478697.22
152	FIT12202XM36	2543780.85	5478657.90
153	FIT12202XM40	2543804.26	5478616.73
154	FIT12202XM45	2543661.95	5478847.86
156	FIT12202XM50	2543611.70	5478816.46
157	FIT12202XM55	2543563.38	5478825.26
158	FIT12202XM9	2543541.00	5479146.00
159	FIT12202XR01	2542781.03	5478319.49
160	FIT12203M10	2542763.79	5478582.27
161	FIT12203M11	2542736.90	5478585.69

162	FIT12203M15	2542772.71	5478612.17
163	FIT12203M20	2542781.21	5478639.74
164	FIT12203M25	2542744.21	5478643.48
166	FIT12203M30	2542785.76	5478678.23
167	FIT12203M35	2542785.22	5478708.00
168	FIT12203M36	2542745.59	5478705.42
169	FIT12203M40	2542782.07	5478732.64
1009	BAL1.7/11	2544015.03	5479693.50
1013	BAL1.7/16	2543959.86	5479701.81
1014	BAL1.7/17	2543918.37	5479708.14
1015	BAL1.7/18	2543881.18	5479743.78
1016	BAL1.7/19	2543848.10	5479778.33
1019	BAL1.7/21	2543927.64	5480017.84
1020	BAL1.7/22	2543889.20	5480050.51
1021	BAL1.7/23	2543847.17	5480085.83
1022	BAL1.7/24	2543811.95	5480114.90
1023	BAL1.7/25	2543754.23	5480165.86
1024	BAL1.7/26	2543712.11	5480131.54
1025	BAL1.7/27	2543658.03	5480103.46
1026	BAL1.7/28	2543602.03	5480140.75
1027	BAL1.7/29	2543576.40	5480173.30
1028	BAL1.7/3	2543976.21	5479972.46
1029	BAL1.7/30	2543521.51	5480189.88
1030	BAL1.7/31	2543492.97	5480231.20
1031	BAL1.7/32	2543465.78	5480276.50
1032	BAL1.7/4	2543980.76	5479935.39
1033	BAL1.7/5	2543986.92	5479878.74
1034	BAL1.7/6	2543993.02	5479828.12
1035	BAL1.7/7	2543999.53	5479775.66
1038	BAL1.7/PW	2543952.19	5479996.23
1039	BAL12142M10	2544074.90	5479272.52
1040	BAL12142M5	2544101.81	5479235.49
1042	BAL12143M10	2543834.24	5479559.05
1043	BAL12143M15	2543854.78	5479570.66
1044	BAL12143M20	2543882.81	5479584.34
1045	BAL12143M25	2543917.47	5479604.08
1046	BAL12143M30	2543949.96	5479611.73
1047	BAL12143M35	2544000.80	5479624.31
1052	BAL12143M47	2544062.21	5479627.04
1056	BAL12143M50	2544098.49	5479579.45
1057	BAL12143M52	2544130.72	5479535.97
1058	BAL12143M55	2544164.34	5479492.77
1059	BAL12143M57	2544208.09	5479436.87
1060	BAL12143M60	2544256.57	5479404.67
1061	BAL12143M62	2544301.18	5479386.23
1062	BAL12143M65	2544333.59	5479361.15
1063	BAL12143M67	2544355.73	5479335.51
1065	BAL12143M71	2544389.58	5479276.54
1066	BAL12143M72	2544405.89	5479231.94
1067	BAL12143M75	2544409.72	5479214.60
1069	BAL12143M80	2544411.93	5479191.32
1074	BAL12144M10	2543341.67	5480375.66
1075	BAL12144M15	2543311.74	5480374.18
1079	BAL12144M35	2543423.05	5480268.51
1080	BAL12144M40	2543401.06	5480263.35
1082	BAL12144M5	2543348.59	5480350.21
1083	BAL12144M50	2543373.61	5480247.02
1084	BAL12144M55	2543365.35	5480285.80
1085	BAL12144M6	2543358.91	5480319.06
1090	BAL12146M10	2544014.77	5479559.87
1092	BAL12146M15	2544012.36	5479577.72
1094	BAL12146M5	2544010.33	5479500.86
1095	BAL12146M50	2544049.58	5479607.07
1096	BAL12146M55	2544024.39	5479562.31
1097	BAL12146M56	2544016.03	5479539.34
1098	BAL12146M6	2543998.27	5479472.29
1101	BAL12147M10	2544114.18	5479356.31
1102	BAL12147M15	2544087.33	5479386.00

1103	BAL12147M20	2544056.89	5479415.15
1105	BAL12147M30	2544030.35	5479397.62
1106	BAL12147M35	2544142.40	5479325.97
1107	BAL12147M40	2544169.73	5479296.40
1108	BAL12147M45	2544199.99	5479263.54
1110	BAL12147M50	2544080.22	5479335.28
1111	BAL12147M55	2544045.80	5479313.38
1112	BAL12147M60	2544013.28	5479299.16
1113	BAL12148M10	2543960.32	5479132.64
1114	BAL12148M120	2543719.20	5479724.89
1115	BAL12148M125	2543708.79	5479751.28
1116	BAL12148M130	2543683.89	5479798.32
1117	BAL12148M135	2543659.51	5479842.49
1119	BAL12148M145	2543634.66	5479886.49
1120	BAL12148M15	2543943.42	5479168.76
1121	BAL12148M150	2543610.99	5479928.76
1122	BAL12148M155	2543586.96	5479972.90
1123	BAL12148M160	2543557.63	5480013.87
1124	BAL12148M165	2543530.63	5480038.23
1125	BAL12148M170	2543488.66	5480063.30
1126	BAL12148M175	2543407.65	5480107.66
1127	BAL12148M176	2543443.35	5480088.71
1129	BAL12148M185	2543373.93	5480133.09
1130	BAL12148M190	2543340.00	5480159.92
1131	BAL12148M195	2543334.32	5480200.60
1132	BAL12148M20	2543923.41	5479209.82
1133	BAL12148M200	2543329.89	5480217.48
1134	BAL12148M205	2543320.77	5480274.19
1135	BAL12148M210	2543308.06	5480309.20
1137	BAL12148M215	2543280.45	5480361.38
1138	BAL12148M227	2543256.46	5480401.18
1140	BAL12148M231	2543249.68	5480447.80
1141	BAL12148M232	2543236.03	5480485.57
1142	BAL12148M235	2543241.52	5480434.49
1143	BAL12148M30	2543866.33	5479314.69
1144	BAL12148M34	2543886.38	5479266.25
1145	BAL12148M36	2543898.74	5479241.13
1146	BAL12148M40	2543729.11	5479693.27
1147	BAL12148M45	2543735.06	5479658.41
1148	BAL12148M5	2543975.40	5479091.05
1150	BAL12148M51	2543987.20	5479066.73
1151	BAL12148M54	2543744.67	5479609.19
1153	BAL12148M60	2543758.02	5479576.59
1154	BAL12148M65	2543777.99	5479538.44
1155	BAL12148M70	2543794.07	5479495.20
1157	BAL12148M80	2543805.89	5479453.48
1158	BAL12148M85	2543823.56	5479389.72
1159	BAL12148M86	2543812.72	5479428.37
1163	BAL12149M10	2543925.12	5479472.54
1164	BAL12149M15	2543877.30	5479481.30
1167	BAL12149M30	2544173.33	5479384.53
1168	BAL12149M31	2544192.31	5479411.47
1169	BAL12149M35	2544159.07	5479393.70
1170	BAL12149M40	2544125.20	5479417.32
1171	BAL12149M45	2544217.02	5479348.70
1172	BAL12149M5	2543981.38	5479447.63
1173	BAL12149M50	2544260.92	5479311.89
1174	BAL12149M55	2544351.59	5479201.22
1175	BAL12149M60	2544324.88	5479236.31
1176	BAL12149M65	2544286.41	5479288.86
1177	BAL12149M70	2544397.88	5479174.41
1178	BAL12149M72	2544414.35	5479167.30
1179	BAL12149M74	2544444.23	5479130.11
1180	BAL12149M76	2544479.36	5479086.83
1181	BAL12149M78	2544510.08	5479015.67
1182	BAL12149M80	2544530.31	5478968.77
1183	BAL12149M82	2544558.79	5478898.83
1184	BAL12149M90	2543790.08	5479451.34

1186	BAL12149XM20	2544364.55	5479188.71
1187	BAL12149XM25	2544352.24	5479176.86
1188	BAL12149XM5	2544320.71	5479184.36
1191	BAL12150M10	2543771.79	5479711.84
1192	BAL12150M15	2543799.94	5479720.59
1193	BAL12150M20	2543844.94	5479743.22
1194	BAL12150M5	2543742.37	5479700.97
1195	BAL12152M10	2543565.98	5479770.20
1196	BAL12152M11	2543600.75	5479763.82
1197	BAL12152M15	2543628.32	5479757.48
1198	BAL12152M2	2543497.72	5479809.90
1199	BAL12152M20	2543671.01	5479749.85
1200	BAL12152M5	2543536.87	5479770.83
1201	BAL12153M10	2543994.34	5479052.36
1202	BAL12153M15	2544031.03	5479053.36
1203	BAL12153M20	2544077.01	5479072.52
1204	BAL12153M25	2544119.86	5479097.90
1205	BAL12153M30	2544160.80	5479127.62
1206	BAL12153M35	2544199.49	5479166.93
1207	BAL12153M40	2544232.50	5479196.82
1208	BAL12153M45	2544269.50	5479214.42
1209	BAL12153M5	2543994.58	5479030.80
1210	BAL12153M50	2544305.98	5479230.62
1211	BAL12154M10	2543939.14	5479509.01
1212	BAL12154M15	2543922.40	5479545.27
1213	BAL12154M20	2543994.30	5479538.41
1215	BAL12154M5	2543912.74	5479495.06
1216	BAL12155M10	2544377.34	5479266.15
1223	BAL12155M5	2544348.86	5479240.59
1256	BAL12157M10	2543769.69	5479757.15
1257	BAL12157M15	2543809.10	5479801.85
1263	BAL12159M10	2543685.76	5479563.80
1265	BAL12159M15	2543650.45	5479548.52
1266	BAL12159M20	2543625.43	5479520.52
1267	BAL12159M25	2543600.54	5479497.04
1268	BAL12159M30	2543589.97	5479469.41
1269	BAL12159M35	2543593.43	5479439.97
1270	BAL12159M40	2543620.34	5479398.25
1271	BAL12159M45	2543648.33	5479357.54
1273	BAL12159M50	2543676.94	5479317.32
1275	BAL12159M60	2543621.16	5479576.70
1276	BAL12159M65	2543594.23	5479603.88
1279	BAL12159M7	2543714.49	5479581.92
1280	BAL12159M70	2543563.07	5479516.79
1281	BAL12159M75	2543528.66	5479517.71
1282	BAL12202M10	2543787.88	5479363.53
1283	BAL12202M15	2543747.44	5479337.63
1285	BAL12202M25	2543704.57	5479309.86
1286	BAL12202M30	2543670.88	5479287.58
1287	BAL12202M35	2543618.50	5479254.08
1288	BAL12202M40	2543571.30	5479225.03
1289	BAL12202M45	2543516.85	5479193.64
1290	BAL12202M5	2543825.41	5479385.08
1292	BAL12202YM15	2543889.53	5479399.95
1294	BAL12202YM5	2543845.45	5479385.86
5000	FITBAL5000	2544062.21	5479775.66

Anhang B: Ergebnisse der Optimierung

(1)	HBEZ	HALTUNGSBEZEICHNUNG
(2)	VON	KNOTEN AM HALTUNGSANFANG
(3)	NACH	KNOTEN AM HALTUNGSENDE
(4)	STA	SOHLTIEFE AM ANFANG DER HALTUNG BEZOGEN AUF DIE GEOD. HOEHE DES ANFANGSKNOTENS [M]
(5)	STE	SOHLTIEFE AM ENDE DER HALTUNG BEZOGEN AUF DIE GEOD. HOEHE DES ENDKNOTENS [M]
(6)	PHOEHE	PROFILHOEHE [MM]
(7)	JS	GEFAELLE
(8)	QB	KONST. ABFLUSS [M**3/S]
(9)	VQB	FLIESSGESCHWINDIGKEIT BEI KONST. ABFLUSS [M/S]
(10)	QMAX	MAX. ABFLUSS AM ANFANG DER HALTUNG [M**3/S]
(11)	VQMAX	FLIESSGESCHWINDIGKEIT BEI MAX. ABFLUSS [M/S]
(12)	A-GRAD	AUSLASTUNGSGRAD DER HALTUNG (QMAX/QVOLL) [%]
(13)	HKOST	HALTUNGSKOSTEN [DM] HKOST = 0.0 (BESTEHENDE HALTUNG)
(14)	SKOST	SCHACHTKOSTEN [DM] (SCHACHT AM HALTUNGSANFANG) SKOST = 0.0 (BESTEHENDER SCHACHT)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
2	2	1	1.300	1.300	300	0.1184	0.0000	0.00	0.2101	5.03	62.1	31255.00	0.00
3	3	2	1.300	1.300	300	0.1714	0.0000	0.00	0.1920	5.68	47.2	17867.50	0.00
4	4	3	1.300	1.300	300	0.1336	0.0000	0.00	0.1812	5.09	50.4	20816.25	0.00
6	6	4	1.300	1.300	300	0.0336	0.0000	0.00	0.1381	2.79	76.8	46926.25	0.00
7	7	6	1.300	1.300	300	0.1256	0.0000	0.00	0.1188	4.48	34.1	21700.00	0.00
9	1	129	1.300	1.300	300	0.1005	0.0000	0.00	0.2246	4.78	72.1	20571.25	0.00
10	10	7	1.300	1.300	300	0.0362	0.0000	0.00	0.0756	2.51	40.5	57846.25	0.00
11	11	10	1.250	1.250	250	0.0032	0.0000	0.00	0.0278	0.77	81.8	46436.25	0.00
12	12	20	2.549	1.400	400	0.1049	0.0000	0.00	0.5153	5.94	75.5	46848.34	0.00
13	13	12	1.450	2.499	350	0.1364	0.0000	0.00	0.4915	6.38	90.0	56652.18	0.00
15	15	13	1.250	1.250	150	0.1138	0.0000	0.00	0.0132	2.47	25.2	57242.50	0.00
18	18	17	1.300	1.300	300	0.0969	0.0000	0.00	0.1465	4.28	47.9	47285.00	0.00
19	19	18	1.300	1.300	300	0.0363	0.0000	0.00	0.1070	2.73	57.2	52552.50	0.00
20	20	111	1.400	1.400	400	0.1273	0.0000	0.00	0.5251	6.44	69.9	19941.49	0.00
21	21	19	1.300	1.300	300	0.0185	0.0000	0.00	0.0528	1.78	39.5	57627.50	0.00
22	22	21	1.300	1.300	300	0.0248	0.0000	0.00	0.0123	1.31	7.9	24727.50	0.00
24	24	37	1.300	1.300	300	0.0650	0.0000	0.00	0.1879	3.87	75.0	26425.00	0.00
26	26	29	1.300	1.300	300	0.0665	0.0000	0.00	0.2072	3.97	81.8	31526.25	0.00
27	27	26	2.550	1.300	300	0.0944	0.0000	0.00	0.1993	4.55	66.0	31473.75	0.00
28	28	27	1.300	2.550	300	0.0423	0.0000	0.00	0.1817	3.21	90.0	29216.25	0.00
29	29	13	1.300	1.300	300	0.0916	0.0000	0.00	0.2123	4.55	71.4	32436.25	0.00
30	30	33	1.250	2.485	250	0.0014	0.0000	0.00	0.0146	0.49	64.6	27912.50	0.00
31	31	33	1.846	1.413	300	0.0100	0.0000	0.00	0.0883	1.56	90.0	21525.00	0.00
32	32	31	1.250	1.696	150	0.0182	0.0000	0.00	0.0188	1.33	90.0	29653.75	0.00
33	33	74	2.585	3.317	350	0.0088	0.0000	0.00	0.1244	1.62	90.0	36438.48	0.00
34	34	38	1.644	1.250	200	0.0455	0.0000	0.00	0.0593	2.52	83.2	28621.25	0.00
35	35	34	1.250	1.594	150	0.0404	0.0000	0.00	0.0280	1.98	90.0	30677.50	0.00
37	37	36	1.300	2.349	300	0.0561	0.0000	0.00	0.2093	3.70	90.0	43566.25	0.00
38	38	115	1.250	1.250	200	0.1173	0.0000	0.00	0.0836	3.96	72.9	19748.75	0.00
39	39	153	2.851	2.119	600	0.0077	0.0000	0.00	0.4843	2.14	90.0	92461.60	0.00
41	41	39	2.024	2.751	500	0.0196	0.0000	0.00	0.4774	3.04	90.0	68336.38	0.00
42	42	41	1.547	2.024	500	0.0191	0.0000	0.00	0.4712	3.00	90.0	58838.53	0.00
43	43	42	1.500	1.547	500	0.0183	0.0000	0.00	0.4617	2.94	90.0	76608.72	0.00
45	45	43	2.017	1.450	450	0.0213	0.0000	0.00	0.3398	2.92	81.1	89925.77	0.00
46	46	45	1.350	1.917	350	0.0525	0.0000	0.00	0.3047	3.96	90.0	62520.38	0.00
47	47	46	2.022	1.350	350	0.0544	0.0000	0.00	0.2618	3.92	75.9	48802.26	0.00
49	49	47	1.853	2.022	350	0.0303	0.0000	0.00	0.2315	3.01	90.0	27878.76	0.00
50	50	49	1.396	1.853	350	0.0264	0.0000	0.00	0.2158	2.80	90.0	34535.80	0.00
51	51	73	1.647	1.250	250	0.0220	0.0000	0.00	0.0442	1.82	49.3	36365.00	0.00
52	53	51	1.250	1.547	150	0.0164	0.0000	0.00	0.0179	1.26	90.0	55685.00	0.00
55	55	61	1.250	1.250	250	0.0373	0.0000	0.00	0.0516	2.31	44.1	27212.50	0.00

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
56	56	55	1.250	1.250	250	0.0671	0.0000	0.00	0.0328	2.53	20.9	41580.00	0.00
57	57	56	1.250	1.250	250	0.0565	0.0000	0.00	0.0078	1.56	5.4	25733.75	0.00
59	59	61	1.250	1.250	150	0.0440	0.0000	0.00	0.0150	1.81	46.2	33652.50	0.00
60	60	31	1.350	1.300	300	0.0311	0.0000	0.00	0.0380	1.97	22.0	36347.50	0.00
61	61	101	1.350	1.250	250	0.0420	0.0000	0.00	0.1069	2.82	86.2	35026.25	0.00
62	62	68	1.250	1.250	250	0.0185	0.0000	0.00	0.0327	1.58	39.8	58187.50	0.00
64	64	63	1.400	1.400	400	0.0216	0.0000	0.00	0.2453	2.72	79.3	42662.83	0.00
66	66	63	1.250	1.832	200	0.0017	0.0000	0.00	0.0119	0.49	86.2	21183.75	0.00
67	67	64	1.406	1.400	400	0.0400	0.0000	0.00	0.2381	3.45	56.6	30032.87	0.00
68	68	43	1.300	1.300	300	0.0142	0.0000	0.00	0.0744	1.75	63.7	48615.00	0.00
69	69	75	1.401	2.322	300	0.0228	0.0000	0.00	0.1333	2.36	90.0	38377.50	0.00
70	70	75	1.350	1.250	250	0.0774	0.0000	0.00	0.0441	2.89	26.2	28332.50	0.00
71	71	70	1.250	1.250	150	0.0211	0.0000	0.00	0.0194	1.42	86.2	34055.00	0.00
72	72	67	3.021	1.406	400	0.0148	0.0000	0.00	0.2299	2.29	90.0	73761.80	0.00
73	73	72	1.300	1.300	300	0.0131	0.0000	0.00	0.0625	1.63	55.8	32165.00	0.00
74	74	72	3.317	2.971	350	0.0113	0.0000	0.00	0.1412	1.83	90.0	61476.35	0.00
75	75	50	2.372	1.396	350	0.0232	0.0000	0.00	0.2025	2.63	90.0	32044.22	0.00
76	76	83	1.300	1.300	300	0.0836	0.0000	0.00	0.0610	3.21	21.5	17753.75	0.00
77	77	76	1.300	1.300	300	0.0399	0.0000	0.00	0.0481	2.30	24.5	16021.25	0.00
78	78	77	1.300	1.300	300	0.0607	0.0000	0.00	0.0377	2.50	15.6	26442.50	0.00
79	79	78	1.300	1.300	300	0.0606	0.0000	0.00	0.0234	2.17	9.7	31526.25	0.00
81	81	79	1.300	1.300	300	0.0545	0.0000	0.00	0.0028	1.10	1.2	25068.75	0.00
83	83	103	1.300	1.300	300	0.0633	0.0000	0.00	0.0732	3.05	29.6	27553.75	0.00
86	86	92	1.300	1.300	300	0.0730	0.0000	0.00	0.1680	3.96	63.3	21271.25	0.00
87	87	86	1.486	1.300	300	0.0566	0.0000	0.00	0.1539	3.52	65.9	43610.00	0.00
88	88	87	2.253	1.486	300	0.0110	0.0000	0.00	0.0925	1.64	90.0	43120.00	0.00
89	89	88	1.300	2.253	300	0.0017	0.0000	0.00	0.0356	0.63	90.0	43776.25	0.00
92	92	24	1.300	1.300	300	0.0836	0.0000	0.00	0.1805	4.24	63.5	30887.50	0.00
93	93	142	1.250	1.250	200	0.0248	0.0000	0.00	0.0035	0.95	6.7	16607.50	0.00
94	94	157	2.367	1.932	800	0.0277	0.0000	0.00	1.9623	4.88	90.0	31659.58	0.00
95	95	94	2.501	2.367	800	0.0271	0.0000	0.00	1.9401	4.82	90.0	101968.73	0.00
96	96	95	1.768	2.095	700	0.0380	0.0000	0.00	1.6167	5.25	90.0	92194.00	0.00
97	97	96	1.700	1.768	700	0.0360	0.0000	0.00	1.5745	5.11	90.0	92085.50	0.00
98	98	97	1.700	1.700	700	0.0356	0.0000	0.00	1.5436	5.07	88.7	95371.50	0.00
99	99	98	1.700	1.700	700	0.0397	0.0000	0.00	1.5294	5.31	83.2	89760.50	0.00
100	100	60	1.250	1.250	200	0.0164	0.0000	0.00	0.0137	1.22	32.0	39970.00	0.00
101	101	69	1.300	1.401	300	0.0184	0.0000	0.00	0.1196	2.11	90.0	29601.25	0.00
102	102	99	1.700	1.700	700	0.0415	0.0000	0.00	1.5186	5.40	80.8	93062.00	0.00
103	103	102	1.893	1.700	700	0.0398	0.0000	0.00	1.4968	5.30	81.3	95387.00	0.00
105	106	103	1.600	1.793	600	0.0633	0.0000	0.00	1.3905	6.14	90.0	73969.28	0.00
108	108	76	1.300	1.300	300	0.0169	0.0000	0.00	0.0025	0.71	2.0	21253.75	0.00
110	110	106	1.600	1.600	600	0.0726	0.0000	0.00	1.3860	6.52	83.7	37394.28	0.00
111	111	112	2.265	1.600	600	0.0831	0.0000	0.00	1.3534	6.87	76.4	47796.21	0.00
112	112	110	2.403	1.600	600	0.0827	0.0000	0.00	1.3715	6.87	77.6	56208.46	0.00
113	113	111	1.536	1.450	450	0.1173	0.0000	0.00	0.8185	6.89	83.1	20118.56	0.00
114	114	113	2.483	1.450	450	0.1176	0.0000	0.00	0.8099	6.88	82.1	40237.12	0.00
115	115	114	3.068	1.450	450	0.1181	0.0000	0.00	0.7974	6.88	80.7	48209.35	0.00
116	116	115	3.067	1.400	400	0.1354	0.0000	0.00	0.6908	6.93	89.1	66693.60	0.00
117	117	116	1.966	1.400	400	0.1356	0.0000	0.00	0.6713	6.90	86.5	54684.37	0.00
118	118	117	1.885	1.400	400	0.1361	0.0000	0.00	0.6539	6.89	84.1	57674.02	0.00
119	119	118	1.300	1.300	300	0.1261	0.0000	0.00	0.0101	2.18	2.9	25103.75	0.00
122	122	118	1.544	1.400	400	0.1378	0.0000	0.00	0.6219	6.87	79.5	37082.15	0.00
123	123	122	1.400	1.400	400	0.1329	0.0000	0.00	0.4008	6.17	52.2	17602.22	0.00
124	124	123	1.400	1.400	400	0.1300	0.0000	0.00	0.3948	6.10	52.0	22857.71	0.00
126	126	124	1.510	1.400	400	0.0943	0.0000	0.00	0.3738	5.32	57.8	26162.06	0.00
127	127	126	1.836	1.510	400	0.0383	0.0000	0.00	0.3704	3.68	90.0	17644.18	0.00
128	128	127	1.541	1.836	400	0.0356	0.0000	0.00	0.3573	3.55	90.0	31690.29	0.00
129	129	128	1.400	1.541	400	0.0327	0.0000	0.00	0.3421	3.40	90.0	18011.33	0.00
130	130	129	1.300	1.300	300	0.0389	0.0000	0.00	0.0937	2.72	48.4	45290.00	0.00
131	131	130	1.300	1.300	300	0.0681	0.0000	0.00	0.0542	2.88	21.1	42096.25	0.00
132	133	1289	2.339	2.640	900	0.0190	0.0000	0.00	2.2174	4.35	90.0	104881.77	0.00
134	135	133	2.375	2.339	900	0.0189	0.0000	0.00	2.2105	4.34	90.0	76662.62	0.00
135	136	135	2.292	2.375	900	0.0185	0.0000	0.00	2.1880	4.30	90.0	96621.12	0.00
136	137	136	2.316	2.292	900	0.0180	0.0000	0.00	2.1544	4.23	90.0	75637.17	0.00
137	138	137	2.252	2.316	900	0.0173	0.0000	0.00	2.1159	4.16	90.0	112230.90	0.00
138	139	138	2.320	2.252	900	0.0166	0.0000	0.00	2.0689	4.06	90.0	113693.12	0.00

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
139	140	139	2.455	2.320	900	0.0159	0.0000	0.00	2.0256	3.98	90.0	91379.88	0.00
140	141	140	2.633	2.455	900	0.0155	0.0000	0.00	1.9973	3.92	90.0	35891.10	0.00
141	142	141	1.250	1.250	200	0.0296	0.0000	0.00	0.0147	1.53	25.6	19810.00	0.00
142	143	158	3.902	2.943	700	0.0035	0.0000	0.00	0.4871	1.58	90.0	110350.80	0.00
143	144	143	4.264	3.902	700	0.0035	0.0000	0.00	0.4879	1.58	90.0	123817.80	0.00
144	145	144	4.625	4.264	700	0.0035	0.0000	0.00	0.4887	1.59	90.0	124066.68	0.00
145	146	147	4.260	4.484	700	0.0035	0.0000	0.00	0.4907	1.59	90.0	173510.84	0.00
146	147	145	4.484	4.625	700	0.0035	0.0000	0.00	0.4894	1.59	90.0	113535.97	0.00
147	148	146	2.473	4.260	700	0.0035	0.0000	0.00	0.4876	1.58	90.0	112706.40	0.00
148	149	148	1.600	2.373	600	0.0078	0.0000	0.00	0.4880	2.16	90.0	58578.52	0.00
149	150	149	1.600	1.600	600	0.0124	0.0000	0.00	0.4883	2.62	71.4	62353.06	0.00
150	151	150	1.600	1.600	600	0.0124	0.0000	0.00	0.4888	2.61	71.7	73442.60	0.00
151	152	151	1.692	1.600	600	0.0148	0.0000	0.00	0.4892	2.81	65.5	64957.20	0.00
152	153	152	2.119	1.692	600	0.0079	0.0000	0.00	0.4898	2.16	90.0	69287.68	0.00
153	154	146	1.300	1.300	300	0.0124	0.0000	0.00	0.0041	0.74	3.8	49210.00	0.00
155	156	154	1.300	1.300	300	0.0181	0.0000	0.00	0.0041	0.84	3.1	51843.75	0.00
157	158	1289	2.943	2.348	700	0.0035	0.0000	0.00	0.4863	1.58	90.0	89799.55	0.00
158	159	131	1.300	1.300	300	0.0812	0.0000	0.00	0.0160	2.15	5.7	28533.75	0.00
159	160	122	1.350	1.350	350	0.0785	0.0000	0.00	0.2110	4.33	50.9	41539.16	0.00
160	161	160	1.300	1.300	300	0.0399	0.0000	0.00	0.0093	1.42	4.7	23712.50	0.00
161	162	160	2.007	1.350	350	0.0306	0.0000	0.00	0.1837	2.90	71.1	30014.40	0.00
162	163	162	2.689	2.007	350	0.0169	0.0000	0.00	0.1727	2.24	90.0	31543.98	0.00
163	164	163	1.300	1.300	300	0.0701	0.0000	0.00	0.0159	2.04	6.1	32541.25	0.00
165	166	163	3.572	2.689	350	0.0087	0.0000	0.00	0.1237	1.61	90.0	52519.80	0.00
166	167	166	2.896	3.572	350	0.0062	0.0000	0.00	0.1047	1.36	90.0	40338.35	0.00
167	168	167	1.250	1.250	200	0.0242	0.0000	0.00	0.0138	1.40	26.6	34746.25	0.00
168	169	167	1.300	2.846	300	0.0059	0.0000	0.00	0.0673	1.19	90.0	24999.10	0.00
1011	1052	1009	3.367	1.900	900	0.0123	0.0000	0.00	1.6408	3.46	82.8	154806.47	0.00
1012	1013	1009	2.242	1.700	700	0.0324	0.0000	0.00	1.0064	4.51	60.6	86490.00	0.00
1013	1014	1013	2.312	2.242	700	0.0148	0.0000	0.00	1.0070	3.27	90.0	65053.50	0.00
1014	1015	1014	2.391	2.312	700	0.0148	0.0000	0.00	1.0079	3.27	90.0	79840.50	0.00
1015	1016	1015	2.464	2.391	700	0.0148	0.0000	0.00	1.0079	3.27	90.0	74136.50	0.00
1017	1257	1016	2.551	2.464	700	0.0148	0.0000	0.00	1.0079	3.27	90.0	76570.01	0.00
1016	1038	1028	4.125	4.313	700	0.0026	0.0000	0.00	0.4204	1.36	90.0	70101.20	0.00
1018	1019	1038	3.881	4.125	700	0.0026	0.0000	0.00	0.4208	1.37	90.0	67840.54	0.00
1019	1020	1019	3.599	3.881	700	0.0026	0.0000	0.00	0.4214	1.37	90.0	98024.86	0.00
1020	1021	1020	3.176	3.599	700	0.0026	0.0000	0.00	0.4221	1.37	90.0	99478.80	0.00
1021	1022	1021	2.977	3.176	700	0.0026	0.0000	0.00	0.4226	1.37	90.0	82754.04	0.00
1022	1023	1022	2.694	2.977	700	0.0026	0.0000	0.00	0.4237	1.38	90.0	129437.77	0.00
1023	1024	1023	2.481	2.694	700	0.0026	0.0000	0.00	0.4246	1.38	90.0	91329.27	0.00
1024	1025	1024	2.299	2.481	700	0.0026	0.0000	0.00	0.4253	1.38	90.0	94457.00	0.00
1025	1026	1025	1.760	2.299	700	0.0027	0.0000	0.00	0.4260	1.38	90.0	104284.00	0.00
1026	1027	1026	1.700	1.760	700	0.0027	0.0000	0.00	0.4266	1.38	90.0	64216.50	0.00
1027	1028	1032	4.313	4.409	700	0.0026	0.0000	0.00	0.4201	1.36	90.0	77463.90	0.00
1028	1029	1027	2.875	1.700	700	0.0041	0.0000	0.00	0.4273	1.66	72.6	88877.00	0.00
1029	1030	1029	2.600	2.875	700	0.0027	0.0000	0.00	0.4284	1.39	90.0	84420.33	0.00
1030	1031	1030	1.757	2.600	700	0.0027	0.0000	0.00	0.4295	1.39	90.0	81886.50	0.00
1031	1032	1033	4.409	4.557	700	0.0026	0.0000	0.00	0.4197	1.36	90.0	118176.52	0.00
1032	1033	1034	4.557	4.688	700	0.0026	0.0000	0.00	0.4190	1.36	90.0	112433.46	0.00
1033	1034	1035	4.688	4.823	700	0.0026	0.0000	0.00	0.4184	1.36	90.0	116556.83	0.00
1034	1009	1035	2.200	4.701	1200	0.0299	0.0000	0.00	5.9228	6.54	90.0	191679.95	0.00
1035	1039	1111	1.300	1.343	300	0.0090	0.0000	0.00	0.0837	1.48	90.0	43890.00	0.00
1036	1040	1039	1.250	1.250	250	0.0131	0.0000	0.00	0.0332	1.39	48.0	40057.50	0.00
1037	1042	1154	1.300	1.300	300	0.0098	0.0000	0.00	0.0205	1.09	21.1	52430.00	0.00
1038	1043	1044	1.250	1.250	200	0.0498	0.0000	0.00	0.0186	1.97	24.9	27291.25	0.00
1039	1044	1045	1.300	1.250	250	0.0823	0.0000	0.00	0.0465	3.00	26.7	34903.75	0.00
1040	1045	1046	1.250	1.250	250	0.1082	0.0000	0.00	0.0717	3.74	36.0	29207.50	0.00
1041	1046	1047	1.250	1.250	250	0.0380	0.0000	0.00	0.1050	2.70	88.9	45823.75	0.00
1042	1047	1009	2.200	2.200	1200	0.0327	0.0000	0.00	3.3165	6.03	48.2	161929.80	0.00
1051	1056	1052	2.855	3.367	900	0.0099	0.0000	0.00	1.5968	3.14	90.0	121475.20	0.00
1052	1057	1056	2.386	2.855	900	0.0094	0.0000	0.00	1.5581	3.06	90.0	102773.88	0.00
1053	1058	1057	1.929	2.386	900	0.0089	0.0000	0.00	1.5148	2.97	90.0	103951.27	0.00
1054	1059	1058	2.545	1.929	900	0.0085	0.0000	0.00	1.4801	2.91	90.0	134810.00	0.00
1055	1060	1059	2.056	2.445	800	0.0070	0.0000	0.00	0.9870	2.45	90.0	95257.03	0.00
1056	1061	1060	1.977	2.056	800	0.0066	0.0000	0.00	0.9578	2.38	90.0	79017.99	0.00
1057	1062	1061	1.930	1.977	800	0.0063	0.0000	0.00	0.9307	2.31	90.0	67100.63	0.00

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
1058	1063	1062	1.979	1.930	800	0.0059	0.0000	0.00	0.9065	2.25	90.0	55461.56	0.00
1059	1065	1063	2.207	1.979	800	0.0056	0.0000	0.00	0.8827	2.19	90.0	111332.38	0.00
1061	1066	1065	1.769	1.907	500	0.0122	0.0000	0.00	0.3761	2.39	90.0	58080.27	0.00
1062	1067	1066	1.816	1.769	500	0.0114	0.0000	0.00	0.3647	2.32	90.0	21720.48	0.00
1065	1069	1067	1.518	1.716	400	0.0359	0.0000	0.00	0.3585	3.56	90.0	24536.11	0.00
1066	1074	1082	1.300	1.300	300	0.0699	0.0000	0.00	0.1266	3.65	48.7	23073.75	0.00
1067	1075	1074	1.300	1.300	300	0.0310	0.0000	0.00	0.1097	2.58	63.4	26223.75	0.00
1071	1079	1031	1.827	1.557	500	0.0159	0.0000	0.00	0.4299	2.74	90.0	53163.81	0.00
1073	1080	1079	1.504	1.777	450	0.0271	0.0000	0.00	0.4258	3.34	90.0	25662.24	0.00
1074	1083	1080	1.450	1.504	450	0.0264	0.0000	0.00	0.4201	3.30	90.0	36295.20	0.00
1075	1082	1085	1.350	2.065	350	0.0111	0.0000	0.00	0.1400	1.82	90.0	31572.84	0.00
1077	1084	1083	2.273	1.350	350	0.0454	0.0000	0.00	0.1691	3.33	53.7	38143.30	0.00
1078	1085	1084	2.065	2.273	350	0.0135	0.0000	0.00	0.1542	2.00	90.0	37030.84	0.00
1083	1090	1092	2.200	2.200	1200	0.0456	0.0000	0.00	3.2029	6.78	39.4	41278.92	0.00
1085	1092	1047	2.200	2.200	1200	0.0369	0.0000	0.00	3.2064	6.26	43.8	110038.91	0.00
1087	1094	1097	2.567	2.200	1200	0.0472	0.0000	0.00	3.1120	6.82	37.6	89158.80	0.00
1088	1095	1052	1.300	1.300	300	0.0089	0.0000	0.00	0.0312	1.18	33.8	20676.25	0.00
1089	1096	1095	1.300	1.300	300	0.0343	0.0000	0.00	0.0149	1.56	8.2	44940.00	0.00
1090	1097	1090	2.358	2.200	1200	0.0463	0.0000	0.00	3.1993	6.82	39.0	47146.44	0.00
1091	1098	1094	2.200	2.200	1200	0.0439	0.0000	0.00	3.1000	6.63	38.9	71074.92	0.00
1092	1172	1098	2.720	2.200	1200	0.0294	0.0000	0.00	3.0478	5.68	46.7	68530.80	0.00
1094	1101	1169	2.371	1.400	400	0.0257	0.0000	0.00	0.2906	3.00	86.2	61293.07	0.00
1095	1102	1101	1.300	1.300	300	0.0090	0.0000	0.00	0.0490	1.33	52.8	35026.25	0.00
1096	1103	1102	1.307	1.300	300	0.0096	0.0000	0.00	0.0247	1.14	25.7	36872.50	0.00
1098	1105	1103	1.300	1.307	300	0.0027	0.0000	0.00	0.0061	0.48	11.9	27833.75	0.00
1099	1106	1101	1.600	2.221	250	0.0193	0.0000	0.00	0.0756	1.92	90.0	36260.00	0.00
1100	1107	1106	1.607	1.600	250	0.0073	0.0000	0.00	0.0463	1.18	90.0	35236.25	0.00
1101	1108	1107	1.250	1.507	150	0.0127	0.0000	0.00	0.0157	1.11	90.0	39086.25	0.00
1103	1110	1101	1.737	1.606	300	0.0233	0.0000	0.00	0.1347	2.38	90.0	34947.50	0.00
1104	1111	1110	1.400	1.737	300	0.0203	0.0000	0.00	0.1256	2.22	90.0	35700.00	0.00
1105	1112	1111	1.250	1.250	150	0.0073	0.0000	0.00	0.0091	0.80	68.9	31053.75	0.00
1106	1113	1148	1.406	1.300	300	0.0055	0.0000	0.00	0.0543	1.12	74.9	38710.00	0.00
1108	1115	1114	1.450	1.760	450	0.0219	0.0000	0.00	0.3822	3.00	90.0	32216.96	0.00
1109	1116	1115	1.300	1.300	300	0.0320	0.0000	0.00	0.1186	2.66	67.6	46576.25	0.00
1110	1117	1116	1.474	1.300	300	0.0249	0.0000	0.00	0.0808	2.21	52.2	44143.75	0.00
1112	1119	1117	2.212	1.474	300	0.0026	0.0000	0.00	0.0449	0.79	90.0	44213.75	0.00
1113	1120	1113	1.300	1.406	300	0.0012	0.0000	0.00	0.0197	0.49	59.6	34895.00	0.00
1114	1121	1119	1.250	2.062	150	0.0221	0.0000	0.00	0.0207	1.47	90.0	42385.00	0.00
1116	1122	1123	1.250	1.250	250	0.0151	0.0000	0.00	0.0252	1.37	34.0	44091.25	0.00
1117	1123	1124	1.300	1.300	300	0.0195	0.0000	0.00	0.0460	1.76	33.6	31815.00	0.00
1118	1124	1125	1.300	1.300	300	0.0190	0.0000	0.00	0.0694	1.93	51.3	42778.75	0.00
1119	1125	1127	1.300	1.300	300	0.0167	0.0000	0.00	0.0970	1.97	76.4	45456.25	0.00
1120	1126	1129	1.353	1.715	300	0.0240	0.0000	0.00	0.1366	2.41	90.0	36951.25	0.00
1121	1127	1126	1.300	1.353	300	0.0179	0.0000	0.00	0.1180	2.09	90.0	35367.50	0.00
1123	1129	1130	1.715	1.573	300	0.0309	0.0000	0.00	0.1554	2.75	90.0	37852.50	0.00
1124	1130	1131	1.623	1.956	350	0.0169	0.0000	0.00	0.1725	2.24	90.0	39509.34	0.00
1125	1131	1133	1.956	1.954	350	0.0188	0.0000	0.00	0.1822	2.37	90.0	16786.90	0.00
1127	1133	1083	1.954	1.350	350	0.0416	0.0000	0.00	0.2369	3.45	78.5	50764.74	0.00
1128	1134	1133	1.300	1.537	300	0.0015	0.0000	0.00	0.0340	0.60	90.0	50260.00	0.00
1129	1135	1134	1.300	1.300	300	0.0231	0.0000	0.00	0.0153	1.36	10.2	32593.75	0.00
1132	1138	1137	1.300	1.300	300	0.0334	0.0000	0.00	0.0830	2.49	46.3	40670.00	0.00
1134	1140	1142	1.300	1.588	300	0.0031	0.0000	0.00	0.0487	0.86	90.0	13667.50	0.00
1135	1141	1140	1.250	1.250	250	0.0030	0.0000	0.00	0.0244	0.73	74.2	35140.00	0.00
1136	1142	1138	1.588	1.300	300	0.0247	0.0000	0.00	0.0632	2.08	41.0	31937.50	0.00
1137	1143	1294	1.618	1.924	300	0.0142	0.0000	0.00	0.1052	1.86	90.0	64898.75	0.00
1138	1144	1143	1.300	1.568	250	0.0204	0.0000	0.00	0.0776	1.98	90.0	45876.25	0.00
1139	1145	1144	1.300	1.250	200	0.0182	0.0000	0.00	0.0368	1.59	81.6	24500.00	0.00
1140	1146	1114	1.700	2.128	700	0.0054	0.0000	0.00	0.6073	1.97	90.0	51367.00	0.00
1141	1147	1146	1.500	1.500	500	0.0300	0.0000	0.00	0.5100	3.68	77.6	43245.28	0.00
1142	1148	1150	1.300	1.300	300	0.0196	0.0000	0.00	0.0995	2.11	72.4	23651.25	0.00
1143	1151	1147	1.450	1.450	450	0.0427	0.0000	0.00	0.4701	4.12	79.2	56981.76	0.00
1144	1150	1201	1.300	1.302	300	0.0195	0.0000	0.00	0.1231	2.18	90.0	14043.75	0.00
1147	1153	1151	1.300	1.300	300	0.0412	0.0000	0.00	0.1622	3.12	81.4	30826.25	0.00
1148	1154	1153	1.469	1.300	300	0.0316	0.0000	0.00	0.1386	2.73	79.4	37677.50	0.00
1149	1155	1154	1.250	1.368	200	0.0297	0.0000	0.00	0.0518	2.06	90.0	40372.50	0.00
1153	1158	1159	1.250	1.275	250	0.0014	0.0000	0.00	0.0157	0.49	70.6	35122.50	0.00

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
1154	1159	1157	1.325	1.354	300	0.0019	0.0000	0.00	0.0381	0.67	90.0	22767.50	0.00
1158	1163	1172	1.300	1.820	300	0.0301	0.0000	0.00	0.1531	2.71	90.0	53838.75	0.00
1159	1164	1163	1.605	1.300	300	0.0271	0.0000	0.00	0.1238	2.50	76.7	42533.75	0.00
1160	1157	1164	1.510	1.605	300	0.0091	0.0000	0.00	0.0839	1.48	90.0	67068.75	0.00
1162	1167	1168	1.974	1.400	400	0.0711	0.0000	0.00	0.4527	4.94	80.6	34564.55	0.00
1163	1168	1059	1.400	1.400	400	0.0886	0.0000	0.00	0.4570	5.42	72.9	31365.10	0.00
1164	1169	1167	1.400	1.974	400	0.0321	0.0000	0.00	0.3391	3.37	90.0	17780.55	0.00
1165	1170	1169	1.250	1.250	250	0.0179	0.0000	0.00	0.0215	1.39	26.6	36128.75	0.00
1166	1171	1167	1.507	1.477	300	0.0112	0.0000	0.00	0.0931	1.65	90.0	49437.50	0.00
1168	1173	1171	2.174	1.507	300	0.0032	0.0000	0.00	0.0496	0.88	90.0	50128.75	0.00
1169	1174	1186	1.300	1.300	300	0.0150	0.0000	0.00	0.0456	1.59	37.9	15758.75	0.00
1172	1177	1069	1.400	1.300	300	0.0064	0.0000	0.00	0.0618	1.22	79.2	19241.25	0.00
1173	1178	1069	1.350	1.468	350	0.0434	0.0000	0.00	0.2771	3.60	90.0	23222.68	0.00
1174	1179	1178	1.565	1.350	350	0.0444	0.0000	0.00	0.2532	3.58	81.3	45897.02	0.00
1175	1180	1179	2.076	1.565	350	0.0253	0.0000	0.00	0.2113	2.74	90.0	53621.88	0.00
1176	1181	1180	1.609	2.076	350	0.0117	0.0000	0.00	0.1435	1.86	90.0	74564.62	0.00
1177	1182	1181	1.308	1.559	300	0.0082	0.0000	0.00	0.0799	1.41	90.0	44686.25	0.00
1178	1183	1182	1.250	1.258	250	0.0033	0.0000	0.00	0.0310	0.79	90.0	66080.00	0.00
1179	1184	1157	1.250	1.410	200	0.0019	0.0000	0.00	0.0095	0.49	66.0	13956.25	0.00
1182	1187	1186	1.300	1.358	300	0.0034	0.0000	0.00	0.0046	0.48	8.2	14953.75	0.00
1183	1188	1174	1.300	1.300	300	0.0287	0.0000	0.00	0.0187	1.56	11.2	30782.50	0.00
1186	1191	1194	1.300	1.300	300	0.0329	0.0000	0.00	0.0722	2.39	40.5	27440.00	0.00
1187	1192	1191	1.404	1.300	300	0.0335	0.0000	0.00	0.0557	2.25	31.0	25795.00	0.00
1188	1193	1192	1.300	1.404	300	0.0011	0.0000	0.00	0.0235	0.49	74.2	44073.75	0.00
1189	1194	1146	1.300	1.300	300	0.0189	0.0000	0.00	0.0798	1.98	59.2	13422.50	0.00
1190	1195	1196	1.663	1.580	250	0.0146	0.0000	0.00	0.0657	1.67	90.0	30931.25	0.00
1191	1196	1197	1.580	1.697	250	0.0204	0.0000	0.00	0.0777	1.98	90.0	24753.75	0.00
1192	1197	1199	1.797	2.156	350	0.0277	0.0000	0.00	0.2210	2.87	90.0	41712.32	0.00
1193	1198	1200	1.250	1.425	150	0.0301	0.0000	0.00	0.0242	1.71	90.0	48396.25	0.00
1194	1199	1115	2.206	1.400	400	0.0170	0.0000	0.00	0.2357	2.44	85.9	39662.69	0.00
1195	1200	1195	1.475	1.613	200	0.0326	0.0000	0.00	0.0543	2.16	90.0	25480.00	0.00
1196	1201	1202	1.742	1.626	350	0.0137	0.0000	0.00	0.1556	2.02	90.0	35305.40	0.00
1197	1202	1203	1.626	1.672	350	0.0176	0.0000	0.00	0.1761	2.29	90.0	47917.22	0.00
1198	1203	1204	1.722	1.406	400	0.0115	0.0000	0.00	0.2029	2.02	90.0	52240.20	0.00
1199	1204	1205	1.406	1.489	400	0.0155	0.0000	0.00	0.2352	2.34	90.0	53068.91	0.00
1200	1205	1206	1.489	1.872	400	0.0209	0.0000	0.00	0.2735	2.72	90.0	57862.84	0.00
1201	1206	1207	1.922	1.869	450	0.0145	0.0000	0.00	0.3113	2.45	90.0	50586.08	0.00
1202	1207	1208	1.869	1.503	450	0.0182	0.0000	0.00	0.3481	2.73	90.0	46541.92	0.00
1203	1208	1210	1.503	1.450	450	0.0353	0.0000	0.00	0.3823	3.67	70.8	45349.12	0.00
1204	1209	1201	1.250	1.592	200	0.0019	0.0000	0.00	0.0091	0.49	62.7	18865.00	0.00
1205	1210	1175	1.450	1.450	450	0.0350	0.0000	0.00	0.3991	3.68	74.3	22424.64	0.00
1206	1211	1213	1.350	1.300	300	0.0267	0.0000	0.00	0.0711	2.20	44.3	54696.25	0.00
1207	1212	1211	1.250	1.250	200	0.0083	0.0000	0.00	0.0139	0.94	45.9	34938.75	0.00
1208	1213	1097	1.300	1.300	300	0.2675	0.0000	0.00	0.0898	5.44	17.7	19031.25	0.00
1210	1215	1211	1.300	1.300	300	0.0107	0.0000	0.00	0.0127	0.98	12.5	26136.25	0.00
1211	1216	1065	1.450	1.450	450	0.0901	0.0000	0.00	0.4576	5.50	53.0	18232.80	0.00
1218	1223	1216	1.687	1.450	450	0.0390	0.0000	0.00	0.4444	3.93	78.3	43474.72	0.00
1249	1256	1257	2.531	2.551	700	0.0146	0.0000	0.00	1.0014	3.25	90.0	100171.39	0.00
1251	1114	1256	2.128	2.531	700	0.0142	0.0000	0.00	0.9887	3.21	90.0	92891.50	0.00
1255	1263	1279	1.682	1.400	400	0.0212	0.0000	0.00	0.2711	2.73	88.6	35634.53	0.00
1256	1265	1263	1.541	1.682	400	0.0166	0.0000	0.00	0.2439	2.43	90.0	40365.52	0.00
1258	1266	1265	1.407	1.491	350	0.0259	0.0000	0.00	0.2140	2.78	90.0	36123.10	0.00
1259	1267	1266	1.448	1.407	350	0.0210	0.0000	0.00	0.1926	2.50	90.0	32910.02	0.00
1260	1268	1267	1.681	1.448	350	0.0141	0.0000	0.00	0.1576	2.05	90.0	28455.96	0.00
1261	1269	1268	1.987	1.681	350	0.0110	0.0000	0.00	0.1388	1.80	90.0	28513.68	0.00
1262	1270	1269	2.019	1.937	300	0.0149	0.0000	0.00	0.1075	1.90	90.0	43443.75	0.00
1263	1271	1270	2.152	2.019	300	0.0060	0.0000	0.00	0.0682	1.21	90.0	49696.40	0.00
1264	1279	1151	1.400	1.400	400	0.0359	0.0000	0.00	0.2893	3.44	72.5	42673.32	0.00
1265	1273	1271	1.300	2.152	300	0.0011	0.0000	0.00	0.0241	0.49	76.6	43190.00	0.00
2268	1275	1276	1.250	1.297	250	0.0067	0.0000	0.00	0.0444	1.13	90.0	33477.50	0.00
2273	1280	1281	1.300	1.311	300	0.0018	0.0000	0.00	0.0369	0.65	90.0	30117.50	0.00
1274	1282	1290	2.831	2.864	1200	0.0065	0.0000	0.00	2.7634	3.05	90.0	99197.76	0.00
1275	1283	1282	2.810	2.831	1200	0.0065	0.0000	0.00	2.7537	3.04	90.0	110061.84	0.00
1277	1285	1283	2.863	2.810	1200	0.0064	0.0000	0.00	2.7349	3.02	90.0	117075.37	0.00
1278	1286	1285	2.897	2.863	1200	0.0063	0.0000	0.00	2.7219	3.01	90.0	92573.88	0.00
1279	1287	1286	3.134	2.897	1200	0.0063	0.0000	0.00	2.7175	3.00	90.0	142516.56	0.00

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
1280	1288	1287	3.325	3.134	1200	0.0063	0.0000	0.00	2.7130	3.00	90.0	127022.63	0.00
1281	1289	1288	2.740	3.125	1000	0.0163	0.0000	0.00	2.7077	4.31	90.0	127585.50	0.00
1282	1290	1294	2.864	2.495	1200	0.0065	0.0000	0.00	2.7659	3.06	90.0	45977.52	0.00
1284	1292	1172	2.200	2.200	1200	0.0187	0.0000	0.00	2.8829	4.72	55.3	237244.92	0.00
1286	1294	1292	2.824	2.200	1200	0.0124	0.0000	0.00	2.8795	4.02	67.9	106096.68	0.00
4000	1281	1276	1.311	1.300	300	0.0113	0.0000	0.00	0.0549	1.49	52.6	94762.50	0.00
4001	1276	1197	1.347	1.664	300	0.0211	0.0000	0.00	0.1283	2.27	90.0	137698.75	0.00
3006	17	28	1.300	1.300	300	0.0530	0.0000	0.00	0.1693	3.49	74.9	39672.50	0.00
3007	36	13	2.349	1.300	300	0.1260	0.0000	0.00	0.2369	5.29	67.9	36811.25	0.00
3012	63	95	2.082	2.151	450	0.0120	0.0000	0.00	0.2833	2.23	90.0	79770.32	0.00
3014	157	141	2.032	2.633	900	0.0150	0.0000	0.00	1.9674	3.86	90.0	87505.92	0.00
3051	1175	1223	1.450	1.687	450	0.0278	0.0000	0.00	0.4310	3.39	90.0	27672.96	0.00
3052	1186	1177	1.358	1.400	300	0.0036	0.0000	0.00	0.0529	0.94	90.0	31745.00	0.00
3053	1176	1173	1.250	2.024	150	0.0286	0.0000	0.00	0.0236	1.67	90.0	30065.00	0.00
3056	1132	1145	1.250	1.250	150	0.0193	0.0000	0.00	0.0125	1.26	58.1	34886.25	0.00
3059	1137	1075	1.300	1.300	300	0.0207	0.0000	0.00	0.0984	2.15	69.7	29583.75	0.00
5000	1035	5000	5.323	5.964	1200	0.0342	0.0000	0.00	6.3307	6.99	90.0	176506.88	0.00

Anhang C: Ergebnisse der Simulation

(1)	JUNCTION NUMBER		(4)	MEAN JUNCTION ELEVATION (M)		(7)	TIME OF OCCURRENCE HR. MIN.			(10)	LENGTH OF SURCHARGE (MIN)	
(2)	GROUND ELEVATION (M)		(5)	JUNCTION AVERAGE % CHANGE		(8)	METERS OF SURCHARGE AT MAX ELEVATION			(11)	LENGTH OF FLOODING (MIN)	
(3)	UPPERMOST PIPE CROWN ELEVATION (M)		(6)	MAXIMUM JUNCTION ELEV. (M)		(9)	METERS MAX. DEPTH IS BELOW GROUND ELEVATION			(12)	MAXIMUM JUNCTION AREA (SQ.MET)	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	
1	277.94	276.94	276.68	0.0221	276.83	1	15	0.00	1.11	0.0	0.0	1.010E+01
2	282.14	281.14	280.88	0.0201	281.01	1	15	0.00	1.13	0.0	0.0	9.630E+00
3	285.59	284.59	284.32	0.0170	284.44	1	15	0.00	1.15	0.0	0.0	7.845E+00
4	288.74	287.74	287.47	0.0198	287.61	1	15	0.00	1.13	0.0	0.0	1.277E+01
6	290.54	289.54	289.29	0.0282	289.49	1	15	0.00	1.05	0.0	0.0	1.292E+01
7	293.63	292.63	292.36	0.0141	292.45	1	15	0.00	1.18	0.0	0.0	1.466E+01
10	296.02	295.02	294.75	0.0173	294.87	1	15	0.00	1.15	0.0	0.0	1.111E+01
11	296.19	295.19	294.98	0.0264	295.13	1	15	0.00	1.06	0.0	0.0	7.834E+00
12	231.07	228.92	228.57	0.0236	228.78	1	15	0.00	2.29	0.0	0.0	1.014E+01
13	237.98	236.98	236.58	0.0203	236.80	1	15	0.00	1.18	0.0	0.0	1.152E+01
15	245.38	244.28	244.14	0.0119	244.18	1	15	0.00	1.20	0.0	0.0	5.890E+00
17	250.94	249.94	249.68	0.0225	249.84	1	15	0.00	1.10	0.0	0.0	2.648E+01
18	256.15	255.15	254.88	0.0170	255.00	1	15	0.00	1.15	0.0	0.0	1.829E+01
19	258.33	257.33	257.06	0.0216	257.22	1	15	0.00	1.11	0.0	0.0	2.006E+01
20	225.26	224.26	223.91	0.0276	224.18	1	15	0.00	1.08	0.0	0.0	1.394E+01
21	259.55	258.55	258.27	0.0152	258.38	1	15	0.00	1.17	0.0	0.0	1.513E+01
22	260.25	259.25	258.96	0.0066	259.01	1	15	0.00	1.24	0.0	0.0	4.863E+00
24	247.99	246.99	246.73	0.0227	246.89	1	15	0.00	1.10	0.0	0.0	1.786E+01
26	243.75	242.75	242.49	0.0294	242.71	1	15	0.00	1.04	0.0	0.0	1.200E+01
27	248.38	246.13	245.86	0.0207	246.01	1	15	0.00	2.37	0.0	0.0	1.962E+01
28	248.54	247.54	247.29	0.0468	247.65	1	15	0.11	0.89	13.4	0.0	1.492E+01
29	241.36	240.36	240.09	0.0218	240.25	1	15	0.00	1.11	0.0	0.0	1.217E+01
30	201.51	200.51	200.29	0.0245	200.42	1	15	0.00	1.09	0.0	0.0	5.199E+00
31	203.38	202.38	201.58	0.0093	201.76	1	15	0.00	1.62	0.0	0.0	4.907E+00
32	203.55	202.45	202.32	0.0259	202.41	1	15	0.00	1.14	0.0	0.0	3.760E+00
33	202.70	201.59	200.17	0.0064	200.38	1	15	0.00	2.32	0.0	0.0	9.941E+00
34	240.77	239.33	239.16	0.0280	239.29	1	15	0.00	1.48	0.0	0.0	4.488E+00
35	241.84	240.74	240.61	0.0260	240.70	1	15	0.00	1.14	0.0	0.0	3.847E+00
36	244.29	242.24	241.97	0.0212	242.13	1	15	0.00	2.16	0.0	0.0	2.708E+01
37	246.03	245.03	244.78	0.0387	245.07	1	15	0.04	0.96	3.6	0.0	1.562E+01
38	238.89	237.84	237.66	0.0222	237.77	1	15	0.00	1.12	0.0	0.0	6.743E+00
39	192.72	190.47	189.95	0.0257	190.32	1	15	0.00	2.40	0.0	0.0	2.014E+01
41	192.98	191.46	191.03	0.0258	191.34	1	15	0.00	1.64	0.0	0.0	2.585E+01
42	193.42	192.37	191.94	0.0262	192.25	1	15	0.00	1.17	0.0	0.0	2.889E+01
43	194.52	193.52	193.09	0.0258	193.40	1	15	0.00	1.12	0.0	0.0	1.687E+01
45	196.77	195.20	194.81	0.0238	195.06	1	15	0.00	1.71	0.0	0.0	1.902E+01
46	199.61	198.61	198.31	0.0259	198.52	1	15	0.00	1.09	0.0	0.0	2.145E+01
47	203.04	201.37	201.06	0.0227	201.25	1	15	0.00	1.79	0.0	0.0	2.249E+01
49	203.75	202.25	201.96	0.0338	202.24	1	15	0.00	1.51	0.0	0.0	2.009E+01
50	204.24	203.19	202.89	0.0260	203.11	1	15	0.00	1.13	0.0	0.0	2.071E+01
51	204.10	202.70	202.48	0.0173	202.58	1	15	0.00	1.52	0.0	0.0	6.411E+00
53	204.85	203.75	203.63	0.0259	203.71	1	20	0.00	1.14	0.0	0.0	5.989E+00
55	209.53	208.53	208.30	0.0162	208.40	1	15	0.00	1.13	0.0	0.0	1.096E+01
56	212.71	211.71	211.47	0.0108	211.54	1	15	0.00	1.17	0.0	0.0	1.015E+01
57	214.37	213.37	213.13	0.0055	213.16	1	15	0.00	1.21	0.0	0.0	4.132E+00

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
59	210.06	208.96	208.83	0.0166	208.88	1 15	0.00	1.18	0.0	0.0	4.102E+00
60	204.72	203.67	203.39	0.0110	203.47	1 15	0.00	1.25	0.0	0.0	7.042E+00
61	208.37	207.37	207.05	0.0179	207.20	1 15	0.00	1.17	0.0	0.0	6.220E+00
62	196.54	195.54	195.31	0.0152	195.40	1 15	0.00	1.14	0.0	0.0	9.478E+00
63	197.74	196.74	195.73	0.0107	196.00	1 15	0.00	1.74	0.0	0.0	1.537E+01
64	198.62	197.62	197.28	0.0234	197.49	1 15	0.00	1.13	0.0	0.0	1.507E+01
66	197.20	196.15	195.98	0.0250	196.10	1 15	0.00	1.10	0.0	0.0	3.628E+00
67	199.77	198.76	198.41	0.0188	198.58	1 15	0.00	1.19	0.0	0.0	1.924E+01
68	195.31	194.31	194.05	0.0202	194.19	1 15	0.00	1.12	0.0	0.0	9.547E+00
69	206.07	204.97	204.71	0.0259	204.90	1 15	0.00	1.17	0.0	0.0	1.286E+01
70	208.59	207.49	207.26	0.0122	207.33	1 15	0.00	1.26	0.0	0.0	5.091E+00
71	209.41	208.31	208.18	0.0250	208.27	1 15	0.00	1.14	0.0	0.0	4.137E+00
72	202.31	201.31	199.37	0.0072	199.71	1 15	0.00	2.60	0.0	0.0	2.156E+01
73	202.79	201.79	201.53	0.0186	201.65	1 15	0.00	1.14	0.0	0.0	6.730E+00
74	203.17	200.20	199.90	0.0266	200.11	1 15	0.00	3.06	0.0	0.0	1.436E+01
75	205.99	204.99	203.67	0.0066	203.88	1 15	0.00	2.11	0.0	0.0	7.045E+00
76	214.35	213.35	213.07	0.0109	213.15	1 15	0.00	1.20	0.0	0.0	9.856E+00
77	215.08	214.08	213.80	0.0135	213.90	1 15	0.00	1.18	0.0	0.0	8.222E+00
78	216.91	215.91	215.62	0.0093	215.69	1 15	0.00	1.22	0.0	0.0	1.007E+01
79	219.09	218.09	217.80	0.0073	217.85	1 15	0.00	1.24	0.0	0.0	9.005E+00
81	220.65	219.65	219.35	0.0027	219.37	1 11	0.00	1.28	0.0	0.0	4.588E+00
83	212.66	211.66	211.38	0.0130	211.47	1 15	0.00	1.19	0.0	0.0	8.719E+00
86	252.70	251.70	251.43	0.0202	251.58	1 15	0.00	1.12	0.0	0.0	1.233E+01
87	255.70	254.51	254.25	0.0216	254.40	1 15	0.00	1.30	0.0	0.0	1.604E+01
88	257.01	255.06	254.81	0.0304	255.03	1 15	0.00	1.98	0.0	0.0	1.609E+01
89	256.14	255.14	254.88	0.0283	255.09	1 15	0.00	1.05	0.0	0.0	8.718E+00
92	250.93	249.93	249.66	0.0203	249.81	1 15	0.00	1.12	0.0	0.0	1.015E+01
93	195.31	194.26	194.07	0.0061	194.10	1 15	0.00	1.21	0.0	0.0	2.777E+00
94	195.23	193.66	193.03	0.0797	193.75	1 17	0.09	1.48	26.2	0.0	3.389E+01
95	197.05	195.66	194.68	0.0184	195.15	1 16	0.00	1.90	0.0	0.0	5.875E+01
96	198.98	197.91	197.32	0.0256	197.74	1 16	0.00	1.24	0.0	0.0	4.280E+01
97	201.05	200.05	199.46	0.0258	199.88	1 16	0.00	1.17	0.0	0.0	4.352E+01
98	203.24	202.24	201.65	0.0267	202.06	1 16	0.00	1.18	0.0	0.0	4.299E+01
99	205.54	204.54	203.95	0.0304	204.33	1 16	0.00	1.21	0.0	0.0	4.247E+01
100	205.47	204.42	204.24	0.0135	204.30	1 15	0.00	1.17	0.0	0.0	5.683E+00
101	206.59	205.59	205.33	0.0260	205.52	1 15	0.00	1.07	0.0	0.0	6.290E+00
102	208.03	207.03	206.44	0.0404	206.81	1 16	0.00	1.22	0.0	0.0	4.374E+01
103	210.67	209.67	208.89	0.0663	209.29	1 3	0.00	1.38	0.0	0.0	2.274E+01
106	213.67	212.67	212.17	0.1318	212.55	1 2	0.00	1.12	0.0	0.0	2.404E+01
108	214.76	213.76	213.46	0.0034	213.49	1 13	0.00	1.27	0.0	0.0	4.076E+00
110	215.52	214.52	214.01	0.1323	214.37	1 2	0.00	1.15	0.0	0.0	2.040E+01
111	222.86	221.86	220.69	0.0221	221.11	1 15	0.00	1.75	0.0	0.0	1.101E+01
112	219.49	218.49	217.18	0.0522	217.57	1 2	0.00	1.92	0.0	0.0	1.274E+01
113	225.01	224.01	223.56	0.0650	224.02	1 14	0.01	0.99	1.2	0.0	1.827E+01
114	230.18	229.18	227.78	0.0098	228.02	1 15	0.00	2.16	0.0	0.0	2.069E+01
115	236.26	235.26	233.27	0.0062	233.51	1 15	0.00	2.75	0.0	0.0	9.774E+00
116	245.51	244.51	242.51	0.0052	242.74	1 15	0.00	2.77	0.0	0.0	1.251E+01
117	253.08	252.08	251.18	0.0106	251.41	1 15	0.00	1.67	0.0	0.0	1.164E+01
118	260.98	259.98	259.17	0.0112	259.39	1 15	0.00	1.59	0.0	0.0	1.221E+01
119	264.57	263.57	263.28	0.0041	263.31	1 15	0.00	1.26	0.0	0.0	3.999E+00
122	265.95	264.95	264.48	0.0174	264.69	1 15	0.00	1.26	0.0	0.0	8.284E+00
123	268.16	267.16	266.80	0.0226	267.02	1 15	0.00	1.14	0.0	0.0	8.928E+00
124	270.97	269.97	269.61	0.0180	269.78	1 15	0.00	1.19	0.0	0.0	1.054E+01
126	273.42	272.31	271.96	0.0256	272.20	1 15	0.00	1.22	0.0	0.0	1.376E+01
127	274.39	272.95	272.63	0.0354	272.95	1 14	0.00	1.44	1.6	0.0	1.620E+01
128	275.17	274.03	273.69	0.0259	273.93	1 15	0.00	1.24	0.0	0.0	1.784E+01
129	275.59	274.59	274.25	0.0310	274.55	1 15	0.00	1.04	0.0	0.0	1.125E+01
130	277.60	276.60	276.33	0.0171	276.45	1 15	0.00	1.15	0.0	0.0	1.606E+01
131	280.87	279.87	279.59	0.0108	279.66	1 15	0.00	1.21	0.0	0.0	1.248E+01
133	188.38	186.94	186.19	0.0255	186.72	1 21	0.00	1.66	0.0	0.0	4.421E+01
135	189.18	187.71	186.95	0.0257	187.48	1 16	0.00	1.70	0.0	0.0	4.225E+01
136	190.04	188.65	187.90	0.0287	188.51	1 16	0.00	1.53	0.0	0.0	4.201E+01
137	190.78	189.36	188.60	0.0256	189.14	1 16	0.00	1.64	0.0	0.0	4.570E+01
138	191.74	190.39	189.63	0.0254	190.16	1 16	0.00	1.58	0.0	0.0	5.471E+01
139	192.80	191.38	190.62	0.0266	191.18	1 16	0.00	1.62	0.0	0.0	4.978E+01
140	193.70	192.15	191.39	0.0269	191.92	1 16	0.00	1.78	0.0	0.0	3.130E+01

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
141	194.17	193.12	191.72	0.0226	192.41	1 15	0.00	1.76	0.0	0.0	3.037E+01
142	194.84	193.79	193.60	0.0120	193.66	1 15	0.00	1.18	0.0	0.0	5.117E+00
143	189.58	186.38	185.78	0.0281	186.21	1 19	0.00	3.37	0.0	0.0	4.340E+01
144	190.15	186.59	185.99	0.0291	186.41	1 19	0.00	3.74	0.0	0.0	4.302E+01
145	190.72	186.79	186.19	0.0300	186.62	1 18	0.00	4.10	0.0	0.0	4.015E+01
146	190.83	189.83	186.67	0.0058	187.10	1 17	0.00	3.73	0.0	0.0	5.223E+01
147	190.76	186.98	186.38	0.0273	186.79	1 18	0.00	3.97	0.0	0.0	4.848E+01
148	189.26	187.49	186.89	0.0274	187.31	1 17	0.00	1.95	0.0	0.0	2.297E+01
149	188.80	187.80	187.29	0.0259	187.65	1 17	0.00	1.15	0.0	0.0	2.600E+01
150	189.33	188.33	187.80	0.0230	188.11	1 16	0.00	1.22	0.0	0.0	2.904E+01
151	189.95	188.95	188.42	0.0231	188.73	1 16	0.00	1.22	0.0	0.0	2.958E+01
152	190.70	189.61	189.08	0.0211	189.37	1 16	0.00	1.33	0.0	0.0	2.860E+01
153	191.50	189.98	189.48	0.0315	189.93	1 16	0.00	1.57	0.0	0.0	3.430E+01
154	191.53	190.53	190.24	0.0046	190.27	1 15	0.00	1.26	0.0	0.0	1.291E+01
156	192.60	191.60	191.31	0.0044	191.34	1 15	0.00	1.26	0.0	0.0	8.186E+00
157	194.26	193.13	192.37	0.0351	192.91	1 16	0.00	1.35	0.0	0.0	2.186E+01
158	188.41	186.17	185.58	0.0264	186.01	1 20	0.00	2.40	0.0	0.0	4.120E+01
159	283.51	282.51	282.22	0.0056	282.26	1 15	0.00	1.25	0.0	0.0	5.119E+00
160	269.33	268.33	268.04	0.0171	268.16	1 15	0.00	1.17	0.0	0.0	1.789E+01
161	270.41	269.41	269.12	0.0051	269.15	1 15	0.00	1.26	0.0	0.0	4.514E+00
162	270.94	269.28	269.02	0.0300	269.24	1 15	0.00	1.70	0.0	0.0	1.170E+01
163	272.11	271.11	269.50	0.0053	269.68	1 15	0.00	2.43	0.0	0.0	1.304E+01
164	274.71	273.71	273.42	0.0058	273.46	1 15	0.00	1.25	0.0	0.0	5.402E+00
166	273.33	270.11	269.86	0.0374	270.02	1 15	0.00	3.31	0.0	0.0	1.320E+01
167	272.84	271.79	270.03	0.0115	270.21	1 19	0.00	2.63	0.0	0.0	1.001E+01
168	273.80	272.75	272.56	0.0122	272.62	1 15	0.00	1.18	0.0	0.0	5.023E+00
169	271.44	270.44	270.23	0.0256	270.37	1 30	0.00	1.07	0.0	0.0	4.945E+00
1009	170.00	169.00	168.00	0.0280	168.78	1 24	0.00	1.22	0.0	0.0	9.359E+01
1013	172.35	170.81	170.20	0.0194	170.51	1 17	0.00	1.84	0.0	0.0	6.075E+01
1014	173.04	171.43	170.89	0.0411	171.57	1 16	0.14	1.47	19.7	0.0	3.772E+01
1015	173.88	172.19	171.60	0.0267	172.01	1 16	0.00	1.87	0.0	0.0	5.802E+01
1016	174.66	172.90	172.31	0.0264	172.72	1 16	0.00	1.94	0.0	0.0	3.388E+01
1019	169.74	166.56	165.96	0.0291	166.39	1 21	0.00	3.35	0.0	0.0	3.030E+01
1020	169.59	166.69	166.09	0.0279	166.52	1 21	0.00	3.07	0.0	0.0	3.806E+01
1021	169.31	166.83	166.23	0.0286	166.66	1 20	0.00	2.65	0.0	0.0	3.639E+01
1022	169.23	166.95	166.35	0.0276	166.77	1 20	0.00	2.46	0.0	0.0	4.412E+01
1023	169.15	167.16	166.56	0.0273	166.98	1 19	0.00	2.17	0.0	0.0	4.715E+01
1024	169.08	167.30	166.70	0.0280	167.12	1 19	0.00	1.96	0.0	0.0	4.153E+01
1025	169.06	167.46	166.86	0.0274	167.28	1 18	0.00	1.78	0.0	0.0	4.606E+01
1026	168.70	167.64	167.04	0.0279	167.46	1 18	0.00	1.24	0.0	0.0	3.924E+01
1027	168.75	167.75	167.15	0.0312	167.57	1 17	0.00	1.18	0.0	0.0	3.575E+01
1028	170.00	166.39	165.79	0.0302	166.21	1 22	0.00	3.79	0.0	0.0	2.610E+01
1029	170.16	167.98	167.36	0.0298	167.71	1 17	0.00	2.45	0.0	0.0	3.877E+01
1030	170.02	168.12	167.53	0.0254	167.93	1 16	0.00	2.09	0.0	0.0	3.723E+01
1031	169.32	168.26	167.66	0.0256	168.08	1 16	0.00	1.24	0.0	0.0	1.970E+01
1032	170.00	166.29	165.70	0.0282	166.11	1 22	0.00	3.89	0.0	0.0	3.421E+01
1033	170.00	166.14	165.54	0.0279	165.97	1 23	0.00	4.03	0.0	0.0	3.898E+01
1034	170.00	166.01	165.43	0.0261	165.84	1 23	0.00	4.16	0.0	0.0	3.752E+01
1035	170.00	166.50	164.87	0.0171	165.58	1 18	0.00	4.42	0.0	0.0	3.833E+01
1038	169.90	166.48	165.89	0.0314	166.30	1 22	0.00	3.60	0.0	0.0	2.448E+01
1039	183.79	182.79	182.54	0.0260	182.72	1 15	0.00	1.07	0.0	0.0	1.438E+01
1040	184.39	183.39	183.17	0.0170	183.26	1 15	0.00	1.13	0.0	0.0	6.925E+00
1042	183.24	182.24	181.96	0.0108	182.03	1 15	0.00	1.21	0.0	0.0	9.566E+00
1043	182.76	181.71	181.52	0.0118	181.58	1 15	0.00	1.18	0.0	0.0	4.184E+00
1044	181.21	180.16	179.93	0.0123	180.00	1 15	0.00	1.21	0.0	0.0	6.041E+00
1045	177.89	176.89	176.66	0.0145	176.75	1 15	0.00	1.14	0.0	0.0	1.022E+01
1046	174.30	173.30	173.08	0.0257	173.24	1 15	0.00	1.06	0.0	0.0	1.190E+01
1047	172.31	171.31	170.24	0.0174	170.70	1 19	0.00	1.61	0.0	0.0	7.198E+01
1052	172.47	171.47	169.24	0.0091	169.73	1 17	0.00	2.74	0.0	0.0	6.478E+01
1056	172.55	170.59	169.85	0.0290	170.45	1 17	0.00	2.10	0.0	0.0	5.246E+01
1057	172.59	171.10	170.34	0.0254	170.87	1 17	0.00	1.72	0.0	0.0	5.017E+01
1058	172.62	171.59	170.83	0.0254	171.36	1 16	0.00	1.26	0.0	0.0	5.775E+01
1059	173.84	172.84	171.43	0.0149	171.96	1 16	0.00	1.88	0.0	0.0	3.314E+01
1060	173.86	172.60	171.93	0.0259	172.40	1 16	0.00	1.46	0.0	0.0	4.377E+01
1061	174.10	172.92	172.24	0.0259	172.71	1 16	0.00	1.39	0.0	0.0	3.690E+01
1062	174.31	173.18	172.50	0.0254	172.97	1 17	0.00	1.34	0.0	0.0	3.114E+01

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
1063	174.56	173.38	172.70	0.0259	173.18	1 16	0.00	1.38	0.0	0.0	4.194E+01
1065	175.17	174.17	173.08	0.0169	173.55	1 16	0.00	1.62	0.0	0.0	2.840E+01
1066	175.61	174.34	173.92	0.0257	174.22	1 15	0.00	1.39	0.0	0.0	1.752E+01
1067	175.86	174.54	174.12	0.0268	174.43	1 15	0.00	1.43	0.0	0.0	5.656E+00
1069	176.50	175.50	175.05	0.0199	175.28	1 15	0.00	1.22	0.0	0.0	5.894E+00
1074	175.87	174.87	174.60	0.0172	174.72	1 15	0.00	1.15	0.0	0.0	9.623E+00
1075	176.80	175.80	175.55	0.0263	175.73	1 15	0.00	1.07	0.0	0.0	1.077E+01
1079	170.28	168.95	168.52	0.0259	168.83	1 15	0.00	1.45	0.0	0.0	1.208E+01
1080	170.62	169.57	169.19	0.0264	169.47	1 20	0.00	1.15	0.0	0.0	1.348E+01
1082	174.03	173.03	172.73	0.0259	172.94	1 15	0.00	1.09	0.0	0.0	1.445E+01
1083	171.41	170.41	170.03	0.0271	170.32	1 15	0.00	1.09	0.0	0.0	8.403E+00
1084	174.13	172.21	171.90	0.0182	172.05	1 15	0.00	2.08	0.0	0.0	2.458E+01
1085	174.38	172.66	172.38	0.0393	172.71	1 15	0.05	1.67	12.5	0.0	1.451E+01
1090	174.90	173.90	172.82	0.0174	173.23	1 18	0.00	1.67	0.0	0.0	2.393E+01
1092	174.08	173.08	172.01	0.0173	172.44	1 18	0.00	1.64	0.0	0.0	4.074E+01
1094	178.21	177.21	175.79	0.0181	176.46	1 18	0.00	1.75	0.0	0.0	2.447E+01
1095	172.68	171.68	171.40	0.0139	171.50	1 15	0.00	1.18	0.0	0.0	1.200E+01
1096	174.44	173.44	173.15	0.0067	173.20	1 15	0.00	1.24	0.0	0.0	7.800E+00
1097	176.01	175.01	173.84	0.0297	174.73	1 19	0.00	1.28	0.0	0.0	1.346E+01
1098	179.57	178.57	177.54	0.0265	178.30	1 18	0.00	1.27	0.0	0.0	3.759E+01
1101	181.83	180.83	179.52	0.0073	179.75	1 15	0.00	2.08	0.0	0.0	1.290E+01
1102	182.19	181.19	180.93	0.0181	181.05	1 15	0.00	1.14	0.0	0.0	1.351E+01
1103	182.60	181.59	181.31	0.0180	181.40	1 15	0.00	1.20	0.0	0.0	1.174E+01
1105	182.68	181.68	181.39	0.0326	181.44	1 6	0.00	1.24	0.0	0.0	5.170E+00
1106	182.01	180.66	180.45	0.0260	180.60	1 15	0.00	1.41	0.0	0.0	1.143E+01
1107	182.31	180.95	180.74	0.0267	180.89	1 16	0.00	1.42	0.0	0.0	6.250E+00
1108	182.62	181.52	181.40	0.0259	181.48	1 15	0.00	1.14	0.0	0.0	4.568E+00
1110	182.89	181.45	181.20	0.0260	181.38	1 15	0.00	1.51	0.0	0.0	1.332E+01
1111	183.38	182.34	182.03	0.0216	182.21	1 15	0.00	1.17	0.0	0.0	7.335E+00
1112	183.64	182.54	182.41	0.0222	182.49	1 15	0.00	1.15	0.0	0.0	3.880E+00
1113	187.74	186.63	186.37	0.0229	186.53	1 15	0.00	1.21	0.0	0.0	1.383E+01
1114	176.72	175.41	174.70	0.0219	175.11	1 16	0.00	1.61	0.0	0.0	3.377E+01
1115	177.03	176.03	175.65	0.0259	175.92	1 15	0.00	1.11	0.0	0.0	7.596E+00
1116	178.73	177.73	177.47	0.0210	177.61	1 15	0.00	1.12	0.0	0.0	1.676E+01
1117	180.16	178.99	178.73	0.0179	178.85	1 15	0.00	1.31	0.0	0.0	1.629E+01
1119	181.03	179.12	178.88	0.0280	179.06	1 15	0.00	1.97	0.0	0.0	8.760E+00
1120	187.68	186.68	186.41	0.0206	186.56	1 15	0.00	1.12	0.0	0.0	7.197E+00
1121	181.29	180.19	180.07	0.0259	180.15	1 15	0.00	1.14	0.0	0.0	4.850E+00
1122	180.97	179.97	179.74	0.0139	179.82	1 15	0.00	1.15	0.0	0.0	7.405E+00
1123	180.21	179.21	178.94	0.0139	179.03	1 15	0.00	1.18	0.0	0.0	6.612E+00
1124	179.50	178.50	178.23	0.0177	178.35	1 15	0.00	1.15	0.0	0.0	1.396E+01
1125	178.57	177.57	177.31	0.0229	177.47	1 15	0.00	1.10	0.0	0.0	1.631E+01
1126	177.03	175.98	175.72	0.0259	175.91	1 15	0.00	1.12	0.0	0.0	1.361E+01
1127	177.70	176.70	176.45	0.0263	176.63	1 15	0.00	1.07	0.0	0.0	1.506E+01
1129	176.38	174.96	174.70	0.0261	174.89	1 16	0.00	1.49	0.0	0.0	1.403E+01
1130	174.90	173.63	173.33	0.0259	173.54	1 16	0.00	1.36	0.0	0.0	1.260E+01
1131	174.54	172.93	172.64	0.0332	172.92	1 16	0.00	1.62	0.0	0.0	1.271E+01
1132	186.99	185.89	185.76	0.0190	185.82	1 15	0.00	1.17	0.0	0.0	4.208E+00
1133	174.21	172.97	172.31	0.0115	172.50	1 15	0.00	1.71	0.0	0.0	1.517E+01
1134	174.06	173.06	172.80	0.0261	172.99	1 15	0.00	1.07	0.0	0.0	1.524E+01
1135	174.92	173.92	173.63	0.0075	173.69	1 15	0.00	1.23	0.0	0.0	6.317E+00
1137	177.50	176.50	176.24	0.0215	176.39	1 15	0.00	1.11	0.0	0.0	1.323E+01
1138	179.05	178.05	177.78	0.0167	177.90	1 15	0.00	1.15	0.0	0.0	1.364E+01
1140	180.00	179.00	178.75	0.0273	178.94	1 17	0.00	1.06	0.0	0.0	8.553E+00
1141	180.12	179.12	178.91	0.0231	179.03	1 17	0.00	1.09	0.0	0.0	6.235E+00
1142	180.24	178.95	178.68	0.0156	178.79	1 16	0.00	1.45	0.0	0.0	8.974E+00
1143	184.86	183.54	183.29	0.0260	183.47	1 15	0.00	1.39	0.0	0.0	1.234E+01
1144	185.66	184.61	184.40	0.0259	184.55	1 16	0.00	1.11	0.0	0.0	7.769E+00
1145	186.22	185.12	184.95	0.0240	185.06	1 16	0.00	1.16	0.0	0.0	4.018E+00
1146	176.47	175.47	174.88	0.0254	175.29	1 16	0.00	1.18	0.0	0.0	1.281E+01
1147	177.53	176.53	176.10	0.0230	176.37	1 16	0.00	1.16	0.0	0.0	1.005E+01
1148	187.39	186.39	186.13	0.0220	186.28	1 15	0.00	1.11	0.0	0.0	1.190E+01
1150	186.86	185.86	185.60	0.0260	185.79	1 15	0.00	1.07	0.0	0.0	7.677E+00
1151	179.67	178.67	178.29	0.0233	178.53	1 15	0.00	1.14	0.0	0.0	1.250E+01
1153	181.12	180.12	179.87	0.0240	180.03	1 15	0.00	1.09	0.0	0.0	1.295E+01
1154	182.65	181.65	181.23	0.0150	181.39	1 15	0.00	1.26	0.0	0.0	7.674E+00

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
1155	183.90	182.85	182.68	0.0260	182.80	1 15	0.00	1.10	0.0	0.0	5.830E+00
1157	184.52	183.47	183.06	0.0189	183.26	1 20	0.00	1.26	0.0	0.0	1.395E+01
1158	184.57	183.57	183.36	0.0223	183.48	1 16	0.00	1.09	0.0	0.0	6.233E+00
1159	184.54	183.52	183.27	0.0248	183.44	1 16	0.00	1.10	0.0	0.0	1.012E+01
1163	182.30	181.30	181.05	0.0260	181.23	1 15	0.00	1.07	0.0	0.0	1.773E+01
1164	183.92	182.61	182.36	0.0229	182.51	1 15	0.00	1.41	0.0	0.0	1.999E+01
1167	179.39	178.21	177.49	0.0154	177.78	1 15	0.00	1.61	0.0	0.0	1.119E+01
1168	176.48	175.48	175.14	0.0221	175.34	1 16	0.00	1.14	0.0	0.0	1.377E+01
1169	179.36	178.36	178.03	0.0260	178.26	1 15	0.00	1.10	0.0	0.0	2.078E+01
1170	180.10	179.10	178.87	0.0122	178.94	1 15	0.00	1.16	0.0	0.0	6.269E+00
1171	180.05	178.84	178.58	0.0259	178.77	1 15	0.00	1.28	0.0	0.0	1.827E+01
1172	180.97	179.97	178.39	0.0153	178.83	1 18	0.00	2.14	0.0	0.0	1.903E+01
1173	180.90	179.03	178.77	0.0253	178.95	1 15	0.00	1.95	0.0	0.0	9.807E+00
1174	177.10	176.10	175.83	0.0148	175.93	1 15	0.00	1.17	0.0	0.0	9.001E+00
1175	178.78	177.78	177.40	0.0359	177.80	1 15	0.02	0.98	7.1	0.0	1.264E+01
1176	181.11	180.01	179.88	0.0260	179.97	1 15	0.00	1.14	0.0	0.0	3.795E+00
1177	176.74	175.64	175.38	0.0242	175.55	1 15	0.00	1.19	0.0	0.0	9.954E+00
1178	177.43	176.43	176.14	0.0259	176.34	1 15	0.00	1.09	0.0	0.0	1.378E+01
1179	179.76	178.54	178.25	0.0239	178.43	1 15	0.00	1.33	0.0	0.0	1.931E+01
1180	181.68	179.95	179.67	0.0295	179.90	1 16	0.00	1.78	0.0	0.0	2.452E+01
1181	182.12	180.86	180.57	0.0258	180.77	1 15	0.00	1.35	0.0	0.0	1.477E+01
1182	182.29	181.28	181.03	0.0265	181.21	1 15	0.00	1.08	0.0	0.0	8.874E+00
1183	182.53	181.53	181.33	0.0289	181.49	1 15	0.00	1.04	0.0	0.0	1.063E+01
1184	184.39	183.34	183.17	0.0258	183.28	1 20	0.00	1.11	0.0	0.0	2.814E+00
1186	176.83	175.83	175.51	0.0219	175.70	1 15	0.00	1.13	0.0	0.0	1.114E+01
1187	176.83	175.83	175.55	0.0202	175.70	1 15	0.00	1.13	0.0	0.0	3.769E+00
1188	178.11	177.11	176.82	0.0079	176.88	1 15	0.00	1.23	0.0	0.0	5.914E+00
1191	177.79	176.79	176.52	0.0155	176.63	1 15	0.00	1.16	0.0	0.0	1.029E+01
1192	178.88	177.78	177.51	0.0133	177.60	1 15	0.00	1.28	0.0	0.0	1.300E+01
1193	178.83	177.83	177.58	0.0225	177.73	1 15	0.00	1.10	0.0	0.0	8.723E+00
1194	176.76	175.76	175.50	0.0193	175.63	1 15	0.00	1.13	0.0	0.0	8.216E+00
1195	180.38	178.97	178.76	0.0260	178.91	1 15	0.00	1.47	0.0	0.0	5.635E+00
1196	179.78	178.45	178.24	0.0260	178.39	1 15	0.00	1.39	0.0	0.0	9.169E+00
1197	179.32	177.96	177.58	0.0206	177.78	1 16	0.00	1.54	0.0	0.0	8.802E+00
1198	182.68	181.58	181.45	0.0259	181.54	1 16	0.00	1.14	0.0	0.0	5.365E+00
1199	178.48	176.67	176.33	0.0250	176.56	1 16	0.00	1.92	0.0	0.0	8.776E+00
1200	181.19	179.92	179.75	0.0260	179.87	1 15	0.00	1.32	0.0	0.0	4.130E+00
1201	186.55	185.55	184.86	0.0122	185.07	1 15	0.00	1.48	0.0	0.0	7.637E+00
1202	185.93	184.65	184.35	0.0260	184.57	1 15	0.00	1.36	0.0	0.0	1.635E+01
1203	185.10	183.78	183.44	0.0257	183.68	1 15	0.00	1.42	0.0	0.0	1.117E+01
1204	184.21	183.20	182.86	0.0259	183.10	1 16	0.00	1.11	0.0	0.0	2.128E+01
1205	183.51	182.42	182.08	0.0259	182.32	1 16	0.00	1.19	0.0	0.0	2.235E+01
1206	182.74	181.27	180.88	0.0258	181.16	1 16	0.00	1.58	0.0	0.0	2.474E+01
1207	182.04	180.62	180.25	0.0337	180.61	1 16	0.00	1.43	0.0	0.0	3.405E+01
1208	180.93	179.88	179.49	0.0216	179.71	1 16	0.00	1.22	0.0	0.0	3.434E+01
1209	186.25	185.20	185.03	0.0209	185.12	1 15	0.00	1.13	0.0	0.0	3.366E+00
1210	179.47	178.47	178.08	0.0224	178.31	1 15	0.00	1.16	0.0	0.0	2.126E+01
1211	183.35	182.35	182.04	0.0208	182.21	1 15	0.00	1.14	0.0	0.0	1.873E+01
1212	183.68	182.63	182.45	0.0168	182.53	1 15	0.00	1.15	0.0	0.0	5.210E+00
1213	181.63	180.63	180.35	0.0100	180.42	1 15	0.00	1.21	0.0	0.0	1.312E+01
1215	183.67	182.67	182.38	0.0083	182.44	1 15	0.00	1.23	0.0	0.0	5.322E+00
1216	176.61	175.61	175.22	0.0260	175.50	1 15	0.00	1.11	0.0	0.0	1.342E+01
1223	178.34	177.10	176.72	0.0285	176.95	1 15	0.00	1.39	0.0	0.0	2.296E+01
1256	176.27	174.44	173.85	0.0256	174.26	1 16	0.00	2.01	0.0	0.0	4.302E+01
1257	175.42	173.57	172.98	0.0265	173.41	1 16	0.00	2.01	0.0	0.0	3.799E+01
1263	182.13	180.85	180.53	0.0329	180.83	1 16	0.00	1.30	0.0	0.0	1.568E+01
1265	182.63	181.49	181.16	0.0259	181.39	1 15	0.00	1.24	0.0	0.0	8.905E+00
1266	183.52	182.46	182.17	0.0259	182.37	1 16	0.00	1.15	0.0	0.0	1.377E+01
1267	184.28	183.18	182.89	0.0259	183.09	1 16	0.00	1.19	0.0	0.0	1.237E+01
1268	184.93	183.60	183.31	0.0259	183.51	1 16	0.00	1.42	0.0	0.0	1.158E+01
1269	185.56	183.92	183.63	0.0263	183.84	1 16	0.00	1.72	0.0	0.0	6.403E+00
1270	186.38	184.66	184.41	0.0258	184.59	1 16	0.00	1.79	0.0	0.0	1.607E+01
1271	186.81	184.96	184.71	0.0260	184.88	1 17	0.00	1.93	0.0	0.0	1.602E+01
1273	186.01	185.01	184.76	0.0248	184.92	1 17	0.00	1.09	0.0	0.0	8.618E+00
1275	182.54	181.54	181.33	0.0273	181.49	1 15	0.00	1.05	0.0	0.0	5.999E+00
1276	182.33	181.33	181.03	0.0222	181.21	1 17	0.00	1.12	0.0	0.0	2.481E+01

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
1279	181.13	180.13	179.79	0.0220	179.99	1 16	0.00	1.14	0.0	0.0	1.610E+01
1280	183.62	182.62	182.38	0.0253	182.54	1 15	0.00	1.08	0.0	0.0	6.365E+00
1281	183.57	182.56	182.30	0.0179	182.42	1 16	0.00	1.15	0.0	0.0	2.258E+01
1282	184.86	183.23	182.22	0.0259	182.92	1 18	0.00	1.94	0.0	0.0	5.596E+01
1283	185.15	183.54	182.53	0.0255	183.23	1 18	0.00	1.92	0.0	0.0	6.063E+01
1285	185.53	183.87	182.86	0.0253	183.56	1 17	0.00	1.97	0.0	0.0	5.606E+01
1286	185.82	184.12	183.11	0.0261	183.84	1 17	0.00	1.98	0.0	0.0	6.271E+01
1287	186.45	184.52	183.50	0.0253	184.20	1 17	0.00	2.25	0.0	0.0	7.172E+01
1288	186.99	184.87	183.85	0.0261	184.58	1 17	0.00	2.41	0.0	0.0	3.445E+01
1289	187.63	185.98	185.05	0.0233	185.64	1 17	0.00	1.99	0.0	0.0	3.262E+01
1290	184.61	182.95	181.95	0.0260	182.65	1 18	0.00	1.96	0.0	0.0	3.919E+01
1292	182.91	181.91	180.86	0.0181	181.35	1 19	0.00	1.56	0.0	0.0	9.058E+01
1294	184.11	182.82	181.50	0.0239	182.35	1 18	0.00	1.76	0.0	0.0	2.886E+01
5000	168.50	163.74	162.85	0.0345	163.74	1 1	0.00	4.76	27.2	0.0	7.585E+01

(1)	CONDUIT NUMBER	(4)	CONDUIT VERTICAL DEPTH (M)	(7)	MAXIMUM COMPUTED VELOCITY (MPS)	(10)	MAXIMUM DEPTH ABOVE INV. AT CONDUIT ENDS UPSTREAM DOWNSTREAM (M) (M)
(2)	DESIGN FLOW (CMS)	(5)	MAXIMUM COMPUTED FLOW (CMS)	(8)	TIME OF OCCURRENCE HR. MIN.	(11)	LENGTH OF NORM FLOW (MIN)
(3)	DESIGN VELOCITY (M/S)	(6)	TIME OF OCCURRENCE HR. MIN.	(9)	RATIO OF MAX. TO DESIGN FLOW	(12)	CONDUIT SLOPE (M/M)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	
2	3.29E-01	4.66	0.300	2.11E-01	1 15	4.65	1 15	0.64	0.17	0.19	505.7	0.11758
3	3.94E-01	5.58	0.300	1.93E-01	1 15	4.97	1 15	0.49	0.15	0.17	495.3	0.16895
4	3.49E-01	4.94	0.300	1.82E-01	1 15	4.73	1 15	0.52	0.17	0.15	39.2	0.13241
6	1.76E-01	2.49	0.300	1.39E-01	1 15	2.63	1 15	0.79	0.25	0.17	6.6	0.03356
7	3.39E-01	4.79	0.300	1.19E-01	1 15	2.61	1 20	0.35	0.12	0.25	503.2	0.12460
9	3.03E-01	4.29	0.300	2.26E-01	1 15	4.70	1 15	0.75	0.19	0.19	11.2	0.09996
10	1.82E-01	2.58	0.300	7.56E-02	1 15	2.41	1 15	0.41	0.15	0.12	52.8	0.03615
11	3.34E-02	0.68	0.250	2.77E-02	1 15	0.81	1 15	0.83	0.19	0.13	0.0	0.00320
12	6.68E-01	5.31	0.400	5.16E-01	1 15	5.42	0 47	0.77	0.26	0.32	364.9	0.10434
13	5.32E-01	5.53	0.350	4.92E-01	1 15	6.28	1 15	0.92	0.27	0.27	44.7	0.13517
15	5.08E-02	2.88	0.150	1.32E-02	1 15	2.41	1 15	0.26	0.05	0.05	2.7	0.11312
18	2.98E-01	4.22	0.300	1.46E-01	1 15	3.48	1 15	0.49	0.15	0.20	297.7	0.09641
19	1.83E-01	2.59	0.300	1.07E-01	1 15	2.61	1 15	0.58	0.19	0.15	3.0	0.03630
20	7.34E-01	5.84	0.400	5.26E-01	1 15	5.70	0 44	0.72	0.32	0.25	0.2	0.12625
21	1.31E-01	1.85	0.300	5.27E-02	1 15	1.37	1 15	0.40	0.13	0.19	283.5	0.01852
22	1.51E-01	2.14	0.300	1.23E-02	1 15	0.64	1 20	0.08	0.06	0.13	505.8	0.02477
24	2.44E-01	3.46	0.300	1.89E-01	1 15	3.01	1 15	0.77	0.20	0.34	377.4	0.06490
26	2.47E-01	3.50	0.300	2.07E-01	1 15	3.66	1 15	0.84	0.26	0.19	317.7	0.06633
27	2.94E-01	4.16	0.300	1.99E-01	1 15	3.61	1 15	0.68	0.18	0.26	326.8	0.09397
28	1.97E-01	2.79	0.300	1.82E-01	1 15	2.99	1 15	0.92	0.41	0.18	7.2	0.04223
29	2.90E-01	4.10	0.300	2.12E-01	1 15	4.48	1 15	0.73	0.19	0.19	19.4	0.09118
30	2.09E-02	0.43	0.250	2.37E-02	1 3	0.81	1 3	1.14	0.16	0.16	0.0	0.00125
31	9.48E-02	1.34	0.300	8.83E-02	1 15	1.52	1 15	0.93	0.23	0.23	67.5	0.00976
32	2.04E-02	1.16	0.150	1.88E-02	1 15	1.31	1 15	0.92	0.11	0.11	61.3	0.01829
33	1.38E-01	1.43	0.350	1.24E-01	1 15	1.62	1 3	0.90	0.26	0.26	287.2	0.00907
34	6.95E-02	2.21	0.200	5.92E-02	1 15	2.40	1 15	0.85	0.16	0.13	331.4	0.04555
35	3.03E-02	1.72	0.150	2.80E-02	1 15	1.95	1 15	0.92	0.11	0.11	51.2	0.04022
37	2.27E-01	3.21	0.300	2.10E-01	1 15	3.44	1 15	0.93	0.34	0.19	298.2	0.05604
38	1.11E-01	3.54	0.200	8.36E-02	1 15	3.88	1 15	0.75	0.13	0.13	14.2	0.11653
39	5.37E-01	1.90	0.600	4.87E-01	1 15	1.94	1 16	0.91	0.45	0.55	474.9	0.00775

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	
41	5.25E-01	2.67	0.500	4.80E-01	1 15	3.03	1 15	0.91	0.38	0.38	66.3	0.01962
42	5.15E-01	2.62	0.500	4.73E-01	1 15	2.97	1 15	0.92	0.38	0.38	426.8	0.01891
43	5.08E-01	2.59	0.500	4.63E-01	1 15	2.91	1 15	0.91	0.38	0.38	367.3	0.01836
45	4.12E-01	2.59	0.450	3.40E-01	1 15	2.89	1 15	0.83	0.31	0.31	65.9	0.02122
46	3.32E-01	3.45	0.350	3.05E-01	1 15	3.91	1 15	0.92	0.26	0.26	63.9	0.05247
47	3.38E-01	3.51	0.350	2.62E-01	1 15	3.59	1 15	0.78	0.23	0.26	503.9	0.05441
49	2.52E-01	2.62	0.350	2.32E-01	1 15	2.74	1 16	0.92	0.34	0.23	251.8	0.03037
50	2.34E-01	2.43	0.350	2.16E-01	1 15	2.43	1 15	0.92	0.27	0.34	304.6	0.02618
51	8.73E-02	1.78	0.250	4.42E-02	1 15	1.78	1 15	0.51	0.13	0.13	25.3	0.02190
52	1.94E-02	1.10	0.150	1.79E-02	1 20	1.25	1 20	0.92	0.11	0.11	62.9	0.01650
55	1.14E-01	2.32	0.250	5.15E-02	1 15	2.26	1 15	0.45	0.12	0.12	11.2	0.03730
56	1.53E-01	3.11	0.250	3.28E-02	1 15	1.83	1 15	0.21	0.08	0.12	505.8	0.06692
57	1.40E-01	2.86	0.250	7.80E-03	1 15	0.87	1 15	0.06	0.04	0.08	505.8	0.05644
59	3.17E-02	1.79	0.150	1.50E-02	1 15	1.77	1 15	0.47	0.07	0.07	12.7	0.04394
60	1.69E-01	2.39	0.300	3.80E-02	1 15	1.93	1 15	0.22	0.10	0.10	6.6	0.03105
61	1.21E-01	2.46	0.250	1.07E-01	1 15	2.78	1 15	0.88	0.18	0.18	62.6	0.04197
62	8.03E-02	1.64	0.250	3.26E-02	1 15	1.55	1 15	0.41	0.11	0.11	20.8	0.01850
64	3.04E-01	2.42	0.400	2.46E-01	1 15	2.69	1 16	0.81	0.27	0.27	64.5	0.02164
66	1.32E-02	0.42	0.200	1.19E-02	1 15	0.61	1 15	0.90	0.15	0.09	0.0	0.00165
67	4.12E-01	3.28	0.400	2.38E-01	1 15	2.95	1 16	0.58	0.22	0.27	503.3	0.03982
68	1.14E-01	1.62	0.300	7.45E-02	1 15	1.72	1 15	0.65	0.18	0.18	65.2	0.01422
69	1.45E-01	2.05	0.300	1.33E-01	1 15	2.33	1 15	0.92	0.23	0.23	65.8	0.02280
70	1.64E-01	3.34	0.250	4.41E-02	1 15	2.83	1 15	0.27	0.09	0.09	3.2	0.07721
71	2.19E-02	1.24	0.150	1.94E-02	1 15	1.40	1 15	0.88	0.11	0.11	61.5	0.02107
72	2.52E-01	2.01	0.400	2.30E-01	1 15	2.20	1 16	0.91	0.42	0.22	7.5	0.01488
73	1.10E-01	1.55	0.300	6.26E-02	1 15	1.60	1 15	0.57	0.16	0.16	59.3	0.01306
74	1.53E-01	1.60	0.350	1.41E-01	1 15	1.62	0 32	0.92	0.26	0.37	113.8	0.01124
75	2.22E-01	2.30	0.350	2.03E-01	1 15	2.60	1 15	0.92	0.26	0.27	413.1	0.02342
76	2.77E-01	3.92	0.300	6.09E-02	1 15	2.78	1 15	0.22	0.10	0.11	502.1	0.08329
77	1.92E-01	2.71	0.300	4.80E-02	1 15	2.13	1 15	0.25	0.12	0.10	59.2	0.03987
78	2.36E-01	3.34	0.300	3.77E-02	1 15	1.84	1 15	0.16	0.08	0.12	220.7	0.06056
79	2.36E-01	3.34	0.300	2.34E-02	1 15	1.78	1 15	0.10	0.06	0.08	505.8	0.06050
81	2.24E-01	3.17	0.300	2.80E-03	1 10	0.44	1 10	0.01	0.02	0.06	505.8	0.05445
83	2.41E-01	3.41	0.300	7.31E-02	1 15	2.99	1 15	0.30	0.11	0.11	4.8	0.06319
86	2.59E-01	3.66	0.300	1.69E-01	1 15	3.89	1 15	0.65	0.18	0.18	200.8	0.07281
87	2.28E-01	3.22	0.300	1.54E-01	1 15	3.42	1 15	0.68	0.19	0.18	124.8	0.05638
88	1.01E-01	1.43	0.300	9.25E-02	1 15	1.61	1 15	0.91	0.27	0.19	16.4	0.01116
89	3.84E-02	0.54	0.300	3.55E-02	1 15	0.55	1 20	0.92	0.25	0.27	240.2	0.00160
92	2.77E-01	3.92	0.300	1.81E-01	1 15	3.90	1 15	0.65	0.18	0.20	350.2	0.08329
93	5.12E-02	1.63	0.200	3.50E-03	1 14	0.53	1 15	0.07	0.04	0.07	500.8	0.02476
94	2.17E+00	4.32	0.800	2.01E+00	1 15	4.29	1 15	0.93	0.88	0.61	1.9	0.02740
95	2.16E+00	4.30	0.800	1.97E+00	1 16	4.22	1 16	0.91	0.60	0.88	491.8	0.02713
96	1.79E+00	4.65	0.700	1.64E+00	1 16	5.27	1 16	0.92	0.53	0.53	64.6	0.03783
97	1.74E+00	4.53	0.700	1.60E+00	1 16	5.14	1 16	0.92	0.53	0.53	479.0	0.03602
98	1.73E+00	4.51	0.700	1.57E+00	1 16	5.07	1 16	0.90	0.52	0.53	447.0	0.03559
99	1.83E+00	4.76	0.700	1.55E+00	1 16	5.19	1 15	0.85	0.49	0.52	496.2	0.03972
100	4.17E-02	1.33	0.200	1.37E-02	1 15	1.19	1 15	0.33	0.08	0.08	10.9	0.01642
101	1.30E-01	1.84	0.300	1.20E-01	1 15	2.09	1 15	0.92	0.23	0.23	389.1	0.01833
102	1.87E+00	4.86	0.700	1.54E+00	1 16	5.39	1 3	0.82	0.48	0.49	496.8	0.04147
103	1.83E+00	4.77	0.700	1.52E+00	1 15	5.29	1 1	0.83	0.51	0.48	22.9	0.03981
105	1.53E+00	5.41	0.600	1.47E+00	1 2	6.32	1 3	0.96	0.48	0.48	30.2	0.06309
108	1.25E-01	1.76	0.300	2.50E-03	1 10	0.25	0 11	0.02	0.03	0.10	505.8	0.01688
110	1.64E+00	5.80	0.600	1.47E+00	1 2	6.48	1 2	0.90	0.44	0.48	497.3	0.07238
111	1.75E+00	6.20	0.600	1.41E+00	1 2	7.14	1 2	0.80	0.52	0.41	8.1	0.08264
112	1.75E+00	6.19	0.600	1.49E+00	1 2	7.21	1 2	0.85	0.51	0.44	489.3	0.08251
113	9.65E-01	6.07	0.450	8.40E-01	1 1	6.23	1 1	0.87	0.55	0.33	0.2	0.11632
114	9.67E-01	6.08	0.450	8.27E-01	1 15	6.68	1 2	0.85	0.32	0.46	38.5	0.11688
115	9.69E-01	6.09	0.450	8.12E-01	1 15	6.83	1 17	0.84	0.32	0.32	16.8	0.11721
116	7.57E-01	6.02	0.400	7.01E-01	1 15	6.84	1 17	0.93	0.30	0.30	37.3	0.13411
117	7.57E-01	6.03	0.400	6.81E-01	1 15	6.82	1 17	0.90	0.30	0.30	32.1	0.13428
118	7.59E-01	6.04	0.400	6.62E-01	1 15	6.81	1 15	0.87	0.29	0.29	31.2	0.13496
119	3.39E-01	4.80	0.300	1.01E-02	1 15	2.14	1 15	0.03	0.04	0.04	0.2	0.12513
122	7.64E-01	6.08	0.400	6.29E-01	1 15	6.79	1 15	0.82	0.28	0.28	13.8	0.13663
123	7.50E-01	5.97	0.400	4.04E-01	1 15	5.47	0 51	0.54	0.26	0.21	0.2	0.13171
124	7.42E-01	5.91	0.400	3.98E-01	1 15	5.40	0 52	0.54	0.21	0.26	495.9	0.12896
126	6.33E-01	5.04	0.400	3.77E-01	1 15	4.53	1 13	0.60	0.29	0.21	20.0	0.09383

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	
127	4.03E-01	3.21	0.400	3.73E-01	1 15	3.23	1 16	0.93	0.40	0.29	1.0	0.03805
128	3.91E-01	3.11	0.400	3.60E-01	1 15	3.08	1 16	0.92	0.30	0.40	499.3	0.03575
129	3.73E-01	2.97	0.400	3.44E-01	1 15	3.27	0 58	0.92	0.36	0.30	294.5	0.03261
130	1.89E-01	2.68	0.300	9.37E-02	1 15	2.59	1 3	0.50	0.15	0.26	50.5	0.03883
131	2.50E-01	3.54	0.300	5.41E-02	1 15	2.00	1 15	0.22	0.09	0.15	505.7	0.06797
132	2.48E+00	3.89	0.900	2.26E+00	1 17	4.41	1 17	0.91	0.68	0.68	63.8	0.01901
134	2.48E+00	3.90	0.900	2.25E+00	1 17	4.41	1 16	0.91	0.67	0.68	495.1	0.01907
135	2.44E+00	3.84	0.900	2.23E+00	1 16	4.10	1 16	0.91	0.76	0.67	25.4	0.01847
136	2.40E+00	3.77	0.900	2.19E+00	1 16	4.03	1 16	0.91	0.68	0.76	241.2	0.01783
137	2.37E+00	3.73	0.900	2.15E+00	1 16	4.21	1 16	0.91	0.67	0.68	393.6	0.01743
138	2.31E+00	3.63	0.900	2.10E+00	1 16	4.05	1 16	0.91	0.70	0.67	109.0	0.01654
139	2.27E+00	3.57	0.900	2.07E+00	1 16	3.98	1 16	0.91	0.67	0.70	501.6	0.01600
140	2.23E+00	3.50	0.900	2.04E+00	1 16	3.52	1 16	0.92	0.87	0.67	8.1	0.01534
141	5.60E-02	1.78	0.200	1.47E-02	1 15	1.50	1 15	0.26	0.07	0.07	4.8	0.02959
142	5.40E-01	1.40	0.700	4.94E-01	1 19	1.58	1 19	0.91	0.53	0.54	174.8	0.00345
143	5.45E-01	1.42	0.700	4.94E-01	1 19	1.60	1 18	0.91	0.52	0.53	36.8	0.00352
144	5.31E-01	1.38	0.700	4.95E-01	1 18	1.59	1 18	0.93	0.53	0.52	16.2	0.00334
145	5.41E-01	1.41	0.700	4.96E-01	1 17	1.61	1 17	0.92	0.53	0.51	111.3	0.00347
146	5.58E-01	1.45	0.700	4.95E-01	1 18	1.61	1 17	0.89	0.51	0.53	79.2	0.00369
147	5.47E-01	1.42	0.700	4.93E-01	1 17	1.59	1 16	0.90	0.52	0.53	95.3	0.00354
148	5.36E-01	1.90	0.600	4.93E-01	1 17	2.15	1 17	0.92	0.45	0.45	62.7	0.00774
149	6.79E-01	2.40	0.600	4.93E-01	1 16	2.36	1 16	0.73	0.38	0.45	497.6	0.01244
150	6.77E-01	2.39	0.600	4.93E-01	1 16	2.60	1 16	0.73	0.38	0.38	423.6	0.01235
151	7.43E-01	2.63	0.600	4.93E-01	1 16	2.70	1 16	0.66	0.36	0.38	493.1	0.01486
152	5.39E-01	1.90	0.600	4.93E-01	1 16	2.15	1 16	0.92	0.55	0.36	80.7	0.00781
153	1.07E-01	1.51	0.300	4.06E-03	1 15	0.72	1 15	0.04	0.04	0.04	0.8	0.01245
155	1.29E-01	1.82	0.300	4.09E-03	1 15	0.77	1 15	0.03	0.04	0.04	490.8	0.01806
157	5.48E-01	1.42	0.700	4.93E-01	1 19	1.72	1 19	0.90	0.54	0.44	0.2	0.00356
158	2.73E-01	3.86	0.300	1.60E-02	1 15	1.23	1 15	0.06	0.05	0.09	239.6	0.08096
159	4.05E-01	4.21	0.350	2.14E-01	1 15	4.26	1 15	0.53	0.18	0.18	10.1	0.07828
160	1.92E-01	2.71	0.300	9.29E-03	1 14	0.98	0 21	0.05	0.04	0.13	484.8	0.03985
161	2.53E-01	2.63	0.350	1.85E-01	1 15	2.55	1 15	0.73	0.31	0.18	7.0	0.03045
162	1.89E-01	1.96	0.350	1.74E-01	1 15	2.04	1 15	0.92	0.26	0.31	496.2	0.01698
163	2.54E-01	3.59	0.300	1.59E-02	1 15	2.00	1 15	0.06	0.05	0.05	0.8	0.06991
165	1.36E-01	1.41	0.350	1.24E-01	1 15	1.60	1 18	0.91	0.26	0.26	72.9	0.00877
166	1.13E-01	1.17	0.350	1.05E-01	1 19	1.34	1 20	0.93	0.27	0.26	14.8	0.00605
167	5.06E-02	1.61	0.200	1.38E-02	1 15	1.37	1 15	0.27	0.07	0.07	5.5	0.02418
168	7.46E-02	1.05	0.300	6.73E-02	1 30	1.22	1 29	0.90	0.23	0.22	0.0	0.00604
1011	1.99E+00	3.13	0.900	1.65E+00	1 17	3.50	1 17	0.83	0.63	0.63	64.7	0.01227
1012	1.66E+00	4.30	0.700	1.02E+00	1 17	4.52	1 17	0.61	0.40	0.40	47.9	0.03244
1013	1.12E+00	2.90	0.700	1.02E+00	1 16	3.14	1 17	0.91	0.84	0.40	194.2	0.01477
1014	1.12E+00	2.90	0.700	1.02E+00	1 16	2.85	1 17	0.91	0.52	0.84	495.8	0.01475
1015	1.12E+00	2.91	0.700	1.02E+00	1 16	3.29	1 16	0.91	0.52	0.52	471.7	0.01484
1017	1.11E+00	2.90	0.700	1.02E+00	1 16	3.25	1 16	0.91	0.54	0.52	394.4	0.01471
1016	4.74E-01	1.23	0.700	4.25E-01	1 21	1.40	1 19	0.90	0.52	0.52	0.0	0.00266
1018	4.55E-01	1.18	0.700	4.26E-01	1 21	1.39	1 19	0.94	0.53	0.52	0.1	0.00245
1019	4.67E-01	1.21	0.700	4.26E-01	1 20	1.38	1 19	0.91	0.53	0.53	0.0	0.00258
1020	4.64E-01	1.21	0.700	4.27E-01	1 20	1.38	1 18	0.92	0.53	0.53	0.2	0.00255
1021	4.71E-01	1.22	0.700	4.27E-01	1 20	1.38	1 18	0.91	0.52	0.53	0.0	0.00263
1022	4.80E-01	1.25	0.700	4.28E-01	1 19	1.40	1 18	0.89	0.52	0.52	14.4	0.00273
1023	4.67E-01	1.21	0.700	4.29E-01	1 19	1.40	1 17	0.92	0.52	0.52	0.0	0.00258
1024	4.71E-01	1.22	0.700	4.29E-01	1 18	1.39	1 17	0.91	0.52	0.52	32.2	0.00263
1025	4.75E-01	1.24	0.700	4.30E-01	1 18	1.40	1 16	0.91	0.52	0.52	0.1	0.00268
1026	4.74E-01	1.23	0.700	4.31E-01	1 17	1.40	1 16	0.91	0.52	0.52	47.5	0.00266
1027	4.76E-01	1.24	0.700	4.25E-01	1 22	1.39	1 20	0.89	0.52	0.52	0.0	0.00268
1028	5.82E-01	1.51	0.700	4.32E-01	1 16	1.55	1 14	0.74	0.43	0.52	64.8	0.00401
1029	4.85E-01	1.26	0.700	4.33E-01	1 16	1.56	1 16	0.89	0.51	0.43	19.8	0.00279
1030	4.73E-01	1.23	0.700	4.33E-01	1 16	1.42	1 16	0.91	0.52	0.51	48.8	0.00265
1031	4.72E-01	1.23	0.700	4.24E-01	1 22	1.38	1 21	0.90	0.52	0.53	0.0	0.00263
1032	4.64E-01	1.21	0.700	4.24E-01	1 22	1.36	1 22	0.91	0.53	0.53	64.0	0.00255
1033	4.56E-01	1.18	0.700	4.24E-01	1 23	1.55	1 23	0.93	0.53	0.41	0.0	0.00246
1034	6.69E+00	5.91	1.200	6.08E+00	1 18	6.70	1 18	0.91	0.98	0.90	62.2	0.02989
1035	9.09E-02	1.29	0.300	8.35E-02	1 15	1.46	1 15	0.92	0.23	0.23	55.8	0.00897
1036	6.76E-02	1.38	0.250	3.32E-02	1 15	1.20	0 42	0.49	0.12	0.18	84.6	0.01311
1037	9.52E-02	1.35	0.300	2.05E-02	1 15	1.07	1 15	0.21	0.09	0.09	8.7	0.00985
1038	7.26E-02	2.31	0.200	1.86E-02	1 15	1.93	1 15	0.26	0.07	0.07	3.7	0.04970

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	
1039	1.69E-01	3.44	0.250	4.65E-02	1 15	2.62	1 15	0.28	0.09	0.11	234.3	0.08198
1040	1.94E-01	3.94	0.250	7.17E-02	1 15	2.40	1 15	0.37	0.11	0.19	505.8	0.10755
1041	1.15E-01	2.34	0.250	1.05E-01	1 15	2.66	1 15	0.91	0.19	0.19	61.7	0.03800
1042	7.00E+00	6.19	1.200	3.42E+00	1 19	4.63	1 19	0.49	0.59	0.98	493.9	0.03270
1051	1.78E+00	2.80	0.900	1.61E+00	1 17	3.06	1 17	0.90	0.76	0.63	244.2	0.00986
1052	1.74E+00	2.74	0.900	1.57E+00	1 17	2.90	1 16	0.90	0.67	0.76	468.4	0.00942
1053	1.70E+00	2.67	0.900	1.52E+00	1 16	3.02	1 16	0.90	0.67	0.67	435.9	0.00895
1054	1.65E+00	2.60	0.900	1.49E+00	1 16	2.93	1 16	0.90	0.67	0.67	337.8	0.00845
1055	1.09E+00	2.16	0.800	9.94E-01	1 16	2.45	1 16	0.91	0.60	0.60	64.8	0.00687
1056	1.07E+00	2.13	0.800	9.65E-01	1 16	2.40	1 16	0.90	0.59	0.60	358.2	0.00663
1057	1.05E+00	2.08	0.800	9.36E-01	1 16	2.35	1 16	0.90	0.59	0.59	212.5	0.00634
1058	1.01E+00	2.01	0.800	9.12E-01	1 16	2.28	1 15	0.90	0.60	0.59	64.3	0.00590
1059	9.81E-01	1.95	0.800	8.87E-01	1 16	2.21	1 15	0.90	0.59	0.60	90.6	0.00559
1061	4.14E-01	2.11	0.500	3.78E-01	1 15	2.39	1 16	0.91	0.38	0.38	66.5	0.01221
1062	3.98E-01	2.03	0.500	3.66E-01	1 15	2.27	1 15	0.92	0.39	0.38	308.0	0.01126
1065	3.92E-01	3.12	0.400	3.60E-01	1 15	3.54	1 15	0.92	0.30	0.30	58.2	0.03591
1066	2.53E-01	3.59	0.300	1.27E-01	1 15	3.58	1 16	0.50	0.15	0.15	7.8	0.06978
1067	1.69E-01	2.39	0.300	1.10E-01	1 15	2.33	1 15	0.65	0.23	0.15	267.2	0.03103
1071	4.72E-01	2.40	0.500	4.33E-01	1 15	2.73	1 15	0.92	0.38	0.38	66.0	0.01587
1073	4.69E-01	2.95	0.450	4.29E-01	1 15	3.34	1 15	0.91	0.35	0.34	55.8	0.02745
1074	4.59E-01	2.88	0.450	4.23E-01	1 15	3.26	1 17	0.92	0.36	0.35	383.3	0.02629
1075	1.54E-01	1.60	0.350	1.40E-01	1 15	1.57	1 15	0.91	0.26	0.40	466.7	0.01127
1077	3.08E-01	3.21	0.350	1.70E-01	1 15	3.28	1 15	0.55	0.19	0.19	19.1	0.04540
1078	1.67E-01	1.73	0.350	1.55E-01	1 15	1.96	1 16	0.93	0.40	0.19	241.1	0.01328
1083	8.26E+00	7.30	1.200	3.29E+00	1 18	6.62	1 19	0.40	0.53	0.56	497.8	0.04553
1085	7.43E+00	6.57	1.200	3.30E+00	1 18	6.15	1 19	0.44	0.56	0.59	504.8	0.03687
1087	8.39E+00	7.42	1.200	3.19E+00	1 18	5.24	0 27	0.38	0.82	0.51	1.3	0.04704
1088	9.05E-02	1.28	0.300	3.11E-02	1 15	1.16	1 15	0.34	0.12	0.12	24.2	0.00889
1089	1.78E-01	2.51	0.300	1.49E-02	1 15	0.83	1 15	0.08	0.06	0.12	505.8	0.03427
1090	8.31E+00	7.35	1.200	3.29E+00	1 18	5.29	0 28	0.40	1.08	0.53	384.3	0.04618
1091	8.10E+00	7.16	1.200	3.17E+00	1 18	4.62	0 26	0.39	0.93	0.52	0.6	0.04386
1092	6.64E+00	5.87	1.200	3.12E+00	1 18	4.25	0 27	0.47	0.58	0.93	342.5	0.02943
1094	3.31E-01	2.64	0.400	2.92E-01	1 15	2.91	1 15	0.88	0.29	0.30	496.8	0.02567
1095	9.10E-02	1.29	0.300	4.90E-02	1 15	1.31	1 15	0.54	0.16	0.16	52.2	0.00899
1096	9.35E-02	1.32	0.300	2.46E-02	1 15	0.83	1 15	0.26	0.11	0.16	505.8	0.00949
1098	5.10E-02	0.72	0.300	6.08E-03	1 15	0.41	1 7	0.12	0.06	0.11	278.0	0.00283
1099	8.20E-02	1.67	0.250	7.57E-02	1 15	1.90	1 16	0.92	0.19	0.19	63.0	0.01931
1100	5.01E-02	1.02	0.250	4.63E-02	1 15	1.16	1 15	0.92	0.19	0.19	162.8	0.00720
1101	1.71E-02	0.97	0.150	1.57E-02	1 15	1.10	1 16	0.92	0.11	0.11	62.7	0.01276
1103	1.46E-01	2.07	0.300	1.35E-01	1 15	2.35	1 15	0.92	0.23	0.23	65.0	0.02328
1104	1.37E-01	1.94	0.300	1.26E-01	1 15	2.19	1 15	0.92	0.23	0.23	398.8	0.02034
1105	1.29E-02	0.73	0.150	9.07E-03	1 15	0.79	1 15	0.70	0.10	0.09	0.0	0.00733
1106	7.07E-02	1.00	0.300	5.41E-02	1 15	1.11	1 15	0.77	0.20	0.19	4.9	0.00543
1108	4.18E-01	2.63	0.450	3.84E-01	1 15	2.98	1 16	0.92	0.34	0.34	63.3	0.02186
1109	1.71E-01	2.43	0.300	1.19E-01	1 15	2.62	1 15	0.69	0.18	0.18	48.6	0.03194
1110	1.52E-01	2.15	0.300	8.12E-02	1 15	1.96	1 15	0.54	0.16	0.18	471.4	0.02498
1112	4.87E-02	0.69	0.300	4.48E-02	1 15	0.89	1 15	0.92	0.24	0.16	0.9	0.00257
1113	3.40E-02	0.48	0.300	1.96E-02	1 15	0.42	1 15	0.58	0.18	0.20	89.0	0.00125
1114	2.25E-02	1.27	0.150	2.07E-02	1 15	1.44	1 15	0.92	0.11	0.11	64.0	0.02209
1116	7.25E-02	1.48	0.250	2.52E-02	1 15	1.34	1 15	0.35	0.10	0.10	17.8	0.01508
1117	1.34E-01	1.90	0.300	4.61E-02	1 15	1.45	1 15	0.34	0.12	0.15	498.4	0.01953
1118	1.32E-01	1.87	0.300	6.97E-02	1 15	1.60	1 15	0.53	0.15	0.20	505.8	0.01902
1119	1.24E-01	1.76	0.300	9.74E-02	1 15	1.80	1 15	0.78	0.20	0.23	434.8	0.01675
1120	1.49E-01	2.11	0.300	1.37E-01	1 15	2.38	1 15	0.92	0.23	0.23	422.0	0.02415
1121	1.28E-01	1.81	0.300	1.18E-01	1 15	2.05	1 15	0.92	0.23	0.23	137.0	0.01781
1123	1.68E-01	2.38	0.300	1.56E-01	1 16	2.70	1 16	0.93	0.23	0.23	63.7	0.03074
1124	1.89E-01	1.96	0.350	1.73E-01	1 16	1.97	1 15	0.92	0.26	0.34	447.2	0.01704
1125	1.96E-01	2.04	0.350	1.83E-01	1 16	2.16	1 15	0.93	0.34	0.24	269.2	0.01834
1127	2.96E-01	3.07	0.350	2.39E-01	1 15	3.42	1 15	0.81	0.24	0.24	56.7	0.04169
1128	3.80E-02	0.54	0.300	3.39E-02	1 15	0.74	1 15	0.89	0.23	0.14	0.0	0.00157
1129	1.46E-01	2.06	0.300	1.53E-02	1 15	0.44	1 15	0.10	0.07	0.23	501.6	0.02309
1132	1.75E-01	2.48	0.300	8.32E-02	1 15	2.07	1 20	0.47	0.15	0.19	503.5	0.03335
1134	5.43E-02	0.77	0.300	4.87E-02	1 16	1.06	1 16	0.90	0.24	0.14	0.8	0.00320
1135	3.23E-02	0.66	0.250	2.44E-02	1 17	0.73	0 30	0.76	0.16	0.19	0.0	0.00299
1136	1.51E-01	2.13	0.300	6.33E-02	1 16	1.95	1 20	0.42	0.14	0.15	364.7	0.02466
1137	1.14E-01	1.62	0.300	1.05E-01	1 15	1.83	1 15	0.92	0.23	0.23	64.8	0.01416

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	
1138	8.43E-02	1.72	0.250	7.76E-02	1 15	1.95	1 17	0.92	0.19	0.19	61.4	0.02041
1139	4.39E-02	1.40	0.200	3.67E-02	1 16	1.56	1 16	0.84	0.14	0.14	56.8	0.01821
1140	6.77E-01	1.76	0.700	6.10E-01	1 15	1.99	1 15	0.90	0.52	0.52	45.7	0.00543
1141	6.49E-01	3.30	0.500	5.12E-01	1 15	3.66	1 15	0.79	0.34	0.33	58.8	0.02998
1142	1.34E-01	1.90	0.300	9.93E-02	1 15	1.88	1 15	0.74	0.19	0.23	498.9	0.01961
1143	5.84E-01	3.67	0.450	4.71E-01	1 16	4.09	1 16	0.81	0.31	0.31	59.2	0.04266
1144	1.33E-01	1.89	0.300	1.23E-01	1 15	2.14	1 16	0.92	0.23	0.23	61.2	0.01931
1147	1.95E-01	2.75	0.300	1.63E-01	1 15	3.08	1 15	0.84	0.21	0.21	49.8	0.04116
1148	1.71E-01	2.41	0.300	1.39E-01	1 15	2.66	1 15	0.81	0.21	0.21	324.2	0.03158
1149	5.61E-02	1.79	0.200	5.18E-02	1 15	2.03	1 15	0.92	0.15	0.15	59.9	0.02969
1153	2.28E-02	0.46	0.250	1.56E-02	1 16	0.45	1 15	0.68	0.16	0.18	0.0	0.00150
1154	4.21E-02	0.60	0.300	3.80E-02	1 15	0.84	1 15	0.90	0.22	0.15	0.0	0.00192
1158	1.66E-01	2.35	0.300	1.54E-01	1 15	2.67	1 15	0.92	0.23	0.23	64.0	0.03007
1159	1.58E-01	2.23	0.300	1.24E-01	1 15	2.30	1 15	0.79	0.20	0.23	493.5	0.02695
1160	9.17E-02	1.30	0.300	8.37E-02	1 16	1.47	1 16	0.91	0.25	0.20	84.7	0.00913
1162	5.51E-01	4.38	0.400	4.54E-01	1 15	4.39	1 15	0.82	0.36	0.26	234.8	0.07102
1163	6.14E-01	4.89	0.400	4.59E-01	1 15	5.36	1 15	0.75	0.26	0.26	15.2	0.08829
1164	3.69E-01	2.94	0.400	3.40E-01	1 15	3.08	1 15	0.92	0.30	0.36	117.9	0.03186
1165	7.90E-02	1.61	0.250	2.15E-02	1 15	1.25	0 53	0.27	0.09	0.15	46.0	0.01792
1166	1.01E-01	1.43	0.300	9.32E-02	1 15	1.63	1 15	0.92	0.23	0.23	65.8	0.01115
1168	5.53E-02	0.78	0.300	4.94E-02	1 15	0.88	1 15	0.89	0.22	0.23	248.5	0.00332
1169	1.17E-01	1.66	0.300	4.55E-02	1 15	1.54	1 6	0.39	0.13	0.17	39.8	0.01499
1172	7.66E-02	1.08	0.300	6.17E-02	1 15	1.22	1 15	0.81	0.21	0.19	0.0	0.00637
1173	3.02E-01	3.14	0.350	2.78E-01	1 15	3.56	1 15	0.92	0.26	0.26	52.8	0.04350
1174	3.04E-01	3.16	0.350	2.54E-01	1 15	3.39	1 15	0.83	0.24	0.26	500.7	0.04423
1175	2.30E-01	2.39	0.350	2.12E-01	1 15	2.64	1 15	0.92	0.30	0.24	18.4	0.02530
1176	1.57E-01	1.63	0.350	1.44E-01	1 15	1.73	1 15	0.92	0.26	0.30	495.8	0.01174
1177	8.70E-02	1.23	0.300	7.99E-02	1 15	1.40	1 15	0.92	0.23	0.22	30.2	0.00822
1178	3.40E-02	0.69	0.250	3.09E-02	1 15	0.83	1 15	0.91	0.21	0.14	0.0	0.00331
1179	1.41E-02	0.45	0.200	1.01E-02	0 55	0.70	0 55	0.71	0.14	0.15	0.0	0.00188
1182	5.69E-02	0.80	0.300	4.56E-03	1 14	0.21	0 6	0.08	0.17	0.23	353.8	0.00351
1183	1.63E-01	2.30	0.300	1.87E-02	1 15	0.93	1 20	0.11	0.07	0.13	505.7	0.02871
1186	1.74E-01	2.46	0.300	7.24E-02	1 15	2.02	1 15	0.42	0.14	0.17	505.8	0.03284
1187	1.76E-01	2.49	0.300	5.58E-02	1 15	1.99	1 15	0.32	0.12	0.14	466.8	0.03358
1188	3.02E-02	0.43	0.300	2.34E-02	1 15	0.63	1 15	0.77	0.20	0.12	0.2	0.00099
1189	1.32E-01	1.87	0.300	8.01E-02	1 15	1.96	1 15	0.61	0.17	0.17	27.2	0.01891
1190	7.16E-02	1.46	0.250	6.60E-02	1 15	1.65	1 15	0.92	0.19	0.19	289.2	0.01471
1191	8.45E-02	1.72	0.250	7.78E-02	1 15	1.95	1 15	0.92	0.19	0.19	59.1	0.02050
1192	2.41E-01	2.50	0.350	2.22E-01	1 16	2.84	1 16	0.92	0.26	0.26	61.8	0.02768
1193	2.63E-02	1.49	0.150	2.42E-02	1 16	1.69	1 17	0.92	0.11	0.11	55.3	0.03019
1194	2.69E-01	2.14	0.400	2.37E-01	1 15	2.41	1 16	0.88	0.29	0.29	63.7	0.01693
1195	5.88E-02	1.87	0.200	5.42E-02	1 15	2.12	1 16	0.92	0.15	0.15	49.5	0.03262
1196	1.71E-01	1.77	0.350	1.56E-01	1 15	2.00	1 15	0.91	0.26	0.27	428.6	0.01390
1197	1.91E-01	1.99	0.350	1.77E-01	1 15	2.26	1 16	0.92	0.27	0.27	64.2	0.01747
1198	2.23E-01	1.77	0.400	2.03E-01	1 15	2.00	1 16	0.91	0.30	0.30	388.4	0.01165
1199	2.57E-01	2.04	0.400	2.36E-01	1 16	2.32	1 16	0.92	0.30	0.30	404.7	0.01542
1200	2.98E-01	2.37	0.400	2.74E-01	1 16	2.69	1 16	0.92	0.30	0.30	64.9	0.02085
1201	3.42E-01	2.15	0.450	3.12E-01	1 16	2.13	1 16	0.91	0.34	0.44	429.5	0.01460
1202	3.80E-01	2.39	0.450	3.49E-01	1 16	2.54	1 15	0.92	0.44	0.28	16.7	0.01806
1203	5.32E-01	3.34	0.450	3.84E-01	1 16	3.57	1 16	0.72	0.28	0.29	504.7	0.03532
1204	1.40E-02	0.45	0.200	9.09E-03	1 15	0.57	1 15	0.65	0.12	0.08	0.0	0.00185
1205	5.29E-01	3.33	0.450	4.01E-01	1 15	3.11	1 33	0.76	0.29	0.47	505.6	0.03495
1206	1.57E-01	2.22	0.300	7.10E-02	1 15	2.01	1 15	0.45	0.21	0.09	279.8	0.02672
1207	2.96E-02	0.94	0.200	1.39E-02	1 15	0.89	0 58	0.47	0.10	0.11	23.8	0.00826
1208	4.88E-01	6.90	0.300	8.98E-02	1 15	5.26	1 15	0.18	0.09	0.09	233.3	0.25839
1210	9.93E-02	1.41	0.300	1.27E-02	1 15	0.60	2 0	0.13	0.07	0.16	104.2	0.01071
1211	8.47E-01	5.33	0.450	4.60E-01	1 16	4.49	0 35	0.54	0.34	0.24	0.2	0.08972
1218	5.58E-01	3.51	0.450	4.47E-01	1 15	3.67	1 15	0.80	0.30	0.34	305.5	0.03893
1249	1.11E+00	2.89	0.700	1.01E+00	1 16	3.22	1 17	0.91	0.52	0.54	480.9	0.01460
1251	1.09E+00	2.84	0.700	9.94E-01	1 16	3.22	1 15	0.91	0.52	0.52	383.3	0.01418
1255	3.01E-01	2.39	0.400	2.72E-01	1 16	2.52	1 15	0.90	0.38	0.26	178.0	0.02120
1256	2.67E-01	2.12	0.400	2.45E-01	1 15	2.13	1 15	0.92	0.30	0.38	435.2	0.01663
1258	2.33E-01	2.42	0.350	2.14E-01	1 16	2.74	1 16	0.92	0.26	0.26	62.9	0.02583
1259	2.10E-01	2.18	0.350	1.93E-01	1 16	2.47	1 16	0.92	0.26	0.26	271.0	0.02105
1260	1.72E-01	1.79	0.350	1.57E-01	1 16	2.03	1 18	0.91	0.26	0.26	306.2	0.01420
1261	1.50E-01	1.56	0.350	1.39E-01	1 16	1.77	1 15	0.92	0.27	0.26	151.8	0.01080

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	
1262	1.17E-01	1.66	0.300	1.07E-01	1 16	1.88	1 16	0.91	0.23	0.23	64.5	0.01490
1263	7.48E-02	1.06	0.300	6.81E-02	1 16	1.20	1 15	0.91	0.22	0.23	132.5	0.00607
1264	3.92E-01	3.12	0.400	2.90E-01	1 16	3.41	1 16	0.74	0.26	0.26	54.9	0.03589
1265	3.05E-02	0.43	0.300	2.40E-02	1 17	0.44	1 15	0.79	0.21	0.22	5.1	0.00101
2268	4.86E-02	0.99	0.250	4.43E-02	1 15	1.14	1 15	0.91	0.20	0.17	0.0	0.00680
2273	4.01E-02	0.57	0.300	3.69E-02	1 15	0.79	1 15	0.92	0.22	0.16	134.2	0.00174
1274	3.11E+00	2.75	1.200	2.82E+00	1 18	3.11	1 18	0.91	0.89	0.90	332.8	0.00647
1275	3.11E+00	2.75	1.200	2.81E+00	1 18	3.11	1 18	0.90	0.89	0.89	178.2	0.00646
1277	3.11E+00	2.75	1.200	2.79E+00	1 17	3.10	1 17	0.90	0.89	0.89	192.2	0.00646
1278	3.04E+00	2.69	1.200	2.77E+00	1 17	3.04	1 17	0.91	0.92	0.89	33.2	0.00619
1279	3.10E+00	2.74	1.200	2.77E+00	1 17	3.04	1 17	0.89	0.88	0.92	194.8	0.00643
1280	3.03E+00	2.68	1.200	2.76E+00	1 17	3.03	1 17	0.91	0.92	0.88	0.0	0.00613
1281	3.03E+00	3.86	1.000	2.75E+00	1 17	4.37	1 17	0.91	0.75	0.75	63.5	0.01623
1282	3.11E+00	2.75	1.200	2.82E+00	1 18	3.12	1 18	0.91	0.90	0.90	61.3	0.00648
1284	5.30E+00	4.68	1.200	2.94E+00	1 18	4.80	1 18	0.56	0.64	0.64	59.0	0.01874
1286	4.33E+00	3.83	1.200	2.94E+00	1 18	3.44	1 18	0.68	1.06	0.64	211.8	0.01253
4000	1.02E-01	1.45	0.300	5.49E-02	1 16	1.47	1 16	0.54	0.16	0.16	60.9	0.01136
4001	1.39E-01	1.97	0.300	1.28E-01	1 17	2.24	1 18	0.92	0.23	0.23	64.0	0.02110
3006	2.21E-01	3.12	0.300	1.69E-01	1 15	2.70	1 15	0.77	0.20	0.41	498.0	0.05293
3007	3.39E-01	4.80	0.300	2.38E-01	1 15	5.19	1 15	0.70	0.19	0.19	15.3	0.12503
3012	3.11E-01	1.95	0.450	2.84E-01	1 15	2.21	1 15	0.91	0.34	0.34	66.6	0.01207
3014	2.20E+00	3.46	0.900	2.01E+00	1 15	3.47	1 17	0.92	0.68	0.87	494.0	0.01497
3051	4.73E-01	2.97	0.450	4.33E-01	1 15	3.13	0 48	0.92	0.47	0.30	217.0	0.02791
3052	5.74E-02	0.81	0.300	5.28E-02	1 15	0.95	1 15	0.92	0.23	0.21	303.2	0.00358
3053	2.55E-02	1.44	0.150	2.36E-02	1 15	1.64	1 15	0.92	0.11	0.11	64.3	0.02852
3056	2.10E-02	1.19	0.150	1.25E-02	1 15	1.24	1 15	0.59	0.08	0.08	35.8	0.01931
3059	1.38E-01	1.95	0.300	9.86E-02	1 15	1.88	1 15	0.71	0.19	0.23	355.7	0.02070
5000	7.15E+00	6.32	1.200	6.49E+00	1 18	6.19	1 18	0.91	0.90	1.20	495.5	0.03414

Lebenslauf

Zur Person

Name: Iris V. Domínguez Talavera
Geburtsdatum: 02.06.1967
Geburtsort: Lima, Peru

Schulbildung

1973 – 1976 C.E. 6011 – G.U.E. J.A. Dammert, Lima, Peru
1977 – 1985 Deutsche Schule Alexander von Humboldt, Lima, Peru
Abschluss: Deutsches Abitur

Ausbildung und Berufserfahrung

10.1986 – 05.1994 Studium des Bauingenieurwesens,
Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Peru
Abschluss: *Título de Ingeniero Civil*

10.1994 – 03.1998 DAAD (Deutscher Akademischer Austauschdienst)-Stipendiatin

11.1994 – 02.1995 Mitarbeit am Arbeitskreis „Bauschuttrecycling“,
Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung,
Universität Karlsruhe

03. – 09.1995 Mitarbeit an Untersuchungen an hydraulischen Modellen im Flusslabor,
Institut für Wasserwirtschaft u. Kulturtechnik, Universität Karlsruhe

04.1995 – 04.1996 Aufbaustudium mit Schwerpunkt auf Wasserbau und Hydromechanik,
Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften,
Universität Karlsruhe

07.1996 – 02.1997 Mitarbeit am „Programm zur Wasserkraftentwicklung in Pakistan“,
Institut für Wasserwirtschaft u. Kulturtechnik, Universität Karlsruhe

03.1997 – 06.1997 Mitarbeit an der Konzeption des beim DVWK
(Deutscher Verband für Wasserwirtschaft u. Kulturbau)
einzurichtenden Arbeitskreises „Hochwasserhydraulik“,
Institut für Wasserwirtschaft u. Kulturtechnik, Universität Karlsruhe

12.1997 Kurs „Kanalnetzberechnung in der Stadtentwässerung“
der Kursserie „Mikrocomputer in der Stadtentwässerung“,
ITWH (Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie), Hannover

04.1998 – 06.1999 Rektoratsstipendiatin, Universität Karlsruhe

02. – 11.1999 Durchführung von Simulationsrechnungen für ein Sanierungskonzept
für die Kanalisation des Stadtteils Fitten, Kreisstadt Merzig,
im Auftrag von AQUA-PC, Saarbrücken,
Institut für Wasserwirtschaft u. Kulturtechnik, Universität Karlsruhe

07.1999 – 06.2002 Evangelisches Studienwerk e.V. Villigst-Stipendiatin

04.1996 – 11.2002 Doktorandin,
Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften,
Universität Karlsruhe

*Bisher erschienene Mitteilungen aus dem
Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik*

Bisher erschienene Mitteilungen aus dem Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik

- Heft 154/1968* *Ein Beitrag zur Erforschung von örtlichen Auskolkungen hinter geneigten Befestigungsstrecken in Abhängigkeit der Zeit; E. Mosonyi, B. Schoppmann*
Institutsberichte über die Modellversuche seit 1962
Institutsberichte über die Exkursionen des Lehrstuhls für Wasserbau und Wasserwirtschaft seit 1965; E. Mosonyi, B. Schoppmann
- Heft 155/1969* *Kolkbildung in feinen oder leichten Sohlmaterialien bei strömendem Abfluß; J.W. Dietz*
- Heft 156/1969* *Widerstandskräfte und Energiedissipation bei Verteilerklötzen im Wechselsprung; R. Muser*
Schwebstoffführung feinsandiger Wasserläufe; St. Bruk
- Heft 157/1969* ° *Widerstand schräg angeströmter Rechengitter; J. Zimmermann*
Untersuchungen zur Durchströmung des Kraghammer Sattels an der Biggetalsperre nach neuentwickelten Methoden der Felshydraulik; W. Wittke, Cl. Louis
- Heft 158/1970* ° *Hydrodynamik der nichtstationären Dränung; G. Karadi, J. Gyuk, R.A. Williams*
An Experimental Study of Thin-Sheet Flow over Inclined Surfaces; O.N. Wakhlu
Schiffsträgheitskräfte als Indikator für die Güte von Schleusenfüllsystemen; E. Mosonyi, R. Muser
Schwall- und Sunkerscheinungen aus Schleusenbetrieb in Schiffahrtskanälen; Maßnahmen zur Sicherung des Schiffahrtsbetriebes; R. Muser, G. Meder
Beitrag zur Berechnung von Schleusenfüllungen; H.H. Bernhart
Spitzenmaßstab und L-O-Integrator, ein Gerät zur genauen Messung des Wasserspiegels in Modellversuchen; W. Götz, K. Schwedes
Turbulenzmessungen in Wasser mit Heißfilmanemometer; B. Schoppmann
Messung von Größe und Richtung der mittleren Geschwindigkeit in einem zweidimensionalen Strömungsfeld; K. Schwedes
Parameterfreie statistische Methoden zur Analyse von Datenreihen; H. Eggers
Dreidimensionale, anisotrope Kluftwasserströmung; W. Wittke
- Heft 159/1972* ° *Ein Verfahren zur Richtungs- und Betragsbestimmung von Vektoren mittlerer Strömungsgeschwindigkeit einer turbulenten Strömung; K. Schwedes, H. Weiher*
Hydraulische Stabilität bei Wasserkraftanlagen; H. Berge
Land Reclamation Projects as Essential Elements of Economic Development Programmes; G.E. Papadopoulos
Institutsberichte über die Modellversuche und Forschungsarbeiten seit 1969

Institutsberichte über die Exkursionen des Lehrstuhls für Wasserbau und Wasserwirtschaft seit 1969

- Heft 160/1973* *Das Widerstands-Kapazitätsnetzwerk zur Simulation instationärer Grundwasserströmungen; A. Widmer*
Der elektrolytische Trog zur Lösung stationärer dreidimensionaler Grundwasserströmungsfälle; U. Stentzel, K. Schwedes
Standfiltermodelle mit und ohne Überströmung zur Untersuchung von Selbstdichtungsmechanismen an Gewässersohlen; S.G. van Riesen
Anhang: Veröffentlichungen, Vorträge, Dissertationen der Abteilung für Kulturtechnische Untersuchungen (Lehrgebiet Landwirtschaftlicher Wasserbau) auf dem Gebiet der Grundwasserforschung
- Heft 161/1974* *Strömungs- und Transportmechanismen einer fortschreitenden Auskolkung; B. Schoppmann*
Water Resources Development in the U.A.R.; F. Nicola
- Heft 162/1974 °* *Dünnschichtabfluß auf stark geneigter Ebene; G. Karantounias*
Die Entwicklung der Sparschleusen des Main-Donau-Verbindungskanals mit besonderer Betrachtung der Sparschleuse Leerstetten; R. Muser
Neuere Methoden für die Analyse hydrologischer Systeme; G.M. Karadi
Die Impedanz eines axial oszillierenden Sphäroids in einem nicht zusammendrückbaren Medium; R.Y.S. Lai, G.M. Karadi
- Heft 163/1975 °* *Sekundärströmungen in aufeinanderfolgenden Gerinnekrümmungen; W. Götz*
Darstellung von skalaren Zustandsfeldern in beliebigen Kontrollräumen und ihre Nutzungsanwendung in der Hydrostatik mit Hilfe eines neuen Verfahrens der Vektoranalysis; M. Spielbauer
Die Berechnung der Hochwasserwahrscheinlichkeit für deutsche Flußgebiete; D. Koberg, H. Eggers, W. Buck
Drei Jahrzehnte operationelle Hydrologie; E. Walser
- Heft 164/1976* *Einfluß der Schließzeit auf die Druckstoßtransmission durch Wasserschlässer; H.H. Bernhart*
Verstärkung und Erhöhung von Betonstaumauern; E. Vallarino
- Heft 165/1976* *Die Auswahl des Bemessungshochwassers als ein Entscheidungsproblem unter Risiko und Ungewißheit; W. Buck*
- Heft 166/1977* *Einfluß von Sickerströmungen auf den Geschiebetransport; K.E. Wedemann*
- Heft 167/1979* *Der Einfluß seltener Ereignisse bei der Bestimmung der Hochwasserwahrscheinlichkeit; H. Eggers*
Statistisch erzeugte Serien von Hochwasserwellen; S. Weingärtner
- Heft 168/1982* *Strömungscharakteristiken in einem Kanal mit 180°-Krümmungen; W. Siebert*

- Bestimmung des Bemessungshochwassers mit Hilfe der Clusteranalyse; W. Kiefer*
- Heft 169/1982 Entwurfskriterien zur Schleusenplanung; H.H. Bernhart*
- Heft 170/1984 Druckerhöhungen durch instationäre Vorgänge in Schiffsschleusen mit großen Stufenhöhen; P.M. Schmelzle*
- Heft 171/1984 Beitrag zur Hydromechanik von Schwall- und Sunkwellen; N. Göbel*
- Heft 172/1985 Abschiedskolloquium zu Ehren von Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.rer.techn., Dr.sc.h.c., Dr.-Ing. E.h., Dr.sc.h.c., Dr.sc.h.c. E. Mosonyi*
- Heft 173/1986 ° Vor- und Nachteile des naturnahen Gewässerlaufes im Vergleich zu kanalisierten Fließgewässern; H. Willy*
- Heft 174/1986 Naturnahe Umgestaltung ausgebauter Fließgewässer. Beiträge zum Wasserbaulichen Kolloquium am 14.02.1986 in Karlsruhe*
- Heft 175/1986 ° Naturnahe Umgestaltung ausgebauter Fließgewässer Projektstudie; K. Kern, I. Nadolny*
- Heft 176/1987 ° Der Einfluß von Querströmungen auf ein Schiff bei beschränkten Fahrwassertiefen; F. Bakowies*
- Heft 177/1988 Zur Bemessung von Geschiebeabzügen; G.M. Kley*
- Heft 178/1988 Hydraulik der kontinuierlichen und intermittierenden Furchenbewässerung: ein hydrodynamisches Modell; M. Awwad*
- Heft 179/1990 Sturzwasserbewässerung. Bewässerung mit Niederschlagswasser ohne Zwischenspeicherung im Sahel; W. Klemm*
- Heft 180/1991 Beiträge zur naturnahen Umgestaltung von Fließgewässern*
- Heft 181/1991 ° Naturgemäße Bauweisen von Sohlenbauwerken und Fischaufstiegen zur Vernetzung der Fließgewässer; R.-J. Gebler*
- Heft 182/1991 Untersuchungen zum Stabilitätsverhalten von Gerinnesohlen; A. Dittrich, M. Rosport, O. Badde*
- Heft 183/1993 Der Einfluß der Belüftung auf die Kavitationserosion; N. Eisenhauer*
- Heft 184/1993 Nicht als Institutsmitteilung erschienen, als Buch erhältlich beim Springer Verlag: Grundlagen naturnaher Gewässergestaltung. Geomorphologische Entwicklung von Fließgewässern; K. Kern*
- Heft 185/1993 Ausbauoptimierung dezentraler Wasserkraftsysteme; H. Hildebrand*
- Heft 186/1994 Turbulente, abgelöste Zweischichtenströmung über Sohlschwellen in einem offenen Rechteckgerinne; U. Kertzsch*

- Heft 187/1994* *Untersuchung des Niederschlags- und Abflußgeschehens im westafrikanischen Sahel. Abschätzung des Wasserdargebots aus kleinen Einzugsgebieten mittels stochastischer Methoden unter Verwendung von Satellitenbilddaten; W. Tauer*
- Heft 188/1994* *Bedarfsprognosen als Basis der Steuerungsoptimierung von Wasserversorgungssystemen; S. Ates*
- Heft 189/1994* *Morphologie und Hydrologie naturnaher Flachlandbäche unter gewässertypologischen Gesichtspunkten - Gewässermorphologische und hydrologische Grundlagen für naturgemäßen Wasserbau und ökologische Gewässerentwicklung; I. Nadolny*
- Heft 190/1994* *Ein Erosionsmodell mit räumlich und zeitlich veränderlicher Rillenmorphologie; M. Schramm*
- Heft 191/1995* *Oberflächenabfluß und Bodenerosion in Kleineinzugsgebieten mit Mergelböden unter einem semiariden mediterranen Klima; D. Gomer*
- Heft 192/1995* *Typologische und morphologische Untersuchungen an Bergbächen im Buntsandstein-Odenwald; G. Humborg*
- Heft 193/1997* *Die Oberrheinkorrektion in Baden - Zur Umweltgeschichte des 19. Jahrhunderts; T. Löbert*
- Heft 194/1997* *Erosionsprozesse auf Lößböden: Experimente und Modellierung; K. Gerlinger*
- Heft 195/1997* *Synthese von biologischer und wasserbaulicher Analyse zur Bewertung von renaturierten Fließgewässern der Oberrheinebene; S. Kiene*
- Heft 196/1997* *Fließwiderstand und Sohlstabilität steiler Fließgewässer unter Berücksichtigung gebirgsbachtypischer Sohlstrukturen; M. Rosport*
- Heft 197/1997* *Ein Finite-Punkte-Verfahren für stationäre zweidimensionale Strömungen mit freier Oberfläche; C.J. Du*
- Heft 198/1998* *Wechselwirkung Morphologie/Strömung naturnaher Fliessgewässer; A. Dittrich*
- Heft 199/1999* *Entwicklung naturnaher Gewässerstrukturen - Grundlagen, Leitbilder, Planung; J. Scherle*
- Heft 200/1999* *Zwei-Schichtenströmungen über Sohlenschwellen bei intern überkritischer Strömung; Y. Wang*
Hydraulic Design Considerations for Low- and High-Head Gates; E. Naudascher
- Heft 201/1999* *Numerische Simulation von Staustufenketten mit automatisiertem Betrieb; S. Theobald*

- Heft 202/1999 Der Einfluß von kurzen Gehölzstreifen auf den Hochwasserabfluß in Flüssen mit gegliedertem Querschnitt; K. Becker*
- Heft 203/1999 Typisierungskonzept zur Festlegung einer ökologisch begründeten Mindestwasser menge; M. Scherer*
- Heft 204/1999 Inseln und deren Widerstandsverhalten in Fließgewässern; A. Maryono*
- Heft 205/1999 Boden- und Wasserschutz in landwirtschaftlich genutzten Gebieten der Mata Atlântica Brasiliens; M. Kunzmann*
- Heft 206/2000 Nutzung von Landsat Thematic Mapper Daten zur Ermittlung hydrologischer Parameter; S. Belz*
- Heft 207/2000 Untersuchung der Rauheitsstruktur zur Bestimmung des Fließwiderstandes in Gebirgsbächen unter Klarwasserabfluß; J. Aberle*
- Heft 208/2000° Three Dimensional Computation of Turbulent Flow in Meandering Channels; V. T. Nguyen*
- Heft 209/2001 Sedimenttransportprozesse im Himalaya-Karakorum und ihre Bedeutung für Wasserkraftanlagen; S. Palt*
- Heft 210/2002 Die Identifikation hydrologischer Prozesse im Einzugsgebiet des Dürreychbaches (Nordschwarzwald); M. Casper*
- Heft 211/2001 Einfluß von Regelungsbauwerken auf die Wasserspiegellagen in Flüssen; F. Ritzert*
- Heft 212/2001 Konzept für einen ganzheitlichen Gewässerschutz; W. Hauck*
- Heft 213/2002 A Hydrodynamic-Numerical Model of the River Rhine; P. T. Minh Thu*
- Heft 214/2002 Zur hydraulischen Systemanalyse von Wasserversorgungsnetzen; J. Deuerlein*
- Heft 215/2002 Feststofftransport und Geschwindigkeitsverteilung in Raugerinnen; K. Koll*
- Heft 216/2002 Zur hydraulischen Systemanalyse von Wasserversorgungsnetzen; A. Celan*
- Heft 217/2002 Deutsch-Russisches Wörterbuch für Wasserwirtschaft; R. Krohmer, I.S. Rumjanzev*
- Heft 218/2002 Entwurfsoptimierung städtischer Abwasserentsorgungsnetze; I. V. Domínguez Talavera*

*Bestellungen an: Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik
Bibliothek
Universität Karlsruhe
Kaiserstr. 12
D-76128 Karlsruhe
Tel.: (0721) 608 6389
Fax: (0721) 60 60 46
e-mail: raskob@iwk.uka.de*

° vergriffen