

Universität der Bundeswehr München
Institut für Wasserwesen
Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik

Mitteilungen
Heft 114 / 2013

**Vergleich hydrologischer und hydrodynamischer
Kanalnetzrechnungen und Konsequenzen für die
praktische Anwendung**

Dr.-Ing. Volker Schardt

München 2013

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar

Mitteilungen / Institut für Wasserwesen; Heft 114

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Disse
Wasserwirtschaft und Ressourcenschutz
Univ.-Prof. Dr.-Ing. F. Wolfgang Günthert
Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Malcherek
Hydromechanik und Wasserbau

Institut für Wasserwesen
Universität der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg
Tel: +49 (0)89/6004-3876 (Prof. Günthert)
Fax: +49 (0)89/6004-2156
<http://www.unibw.de/ifw/swa>

Satz: Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München
85577 Neubiberg

Copyright: Shaker Verlag, Aachen 2013
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany

ISBN 978-3-8440-1208-8

Shaker Verlag GmbH * Postfach 101818 * 52018 Aachen
Telefon : 02407 / 9596-0 * Telefax 02407 / 9596-9
Internet: www.shaker.de * E-Mail: info@shaker.de

V o r w o r t

Entwässerungssysteme dienen der Sammlung von Abwasser und Weiterleitung zu einer Behandlung. Aus ökonomischen und ökologischen Gründen werden in den Systemen Sonderbauwerke zum Rückhalt und Speicherung sowie Behandlung von Regen- und Mischwasser eingefügt. Damit können einerseits die erforderlichen Durchmesser der Abwasserkanäle kleiner ausgelegt werden und andererseits werden geringere Mengen unbehandelten Abwassers in die Gewässer abgeschlagen. Um diese komplexen Systeme aus Abwasserkanälen, Rückhaltebecken, Überlauf- und Durchlaufbecken berechnen zu können, werden mathematische Modelle eingesetzt. Diese Modelle werden unterschieden in hydrologische Modelle, die mit vereinfachten Berechnungsansätzen einerseits in der Lage sind für Langzeitsimulationen lange Niederschlagszeitreihen schnell zu verarbeiten und andererseits in hydrodynamische Modelle, bei denen der Abflusstransport im Netz, z.B. für den Nachweis der Überstauhäufigkeit, aufgrund physikalischer Prozesse ermittelt wird. In der Praxis werden beide Modelle angewandt.

Daher war es Ziel der Dissertation von Herrn Schaardt einen systematischen Vergleich der Ergebnisse eines hydrologischen Modells mit denen eines hydrodynamischen Modells zu führen. Dabei sollen die Ergebnisse des hydrodynamischen Modells als Bezugsgröße dienen, da einerseits für die verfügbaren Kanalnetze keine Niederschlags-Abfluss-Messungen vorliegen und andererseits diese Ergebnisse aufgrund der Ermittlung der hydraulischen Gegebenheiten im Netz als realitätsnah angesehen werden. Für die Untersuchungen wurden tatsächlich existierende Netze mit unterschiedlicher Netzcharakteristik herangezogen.

Mit der Dissertation will Herr Schaardt folgende offene Fragestellungen klären:

- Welche Parameter sind für die Anwendung hydrologischer Modelle zu bestimmen?
- Welche Möglichkeiten bestehen die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse zu verbessern und welche Genauigkeit ist zu erwarten?
- Wieso treten Unterschiede in den Berechnungsergebnissen auf, für welche Fälle ist die Verwendung eines hydrologischen Modells sinnvoll und wann ist ein detailliertes hydrodynamisches Kanalnetzmodell erforderlich?

Der große Erfahrungsschatz von Herrn Schaardt aus der langjährigen Erfahrung in der Anwendung der Modelle, gepaart mit der großen Anzahl ausgewerteter, berechneter realer Netze, stellt den hohen Wert der vorliegenden Arbeit dar. Die

systematischen Untersuchungen verschiedener Randbedingungen und Einflüsse auf die Transportvorgänge und Ergebnisse der beiden Modellberechnungen verstärkt den Eindruck für die Notwendigkeit, künftig vertiefte Berechnungen anzustellen, um auch der Realität angepasste Ergebnisse zu erzielen.

Damit können auch erhebliche Einsparungen, bzw. verbesserte Entlastungen unserer Gewässer erreicht werden. Herr Schardt gibt ausgehend von detaillierten Untersuchungen zur Anpassung und Verbesserung durch eigene Programmierung des Modells konkrete Hilfestellungen, um künftig verbesserte Ergebnisse zu erreichen. So fordert er die Modellentwickler auf, weitere Möglichkeiten zur Modellanpassung zu schaffen, wie z. B. durch die Möglichkeit, die Parameter des Transportprozesses verändern zu können. Er grenzt die Eignung der beiden Modelle für die jeweilige Aufgabenstellung klar ab, so dass der Anwender leicht entscheiden kann, für welchen Einsatz welches Modell geeignet ist. In jedem Fall ist erforderlich, dass das hydrologische Modell durch eine hydrodynamische Vergleichsberechnung zu verifizieren ist. Allerdings wird auch für den Einsatz hydrodynamischer Modelle grundsätzlich eine Modell Verifizierung und Plausibilitätsprüfung gefordert.

München, im Februar 2013

Univ. Prof. Dr.-Ing. F. W. Günthert

Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen

Thema der Dissertation : Vergleich hydrologischer und hydrodynamischer
Kanalnetzrechnungen und Konsequenzen für die
praktische Anwendung

Verfasser: Volker Schaardt

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schwarz
Universität der Bundeswehr München
Institut für Baubetrieb

1. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. F. Wolfgang Günthert
Universität der Bundeswehr München
Institut für Wasserwesen
Professur für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik

2. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Theo G. Schmitt
Technische Universität Kaiserslautern
Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik

Tag der Prüfung: 05.12.2011

Mit der Promotion erlangter
akademischer Grad: Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei Herrn Univ.-Professor Dr.-Ing. F.W. Günthert bedanken, dass er mir die Gelegenheit gegeben hat, meine Erfahrungen in Form einer wissenschaftlichen Arbeit zu Papier bringen zu können. Darüber hinaus möchte ich ihm für die Unterstützung und die zahlreichen Anregungen danken.

Herrn Univ.-Professor Dr.-Ing. T. Schmitt danke ich dafür, dass er sich bereit erklärt hat, als Koreferent zur Verfügung zu stehen und sich die Zeit für ausführliche inhaltliche Diskussionen genommen hat.

Den Mitarbeitern des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität der Bundeswehr danke ich für die zahlreichen fruchtbaren Diskussionen und Anregungen für meine Arbeit.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meiner Familie, ohne deren Hilfe und Verständnis das Zustandekommen dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre und die mich stets nach Kräften unterstützt haben.

Kurzfassung

Hydrologische Modelle verwenden zur Abflussermittlung Übertragungsfunktionen und sind auf Grund ihres einfachen Aufbaus in der Lage, auch langjährige Niederschlagsreihen schnell zu verarbeiten. Eine Quantifizierung der Abweichungen zu Berechnungsergebnissen, die mit physikalisch basierten Berechnungsverfahren erzielt wurden, ist bisher nur in Einzelfällen erfolgt.

Daher wurde ein systematischer Vergleich der Ergebnisse der Bemessung von Regenrückhalte- und Regenüberlaufbecken, die mit hydrologischen und hydrodynamischen Kanalnetzmodellen erzielt wurden, durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Berechnungsergebnisse zum Teil sehr starke Abweichungen bis über 30 Prozent aufwiesen. Eine wesentliche Ursache für die deutlichen Abweichungen ist, dass hydrologische Modelle ohne Anpassung an die hydraulischen Gegebenheiten des Kanalnetzes das Abflussgeschehen besonders bei Starkregenereignissen nur unzureichend abbilden können.

Die Berücksichtigung der hydraulischen Leistungsfähigkeit des Kanalnetzes in hydrologischen Modellen führte zu einer deutlichen Verbesserung der Berechnungsergebnisse. In ausgedehnten Netzen traten aber nach wie vor erhebliche Unterschiede auf. Ursache dafür ist, dass die Berechnung der Abflusstransformation Schwächen aufweist. Eine Verbesserung der Berechnungsgenauigkeit ist mit den auf dem Markt verfügbaren hydrologischen Modellen nur bedingt möglich.

Grundsätzlich ist bei Anwendung hydrologischer Modelle für stadthydrologische Betrachtungen eine Anpassung des hydrologischen Systems an die hydraulischen Verhältnisse zu fordern. Hierzu ist eine detaillierte Untersuchung des Kanalnetzes hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit notwendig. Für ausgewählte Ereignisse sind die Berechnungsergebnisse des hydrologischen Modells auf Plausibilität zu überprüfen, insbesondere bei ausgedehnten Kanalnetzen. Eine Vorberechnung mit einem physikalisch basierten Modell ist zu empfehlen. Wird keine zufrieden stellende Übereinstimmung der Ergebnisse erzielt, so sollte von der Anwendung eines hydrologischen Modells abgesehen werden.

Inhaltsverzeichnis

Kap.		Seite
1.	Einleitung	1
2.	Vergleich der Modellansätze und Anwendungsbereich der Modelle	4
2.1	Definitionen	4
2.2	Prozess der Abflussbildung	5
2.2.1	Abflussbildung bei undurchlässigen Flächen	6
2.2.2	Abflussbildung für durchlässige Flächen	7
2.3	Prozess der Abflusskonzentration	7
2.3.1	Abflusskonzentrationsberechnung in hydrologischen Modellen	8
2.3.2	Abflusskonzentrationsberechnung in hydrodynamischen Modellen	13
2.4	Prozess der Abflusstransformation	13
2.4.1	Abflusstransformationsberechnung in hydrologischen Modellen	13
2.4.2	Abflusstransformationsberechnung in hydrodynamischen Modellen	15
2.5	Berücksichtigung der Sonderbauwerke	18
2.5.1	Berücksichtigung von Sonderbauwerken in hydrologischen Modellen	18
2.5.2	Berücksichtigung von Sonderbauwerken in hydrodynamischen Modellen	19
2.6	Berechnung der Schmutzfrachten	19
2.6.1	Berechnung der Schmutzfrachten in hydrologischen Modellen	20
2.6.2	Berechnung der Schmutzfrachten in hydrodynamischen Modellen	20
2.7	Wesentliche Unterschiede der Modellansätze	20
2.8	Anwendungsbereiche der Modelle	22
2.8.1	Bemessung von Regenrückhaltebecken nach ATV-DVWK Arbeitsblatt A117	22
2.8.2	Bemessung von Mischwasserbehandlungsanlagen nach dem ATV-Arbeitsblatt A128	24
2.8.3	Hydraulischer Nachweis von Entwässerungssystemen nach dem DWA-Arbeitsblatt A118	27
3.	Literaturüberblick und Stand des Wissens	29
3.1	Literatur	29
3.2	Stand des Wissens	34
4	Vorgehensweise bei der Untersuchung und Ziel	36
5	Verwendete Modelle	38

5.1	Beschreibung des Modells KOSIM	38
5.2	Beschreibung des Modells HYSTEM-EXTRAN	41
6	Verwendete Kanalnetze	45
6.1	Einteilung der Kanalnetze in Gruppen	45
6.2	Kenngrößen der verwendeten Kanalnetze	46
6.2.1	Allgemeines	46
6.2.2	Kenngrößen der verwendeten Netze	48
6.3	Parameterwahl	51
7	Vergleichsberechnungen für die Bemessung von Regenrückhaltebecken nach ATV-DVWK-Arbeitsblatt A117	54
7.1	Niederschlagsbelastung für die Langzeitsimulationen	54
7.1.1	Wahl der Niederschlagsreihe	54
7.1.2	Aufbereitung der Niederschlagsreihe für die hydrologische Simulation	54
7.1.3	Aufbereitung der Niederschlagsreihe für die hydrodynamische Simulation	55
7.2	Vergleichsberechnungen für die Netze der Gruppe 1	56
7.2.1	Durchführung der Berechnungen und Berechnungsergebnisse	56
7.2.2	Analyse der Ergebnisse	60
7.3	Vergleichsberechnungen für die Netze der Gruppen 2 und 3	65
7.4	Vergleich der Ergebnisse der Langzeitsimulation mit den Ergebnissen des einfachen Verfahrens	69
7.5	Zusammenfassung der Ergebnisse der Vergleichsberechnungen nach A117	74
8	Durchführung der Vergleichsberechnungen zur Dimensionierung von Regenüberlaufbecken nach dem ATV-Arbeitsblatt A128	76
8.1	Verwendete Regenreihe des Deutschen Wetterdienstes	76
8.2	Vorgehensweise und Ergebnisse der Bemessung der Regenüberlaufbecken	78
8.3	Untersuchung der Ursachen für die Unterschiede im erforderlichen Volumen	81
8.4	Zusammenfassung der Ergebnisse der Vergleichsberechnungen nach A128	95
9	Anpassung der Kanalnetze für die hydrologische Berechnung und Konsequenzen der Anpassung auf die Berechnungsergebnisse	97
9.1	Vergleichsberechnungen für Einzel-Modellregen	97
9.2	Ausgewählte Kanalnetze und Vorgehensweise bei der Anpassung	100
9.2.1	Vorgehensweise bei der Anpassung	100

9.2.2	Anpassung für die Netze Of6, MI2 und Eck	101
9.3	Auswirkungen der Anpassung auf die Ergebnisse der Bemessung von Regenrückhalteräumen	106
9.4	Anpassung ausgedehnter Systeme	110
9.5	Auswirkungen der Anpassung auf die Ergebnisse der Bemessung von Regenwasserbehandlungsanlagen	114
9.6	Ergebnisse der Modellanpassung	114
10	Vergleichsberechnungen zur Abflusstransformation	116
11	Zusammenfassung und Ausblick	127
12	Literaturverzeichnis	135
13	Kurzzeichen	141

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle-Nr.		Seite
Tabelle 1	Modellansätze der Abflussberechnung in hydrologischen und hydrodynamischen Modellen	21
Tabelle 2	Benötigte Kennlinien für die Berechnung der Abflussaufteilung in Becken	40
Tabelle 3	Enthaltene Sonderbauwerke in den Netzen der Gruppe 2	49
Tabelle 4	Enthaltene Sonderbauwerke in den Netzen der Gruppe 3	50
Tabelle 5	Anzahl der Haltungen in den Netzen der Gruppe 3 – Feinnetz und Grobnetz	50
Tabelle 6	Gegenüberstellung der erforderlichen Regenrückhaltebeckenvolumina hydrologisch und hydrodynamisch für die Netze der Gruppe 1	59
Tabelle 7	Abhängigkeit der Ergebnisabweichungen von Parametern der Leistungsfähigkeit und des Speichervermögens	62
Tabelle 8	Korrelationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Häufigkeit	63
Tabelle 9	Vergleich der Ergebnisse der Bemessung der Regenrückhaltebecken - Netze der Gruppe 2	66
Tabelle 10	Zusammenhang zwischen den Ergebnisabweichungen und dem Parameter Mittlerer Rohrdurchmesser - Netze der Gruppe 2	67
Tabelle 11	Vergleich der Ergebnisse der Langzeitsimulation und dem einfachen Verfahren - Netze der Gruppe 1	70
Tabelle 12	Vergleich der Ergebnisse der Langzeitsimulation und dem einfachen Verfahren - Netze der Gruppe 2	72
Tabelle 13	Einordnung der Niederschläge der Jahresreihe 1977 in die Statistik des DWD	78
Tabelle 14	Zusammenstellung der erforderlichen Volumina der Regenwasserbehandlungsanlagen nach A 128, Anhang 3, Netze der Gruppe 1	79
Tabelle 15	Vergleich der Ergebnisse der Beckenbemessung nach A128 - Netze der Gruppe 2	81
Tabelle 16	Vergleich der Ergebnisse der Beckenbemessung nach A128 - Netze der Gruppe 3	81
Tabelle 17	Kenngrößen der Niederschläge für die Vergleichsberechnungen	83
Tabelle 18	Hauptsammlerabschnitte des Kanalnetzes Hei	86
Tabelle 19	Hauptsammlerabschnitte des Kanalnetzes Mai	89

Tabelle 20	Abhängigkeit der Änderung des erforderlichen RÜB-Volumens von der Änderung der Fließzeit und des Volumens des Kanalnetzes	90
Tabelle 21	Niederschlagsmengen der verwendeten Modellregen in mm/5 Min	98
Tabelle 22	Ergebnisse der Vergleichsberechnungen mit und ohne Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit – Netz Of6	102
Tabelle 23	Ergebnisse der Vergleichsrechnungen mit und ohne Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit, Netz Mi2	103
Tabelle 24	Ergebnisse der Vergleichsrechnungen nach Anpassung	104
Tabelle 25	Ergebnisse der Bemessung nach A117 – Netze mit und ohne Anpassung	106
Tabelle 26	Ergebnisse der Bemessung nach A117 – Netz Eck mit und ohne Anpassung	106
Tabelle 27	Netz Mai, Vergleich der Entlastungsmengen für mittlere Ereignisse	112
Tabelle 28	Vergleich der Entlastungsmengen für mittlere Ereignisse	112
Tabelle 29	Abweichung der Entlastungsmengen für mittlere Ereignisse	113
Tabelle 30	Abhängigkeit der Speicherkonstanten von der Fließzeit für verschiedene Gefälleverhältnisse	125
Tabelle 31	Empfehlungen zum Einsatz hydrologischer Modelle	133
Tabelle 32	Empfehlungen zum Einsatz hydrodynamischer Modelle	134

Tabellen im Anhang

Tabelle-Nr.

Tabelle A 1.1.1	Kenngößen der Netze der Gruppe 1, Teil 1
Tabelle A 1.1.2	Kenngößen der Netze der Gruppe 1, Teil 2
Tabelle A 1.2.1	Kenngößen der Netze der Gruppe 2, Teil 1
Tabelle A 1.2.2	Kenngößen der Netze der Gruppe 2, Teil 2
Tabelle A 1.3.1	Kenngößen der Netze der Gruppe 3, Teil 1
Tabelle A 1.3.2	Kenngößen der Netze der Gruppe 3, Teil 2
Tabelle A 2	Kennzahlen der Niederschlagsereignisse der Starkregenserie
Tabelle A 3.1	Verhältnis der Entlastungsspitzen aus hydrologischer und hydrodynamischer Berechnung, Netze der Gruppe 1
Tabelle A 3.2	Berechnungsergebnisse für den Modellregen $n = 1$
Tabelle A 3.3	Berechnungsergebnisse für den Modellregen $n = 0,50$
Tabelle A 3.4	Berechnungsergebnisse für den Modellregen $n = 0,33$
Tabelle A 3.5	Berechnungsergebnisse für den Modellregen $n = 0,20$

Abbildungsverzeichnis

	Seite	
Abbildung 1	Linearitätsprinzip	9
Abbildung 2	Prinzip der Zeitinvarianz	10
Abbildung 3	Linearitätsprinzip und Prinzip der Zeitinvarianz	10
Abbildung 4	Lösungsfunktion des linearen Einzelspeichers	11
Abbildung 5	Vergleich der Abflussganglinien, Netz Pat, Ereignis vom 25.06.1977	52
Abbildung 6	Vergleich der Abflussganglinien, Netz Ez1, Ereignis vom 25.06.1977	52
Abbildung 7	Vergleich der Abflussganglinien, Netz Lin, Ereignis vom 25.06.1977	52
Abbildung 8	Abhängigkeit des Beckenvolumens von der Wiederkehrzeit – RRB Alt, alle Ereignisse	57
Abbildung 9	Abhängigkeit des Beckenvolumens von der Wiederkehrzeit – RRB Alt, homogener Bereich der Verteilung	58
Abbildung 10	Graphische Darstellung der erforderlichen Regenrückhaltebecken volumina hydrologisch und hydrodynamisch für die Netze der Gruppe 1	60
Abbildung 11	Vergleich der Zuflussganglinien für das Ereignis vom 05.06.1963, Netz Of6	61
Abbildung 12	Vergleich der Zuflussganglinien für das Ereignis vom 05.06.1963, Netz Sba	61
Abbildung 13	Abhängigkeit der Volumendifferenz von dem mittleren Rohrdurchmesser für eine Häufigkeit $n = 0,2$	63
Abbildung 14	Abhängigkeit der Volumendifferenz von dem mittleren Rohrdurchmesser für eine Häufigkeit $n = 0,5$	64
Abbildung 15	Abhängigkeit des erforderlichen Speichervolumens von der Wiederkehrzeit – RRB Mue hydrodynamisch	66
Abbildung 16	Abhängigkeit der Volumendifferenz von dem mittleren Rohrdurchmesser für eine Häufigkeit $n = 0,2$	67
Abbildung 17	Aufbau des Netzes Ber	68
Abbildung 18	Überlaufganglinien RÜ Ber für das Ereignis vom 05.06.63	68
Abbildung 19	Abweichung der Ergebnisse der vereinfachten Berechnung von den Ergebnissen der hydrodynamischen Langzeitsimulation	71
Abbildung 20	Abweichung der Ergebnisse der vereinfachten Berechnung von den Ergebnissen der hydrologischen Langzeitsimulation	71

Abbildung 21	Abweichung der Ergebnisse der hydrodynamischen LZS von der vereinfachten Berechnung, Netze der Gruppe 2	73
Abbildung 22	Abweichung der Ergebnisse der hydrologischen LZS von der vereinfachten Berechnung, Netze der Gruppe	73
Abbildung 23	Gegenüberstellung der Entlastungsfrachten aus der Vorberechnung und am tatsächlichen Netz, Netze der Gruppe 1	80
Abbildung 24	Prinzipiskizze des Netzes Hei	82
Abbildung 25	Prinzipiskizze des Netzes Mai	83
Abbildung 26	Netz Hei, Vergleich der Abflussganglinien aus der Vorberechnung und des tatsächlichen Netzes am Systemende für das Ereignis vom 22.01.1977	84
Abbildung 27	Netz Mai, Vergleich der Abflussganglinien aus der Vorberechnung und des tatsächlichen Netzes zur Kläranlage für das Ereignis vom 22.01.1977	84
Abbildung 28	Netz Hei – Vergleich der Abflussganglinien im Hauptsammler – real und fiktiv	86
Abbildung 29	Vergleich der Abflussganglinien aus dem EZG des RÜ3, Netz Mai, Ereignis vom 25.07.1977	87
Abbildung 30	Vergleich der Abflussganglinien aus dem EZG des RÜ2, Netz Mai, Ereignis vom 25.07.1977	88
Abbildung 31	Vergleich der Abflussganglinien im Hauptsammler, Netz Mai, fiktiver Regen 2	89
Abbildung 32	Vergleich der hydrologisch berechneten Zulaufganglinien zur KA, Netz Hei, Ereignis vom 25.06.1977 – alte Modellversion	90
Abbildung 33	Vergleich der hydrologisch berechneten Abflussganglinien am Systemende, Netz Hei, Ereignis vom 25.06.1977	91
Abbildung 34	Vergleich der hydrologisch berechneten Abflussganglinien am Systemende, Netz Mai, Ereignis vom 25.06.1977	92
Abbildung 35	Vergleich der hydrologisch und hydrodynamisch berechneten Abflussganglinien am Systemende, Netz Hei, tatsächliches Netz, Ereignis vom 25.06.1977	93
Abbildung 36	Vergleich der hydrologisch und hydrodynamisch berechneten Abflussganglinien am Systemende, Netz Hei, fiktives Netz, Ereignis vom 25.06.1977	93
Abbildung 37	Abhängigkeit der Volumendifferenz von der Änderung der Fließzeit	95
Abbildung 38	Verhältnis der Entlastungsspitzen aus Modellregen bei hydrologischer und hydrodynamischer Simulation	99
Abbildung 39	Vergleich der Zulaufganglinien zum RÜB Of6 – Ereignis vom 22.01.1977	104

Abbildung 40	Vergleich der Zulaufganglinien zum RÜB Of6 – Ereignis vom 05.06.1977	105
Abbildung 41	Vergleich der Zulaufganglinien zum RÜB Of6 – Ereignis vom 25.07.1977	105
Abbildung 42	Vergleich der Zulaufganglinien zum RRB Of6 – Ereignis vom 05.06.1963	107
Abbildung 43	Vergleich der Zulaufganglinien zum RRB Of6 – Ereignis vom 26.06.1983	107
Abbildung 44	Vergleich der Zulaufganglinien zum RRB Mi2 – Ereignis vom 05.06.1963	108
Abbildung 45	Vergleich der Zulaufganglinien zum RRB Mi2 – Ereignis vom 26.06.1983	108
Abbildung 46	Vergleich der Zulaufganglinien zum RRB Of6 – Ereignis vom 05.06.1963	109
Abbildung 47	Vergleich der Zulaufganglinien zum RRB Mi2 – Ereignis vom 05.06.1963	109
Abbildung 48	Vergleich der Zulaufganglinien zum RÜB 5, Netz Mai – Ereignis vom 25.07.1977	111
Abbildung 49	Vergleich der Abflussverformung, Gefälle = 0,01 %	116
Abbildung 50	Vergleich der Abflussverformung, Gefälle = 10 %	117
Abbildung 51	Prinzipskizze des fiktiven Kanalnetzes für die Vergleichsrechnungen zur Wellenverformung	118
Abbildung 52	Vergleich der Abflussganglinien, Gef = 1 %, Systemauslastung rd. 90 %	119
Abbildung 53	Vergleich der Abflussganglinien, Gef = 0,1 %, Systemauslastung rd. 90 %	119
Abbildung 54	Vergleich der Abflussganglinien, Gef = 0,01 %, Systemauslastung rd. 90 %	120
Abbildung 55	Vergleich der Abflussganglinien, Gef = 1 %, Systemauslastung rd. 90 %	121
Abbildung 56	Vergleich der Abflussganglinien, Gef = 0,1 %, Systemauslastung rd. 90 %	121
Abbildung 57	Vergleich der Abflussganglinien, Gef = 1 %, Systemauslastung rd. 90 %, Länge der Transportsammler = 1000 m	122
Abbildung 58	Vergleich der Abflussganglinien, Länge = 2000 m, TS3, Gef = 0,1 %	124
Abbildung 59	Vergleich der Abflussganglinien, Länge = 2000 m, TS3, Gef = 10 ‰	124

Verzeichnis der Anhänge

Anhang 1: Kenngrößen der Kanalnetze

Anhang 2: Häufigkeiten, Menge und Dauerstufen des maßgebenden Niederschlagsabschnittes der Ereignisse der Starkregenserie für die Bemessung nach A117

Anhang 3: Berechnungsergebnisse für die Modellregen der Häufigkeiten $n = 1, 0,5, 0,33$ und $0,2$

Anhang 4: Vergleich der Abflussganglinien am Systemende für die Netze Mi2 und Eck - mittlere Ereignisse