

z.Hd. Herrn Dipl.-Ing. J. Broll-Bickhardt  
Bremer Entsorgungsbetriebe  
Hinter dem Angarikirchhof 8,  
2800 Bremen 1

Hannover, den 10.11.92

Sehr geehrter Herr Broll-Bickhardt,

hiermit übersende ich Ihnen eine Projektskizze über "**die Zuverlässigkeitsanalyse der Meßpegel H10 und H22**".

Ziel des Vorhabens ist es, numerische Methoden zu entwickeln, um eine **Konsistenzprüfung** und gegebenenfalls **einen Ersatz der fehlenden Meßdaten** an den Pegeln **H10 und H22** zu ermöglichen. Dieses ist eine wichtige Voraussetzung für eine sichere Kanalnetzsteuerung, da **H10 und H22** von zentraler Bedeutung bei der Bestimmung der Steuerungsstrategie sind.

Für zusätzliche Informationen bleibe ich zu Verfügung und würde mich freuen, ein Gespräch zur Bestimmung der weiteren Vorgehensweise mit Ihnen zu führen.

mit freundlichem Gruß

A. Khelil

PS:

Ich habe Herrn Albrecht ein Exemplar der Projektskizze übersendet.

## I. Einführung

In Bremen-Links-der-Weser wurde in den letzten Jahren ein regelbasiertes System zur Unterstützung des Betriebspersonals auf der PDP-Anlage implementiert. Es soll während eines abflußwirksamen Niederschlagsereignisses dem Maschinisten Empfehlungen auf dem Graphikbildschirm geben. Eine sinnvolle Auswahl der vom regelbasierten System gelieferten Steuerungsempfehlungen setzt die folgenden zwei Bedingungen voraus:

1. Zuverlässigkeit der Wissensbasis in der Regeldatei (Regeln.dat); damit sollen drei Anforderungen erfüllt werden: Richtigkeit, Konsistenz und Vollständigkeit der Regelmenge
2. Umfassende und genaue Erfassung des laufenden Zustandes im Kanal

In dem Entwicklungs-Vorhaben "**Überarbeitung des Steuerungskonzeptes in Bremen-Links-der-Weser**" wurde zwischen Juni und Oktober 1992 in Zusammenarbeit zwischen den Bremer Entsorgungsbetrieben (Broll-Bickhardt, Albrecht) und der Universität Hannover (Sieker, Khelil) der erste Punkt untersucht. Besonderes Gewicht wurde den betriebsbedingten Einschränkungen bzw. Anforderungen beigegeben. Es sollte u.a. gewährleistet sein, daß:

- der Maschinist eigene Initiative darüber behält, wie er die Steuerungsempfehlungen ausführt
- die Regelmenge bzw. das Steuerungskonzept übersichtlich bleibt (weitere Verfeinerungen sollten nur erfolgen, falls das bestehende Konzept sich bewähren wird)

Die Überprüfung der vom Datenerfassungssystem übertragenen Meßdaten (Punkt 2) wird zur Zeit nur grob durchgeführt. Eine einfache Konsistenzanalyse ist in der bestehenden Regelmenge implementiert; sie reicht jedoch nicht aus, um die Zuverlässigkeit des automatischen Entscheidungsprozesses zu garantieren, wenn z.B. fehlerhafte Meßwerte übergeben werden oder wenn Ausfälle auftreten.

Insbesondere muß eine systematischere Prüfung der gelieferten Meßdaten für die zwei Meßpegel **H10** und **H22** erfolgen. Diese Meßpegel dienen der Abschätzung der momentanen Kanalstauraumauslastungen in HPWL (**H10**) und in Krimpel (**H22**), deren Kenntnis von zentraler Bedeutung im bestehenden Steuerungskonzept sind.

## 2. Rekonstruktion der Pegelmeßwerte an H10 und H22

Für beide Pegel sollen im vorgeschlagenen Vorhaben numerische Methoden zur Rekonstruktion der fehlerhaften bzw. ausgefallenen Meßwerte mit Hilfe der restlichen Meßdaten entwickelt werden. Hierbei wird die Redundanz des Meßnetzes ausgenutzt, um bestehende Zusammenhänge zwischen den Meßwerten an Pegeln **H10**, **H22** und den restlichen Meßdaten auszudrücken. Zudem muß die Genauigkeit und die Anwendungsgrenzen der erarbeiteten Rekonstruktionsmethoden klar dargelegt werden.

Was die Rekonstruktionsmöglichkeit anbelangt, ist die Situation für Pegel **H10** günstiger als für Pegel **H22**. In Stauraum HPWL existieren weitere drei Wasserstandsmessungen (**H09**, **H19**, **H21**), die statistisch ausgewertet werden können. In Stauraum Krimpel besteht außer Pegel **H22** nur ein einziger Pegel **H25**, dessen Lage weit oberhalb im Stauraum liegt, sodaß ein Zusammenhang zwischen den Werten nur bei hoher Auslastung zu erwarten ist.

Ein zweiter Weg besteht darin, statistische Zusammenhänge zwischen Pegelwerte und Niederschlagswerte + Förderleistungswerte zu erstellen.

Bei Pegel **H10** dient diese zweite Rekonstruktionsmethode dem Vergleich mit der ersten und somit einer weitgehenden Absicherung der Ergebnisse.

Bei Pegel **H22** ist höchstwahrscheinlich der zweite Weg der einzig brauchbare.

## 3. Implementierung der Rekonstruktionsmethoden zur on-line Konsistenzanalyse

Nachdem zuverlässige Rekonstruktionsmethoden zur Konsistenzprüfung der Meßdaten in **H10** und **H22** erarbeitet worden sind, sollen diese neuen Erkenntnisse in der on-line Datenverarbeitung einbezogen werden. Diese Aufgabe besteht aus zwei Bearbeitungsschritten:

1. Implementierung von entsprechenden Subroutinen zur Berechnung der rekonstruierten Werte an Pegel **H10** und **H22**
2. Erweiterung der Regelmenge auf einen weiteren Regelblock "Konsistenzanalyse der Meßwerte **H10** und **H22**"  
Entsprechende Regeln müssen ausformuliert werden und in Absprache mit den Bremer Entsorgungsbetrieben sollen die Reaktion des Steuerungssystems

erörtert werden, falls Inkonsistenz entdeckt werden (Ausgabe von Warnmeldungen,...)

Bearbeitungsschritt	Arbeitstage Netto
<b>Erarbeitung von Rekonstruktionsmethoden für H10 und H22<sup>1</sup></b>	
Statistische Auswertung nach Weg 1	5
Statistische Auswertung nach Weg 2	5
<b>Implementierung im on-line Betrieb</b>	
Erarbeitung der Programme	5
Erweiterung der Regeldatei	5
<b>Bericht</b>	5

<sup>1</sup>Es wird vorausgesetzt, daß die erforderlichen Daten auf Disketten (ASCII-Dateien) von den Bremer Entsorgungsbetrieben dem Ingenieurbüro ifs zur Verfügung gestellt werden.

## Konsistenzanalyse der Meßdaten vom Pegel H10 im Entwässerungskanal Bremen-Linkes-Weserufer

### Teil 1: Erstellung der Regressionsformeln

Ingenieurgesellschaft für Stadthydrologie **ifs**  
im Auftrag der Bremer Entsorgungsbetriebe

Projektbearbeitung von  
- Dr.-Ing. A. Khelil  
- L. Schiedt

August-September 1993

### 1. Einführung in die Problematik

Im On-line Betrieb des Entwässerungssystems Bremen-Linkes-Weserufer sind Informationen über die Auslastung der vorhandenen Speicherräume KRIMPEL ( $\approx 6000 \text{ m}^3$ ) und HPWL ( $\approx 35\,000 \text{ m}^3$ ) von zentraler Bedeutung. Der Stauraum KRIMPEL wird durch Pegel H22 und H25 beobachtet, der Speicherraum HPWL durch sechs Pegel H10, H09, H19, H17, H15, H21.

*Zur Bestimmung der Steuerungsaktionen spielen nur H22 und H10 eine Rolle.* Falls einer dieser Pegel ungültige Werte liefert, wird die entsprechende Stauräumenauslastung falsch oder sogar nicht mehr ermittelt, was gravierende Folgerungen für die Steuerung haben kann. Es ist daher erforderlich, jederzeit den Pegelwerten von H10 und H22 einer (Konsistenz-)prüfung unterziehen zu können.

Solch eine Kontrolle setzt die *Redundanz* des Meßsystems voraus. Ein Meßsystem ist an einem Meßpunkt redundant, wenn "die von diesem Meßpunkt gelieferten Informationen in anderen Meßpunkten enthalten sind". Unter dieser Voraussetzung ist eine Rekonstruktion der Werte an dem Meßpunkt durch Heranziehen anderer Meßpunkte und Anwendung geeigneter mathematischer Verfahren möglich. In praktischen Fällen - wie auch in Bremen-Linkes-Weserufer - stellen die rekonstruierten Werte allenfalls eine ausreichende Approximation der Bezugswerte dar, ohne vollständig mit ihnen zu übereinstimmen.

Entweder beruht die mathematische Datenverarbeitung auf theoretischen Kenntnissen über die beobachteten Vorgänge, wobei eine deterministische Analyse durchgeführt wird, oder es wird eine statistische Untersuchung durchgeführt. In diesem Fall werden die mathematisch aufgedeckten Zusammenhänge zwischen den Variablen nur eingeschränkt einer Erläuterung zugänglich. In Bremen-Linkes-Weserufer sind prinzipiell beide Methodiken denkbar:

- Der deterministische Weg setzt eine vereinfachte Modellierung des Niederschlagsabflußvorganges im jeweiligen Einzugsgebiet (Oberflächenabfluß, Hydraulik im Kanal) mit anschließender Kalibrierung der Modellparameter voraus.
- Der statistische Weg erstellt direkte Beziehungen zwischen den Pegelwerten durch Regressionsformeln.

*Die vorliegende Untersuchung beinhaltet eine statistische Untersuchung der Wasserstandsdaten im Stauraum HPWL zur Konsistenzanalyse der von H10 gelieferten Wasserstandswerte.*

## 2. Allgemeine Randbedingungen der Regressionsanalyse

Folgende Pegel bzw. Pegelkombinationen werden zur Regressionsanalyse herangezogen:

Nr.	Liste der untersuchten Pegelkombinationen
1	$H10 = f(H09)$
2	$H10 = f(H19)$
3	$H10 = f(H09, H19)$
4	$H10 = f(H09, H17)$
5	$H10 = f(H21)$
6	$H10 = f(H21, H09)$
7	$H10 = f(H21, H19)$

Tab. 1: Pegelkombinationen zur Rekonstruktion Pegelwerte von H10

Die Rohdaten wurden vom on-line Meßdatenerfassungssystem zwischen dem 01.01.1992 und dem 31.12.1992 (sechs Monate) in Tagedateien eingetragen. Die Daten liegen in ASCII-Format in fünf Minuten Zeitschritt vor.

Zunächst werden die ungültigen Daten (Wert = -999) herausortiert. Um eine Verfälschung der Regressionsergebnisse vorzubeugen, müssen zusätzlich gewährleistet werden, daß die Wasserstände der zur Rekonstruktion verwendeten Pegel über die jeweilige Null der Sonde liegen. In Tabelle 2 werden die sich daraus ergebenden Restriktionen aufgeführt.

Nr.	Restriktionen über die Wasserstände
1	$H10 > -1,7 \text{ mNN}; H09 > 0,6 \text{ mNN}$
2	$H10 > -1,5 \text{ mNN}; H19 > -0,3 \text{ mNN}$
3	$H10 > -1,7 \text{ mNN}; H09 > 0,6 \text{ mNN}; H19 > -0,3 \text{ mNN}$
4	$H10 > -1,7 \text{ mNN}; H09 > 0,6 \text{ mNN}; H17 > 0,9 \text{ mNN}$
5	$H10 > -1,5 \text{ mNN}; H21 > 1,6 \text{ mNN}$
6	$H10 > -1,7 \text{ mNN}; H21 > 1,6 \text{ mNN}; H09 > 0,6 \text{ mNN}$
7	$H10 > -1,5 \text{ mNN}; H21 > 1,6 \text{ mNN}; H19 > -0,3 \text{ mNN}$

Tab. 2: gültige Zustandsbereiche für die Regressionsanalyse

## 3. Vorgehensweise der statistischen Untersuchung

Die Datenverarbeitung erfolgt in zwei Stufen, die sich jeweils auf zwei getrennte Rohdatenmengen beziehen.

1. Berechnung der Regressionskoeffizienten
2. Verifizierung der Rekonstruktionsformel

- Zunächst werden Regressionsformeln der Form  $H10 = f(\text{Pegel1}, \dots, \text{Pegeli})$  vorgeschlagen und ihre Koeffizienten bestimmt. Die Berechnung erfolgt mit Hilfe eines Optimierungsalgorithmus, der die Summe der Quadratabweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Wasserstandswerten minimiert. Um die Genauigkeit der Rekonstruktion möglichst zu erhöhen, werden die Kanalzustände nach den Wasserstandswerten von H10 klassifiziert. Tabelle 3 zeigt die Klassendefinition.

Nr.	Definition der Zustandsklasse
Klas. 1	$H10 < -0,50 \text{ mNN}$
Klas. 2	$-0,50 \text{ mNN} < H10 < 1,00 \text{ mNN}$
Klas. 3	$H10 > 1,00 \text{ mNN}$

Tab. 3: Definition der Zustandsklassen

- In der zweiten Bearbeitungsstufe werden die berechneten Regressionsformeln auf die unabhängige Datenmenge (Rohdatenmenge Nr. 2) zur Rekonstruktion verwendet. Anschließend werden Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten H10-Ganglinie ermittelt und kommentiert.

### Anmerkung:

Eine strikte Trennung zwischen den verwendeten Rohdaten zur Berechnung der Regressionskoeffizienten und den verwendeten Rohdaten zur Verifizierung der Rekonstruktion (Rohdatenmenge Nr.1  $\cap$  Rohdatenmenge Nr.2 =  $\emptyset$ ) ist zu beachten.

#### 4. Ergebnisse der statistischen Untersuchung

Es werden für jede Pegelkombination die untersuchten Regressionsfunktionen tabellarisch dargestellt und die Genauigkeit der Rekonstruktion protokolliert.

##### 4.1 Kombination 1: H10 = f(H09)

Datenumfang:

- Rohdatenmenge Nr. 1: 866 Datensätze in 6 zusammenhängenden Zeitintervallen
- Rohdatenmenge Nr. 2: 1727 Datensätze in 7 zusammenhängenden Zeitintervallen

Nr.	Regressionsformeln H10=f(H09)
1	$H10(t) = a \times H09(t) + b$
2	$H10(t) = a \times H09(t) + b \times H09(t)^2 + c$
3	$H10(t) = a \times H09(t) + b \times H09(t)^2 + c \times H09(t)^3 + d$
4	<b><math>H10(t) = a \times H09(t) + b \times H09(t)^2 + c \times H09(t-15 \text{ min}) + d</math></b>
5	$H10(t) = a \times H09(t) + b \times H09(t)^2 + c \times H09(t-15 \text{ min}) + d \times H09(t-15 \text{ min})^2 + e$

Tab. 4: Liste der untersuchten Regressionsformeln nach dem Muster H10=f(H09)

Nr.	mittlere Abweichung <sup>(1)</sup> (cm)	mittlere absolute Abweichung (cm)	maximale absolute Abweichung (cm)
1	-3,2 (0) <sup>(2)</sup>	11,1 (10,4)	75,6 (85,5)
2	-1,7 (0)	10,4 (9,8)	64,9 (86,8)
3	-1,8 (0)	10,3 (9,7)	59,4 (89,3)
4	<b>-2,3 (0)</b>	<b>7,0 (5,2)</b>	<b>60,4 (69,7)</b>
5	-2,5 (0)	6,7 (4,9)	62,6 (74,3)

Tab. 5: Genauigkeit der Regressionsformeln nach dem Muster H10=f(H09)

- (1) Die Abweichungswerte beziehen sich auf Rohdatenmenge Nr. 2.  
 (2) Die Abweichungswerte in Klammern beziehen sich auf Rohdatenmenge Nr. 1.

Regressionsformel Nr. 4 liefert insgesamt die besten Ergebnisse. Die mittlere absolute Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Werten beträgt nach Rekonstruktionsformel  $[H10(t) = a \times H09(t) + b \times H09(t)^2 + c \times H09(t-15 \text{ min}) + d]$  nur 7 cm. In Anlage 1 wird die Rekonstruktion mit dieser Regressionsformel für alle

Zeitintervalle der Verifizierung (7 "Ereignisse") dargestellt. Die entsprechenden Ganglinien befinden sich in der ASCII Datei H09\VERIF\GANGV4.

##### 4.2 Kombination 2: H10 = f(H19)

Umfang der Rohdaten:

- Rohdatenmenge Nr. 1: 2823 Datensätze in 23 zusammenhängenden Zeitintervalle
- Rohdatenmenge Nr. 2: 3254 Datensätze in 26 zusammenhängenden Zeitintervalle

Nr.	berechnete Regressionsformeln
1	<b><math>H10(t) = a \times H19(t) + b</math></b>
2	$H10(t) = a \times H19(t) + b \times H19(t)^2 + c$
3	$H10(t) = a \times H19(t) + b \times H19(t-10 \text{ min}) + c$

Tab. 6: Liste der Regressionsformeln H10=f(H19)

Nr.	mittlere Abweichung (cm)	mittlere absolute Abweichung (cm)	maximale absolute Abweichung (cm)
1	<b>-2,0 (0)</b>	<b>2,6 (2,0)</b>	<b>84,9 (27,3)</b>
2	-2,0 (0)	2,6 (2,0)	83,1 (27,5)
3	-2,0 (0)	2,5 (2,0)	85,7 (28,5)

Tab. 7: Genauigkeit der Regressionsformeln H10=f(H19)

Die Regressionsformel  $[H10(t) = a \times H19(t) + b]$  stellt insgesamt die beste Lösung dar. Der Zusammenhang zwischen H10 und H19 ist offenbar straffer als zwischen H10 und H09. - Die mittlere absolute Abweichung ist um die Hälfte reduziert - , und der Gültigkeitsbereich der Rekonstruktion mit H19 ist größer als mit H09.

In Anlage 2 wird die Qualität der Rekonstruktion nach Formel  $[H10(t) = a \times H19(t) + b]$  anhand einiger Ereignisse dargestellt. Alle berechneten Ganglinien befinden sich in der ASCII Datei H19\VERIF\GANGV11 .

#### 4.3 Kombination 3: H10 = f(H09, H19)

Datenumfang

- Rohdatenmenge Nr.1: 1534 Datensätze in 15 zusammenhängenden Zeitintervallen
- Rohdatenmenge Nr.2: 1381 Datensätze in 11 zusammenhängenden Zeitintervallen

Nr.	berechnete Regressionsformeln
1	$H10(t) = a \times H09(t) + b \times H19(t) + c$
2	$H10(t) = a \times H09(t) + b \times H09(t)^2 + c \times H19(t) + d \times H19(t)^2 + e$
3	$H10(t) = a \times H09(t) + b \times H09(t-15) + c \times H19(t) + d \times H19(t-15 \text{ min}) + e$

Tab. 8: Regressionsformeln H10=f(H19, H09)

Nr.	mittlere Abweichung (cm)	mittlere absolute Abweichung (cm)	maximale absolute Abweichung (cm)
1	-1,9 (0)	2,4 (2,1)	82,1 (58,0)
2	-2,0 (0)	2,5 (2,0)	78,8 (57,2)
3	-2,0 (0)	2,4 (1,9)	83,8 (58,0)

Tab. 9: Genauigkeit der Regressionsformeln H10=f(H19, H09)

Die lineare Regressionsformel  $[H10(t) = a \times H09(t) + b \times H19(t) + c]$  stellt hier auch die beste Lösung dar. Im Vergleich zu den Regressionsformeln der Form  $H10=f(H19)$  bewirkt die zusätzliche Einbeziehung von H09 jedoch keine deutliche Reduzierung der Abweichungen. Sie schränkt aber den Gültigkeitsbereich der Rekonstruktion erheblich ein.

⇒ Eine kombinierte Betrachtung der Pegel H09 und H19 bringt also keinen Vorteil.

#### 4.4 Kombination 4: H10 = f(H09, H17)

Datenumfang:

- Rohdatenmenge Nr.1: 1317 Datensätze in 15 zusammenhängenden Zeitintervallen
- Rohdatenmenge Nr.2: 1071 Datensätze in 14 zusammenhängenden Zeitintervallen

Nr.	berechnete Regressionsformeln
1	$H10(t) = a \times H09(t) + b \times H17(t) + c$
2	$H10(t) = a \times H09(t) + b \times H09(t)^2 + c \times H17(t) + d$

Tab. 10: Regressionsformeln H10=f(H09, H17)

Nr.	mittlere Abweichung (cm)	mittlere absolute Abweichung (cm)	maximale absolute Abweichung (cm)
1	4,8 (0,9)	17,3 (8,4)	1833,7 (1153,1)
2	-7,3 (0)	13,3 (7,3)	1305,5 (79,9)

Tab. 11: Genauigkeit der Regressionsformeln H10=f(H09, H17)

Die beste Regressionsformeln liefert immer noch unbrauchbare Ergebnisse. *Offensichtlich gibt es keinen Zusammenhang zwischen den Pegel H17 und H10.* Dadurch ergibt sich bei der Bestimmung der Regressionskoeffiziente eine schlechte Matrizenkonditionierung, die die Rechengenauigkeit beeinträchtigt - die berechnete mittlere Abweichung bezogen auf Rohdatenmenge Nr.1 gleicht 0,9 cm, statt des theoretischen Nullwertes - .

#### 4.5 Kombination 5: H10 = f(H21)

Datenumfang:

- Rohdatenmenge Nr. 1: 380 Datensätze in 3 zusammenhängenden Zeitintervallen.
- Rohdatenmenge Nr. 2: 335 Datensätze in 3 zusammenhängenden Zeitintervallen.

Nr.	berechnete Regressionsformeln
1	$H10(t) = a \times H21(t) + b$
2	$H10(t) = a \times H21(t) + b \times H21(t)^2 + c$
3	$H10(t) = a \times H21(t) + b \times H21(t-10 \text{ min}) + c \times H21(t-20 \text{ min}) + d$
4	$H10(t) = a \times H21(t) + b \times H21(t-10 \text{ min}) + c \times H21(t-20 \text{ min}) + d \times H21(t-30 \text{ min}) + e$

Tab. 10: Regressionsformeln H10=f(H21)

Nr.	mittlere Abweichung (cm)	mittlere absolute Abweichung (cm)	maximale absolute Abweichung (cm)
1	1,1 (0)	7,5 (9,9)	38,1 (90,7)
2	0,9 (0)	7,3 (9,9)	38,5 (91,5)
3	0,9 (0)	7,2 (8,7)	44,6 (67,7)
4	0,6 (0)	6,9 (8,1)	35,6 (67,6)

Tab. 11: Genauigkeit der Regressionsformeln  $H_{10}=f(H_{21})$ 

Die lineare Regressionsformel [ $H_{10}(t) = a \times H_{21}(t) + b$ ] liefert gute Ergebnisse. Ein großer Nachteil dieser Rekonstruktion besteht jedoch in ihrem kleinen Gültigkeitsbereich, bedingt durch die Pegellage weit oberhalb im Stauraum.

#### 4.4 Kombination 4: $H_{10} = f(H_{21}, H_{09})$

Datenumfang:

Rohdatenmenge Nr. 1: 490 Datensätze in 6 zusammenhängenden Zeitintervallen

Rohdatenmenge Nr. 2: 325 Datensätze in 5 zusammenhängenden Zeitintervallen

Nr.	berechnete Regressionsformeln
1	$H_{10}(t) = a \times H_{09}(t) + b \times H_{21}(t) + c$
2	$H_{10}(t) = a \times H_{09}(t) + b \times H_{09}(t)^2 + c \times H_{21}(t) + d \times H_{21}(t)^2 + e$

Tab. 12: Regressionsformeln  $H_{10}=f(H_{21}, H_{09})$ 

Nr.	mittlere Abweichung (cm)	mittlere absolute Abweichung (cm)	maximale absolute Abweichung (cm)
1	-1,7 (0)	4,6 (3,7)	22,5 (18,6)
2	-1,8 (0)	4,6 (3,8)	22,3 (18,0)

Tab. 13: Genauigkeit der Regressionsformeln  $H_{10}=f(H_{21}, H_{09})$ 

Die kombinierte Betrachtung der Pegel H21 und H09 liefert deutlich bessere Ergebnisse als die ausschließliche Betrachtung von H21, ohne Einschränkung des Gültigkeitsbereiches der Rekonstruktion. In [Anlage 3](#) wird die Qualität der Rekonstruktion mit Regressionsformel [ $H_{10}(t) = a \times H_{09}(t) + b \times H_{21}(t) + c$ ] beispielhaft dargestellt.

#### 4.6 Kombination 6: $H_{10} = f(H_{21}, H_{19})$

Rohdatenmenge Nr. 1: 375 Datensätze in 3 zusammenhängenden Zeitstrecken

Rohdatenmenge Nr. 2: 335 Datensätze in 3 zusammenhängenden Zeitstrecken

Nr.	berechnete Regressionsformeln
1	$H_{10}(t) = a \times H_{19}(t) + b \times H_{21}(t) + c$

Tab. 14: Regressionsformeln  $H_{10}=f(H_{21}, H_{19})$ 

Nr.	mittlere Abweichung (cm)	mittlere absolute Abweichung (cm)	maximale absolute Abweichung (cm)
1	-1,6 (0)	2,0 (2,4)	16,3 (25,5)

Tab. 15: Genauigkeit der Regressionsformeln  $H_{10}=f(H_{21}, H_{19})$ 

Eine kombinierte Betrachtung von Pegeln H21 und H19 liefert noch bessere Ergebnisse als mit der Kombination H21 und H09. [Anlage 4](#) veranschaulicht die Qualität der Rekonstruktion mit der Formel [ $H_{10}(t) = a \times H_{19}(t) + b \times H_{21}(t) + c$ ].

## 5. Schlußfolgerungen

### 5.1 Auswahl der besten Regressionsformeln

Es werden vier Rekonstruktionsformeln für die Wasserstandswerte vom Pegel H10 weiter verwendet:

Nr.	nach Untersuchung gültige Regressionsformeln	mittlere absolute Abweichung (cm)
1	$H_{10}(t) = a \times H_{09}(t) + b \times H_{09}(t)^2 + c \times H_{09}(t-15 \text{ min}) + d$	7,0
2	$H_{10}(t) = a \times H_{19}(t) + b$	2,4
3	$H_{10}(t) = a \times H_{09}(t) + b \times H_{21}(t) + c$	4,6
4	$H_{10}(t) = a \times H_{19}(t) + b \times H_{21}(t) + c$	2,0

Tab. 16: Liste der besten Rekonstruktionsformeln

### 5.2 Einfluß der Zustandsklassifizierung

In der folgenden Tabelle wird die Qualität der Rekonstruktion mit und ohne Klassifizierung der Zustände verglichen.

Nr.	mittlere abs. Abweichung mit Klas. in cm	mittlere absolute Abweichung ohne Klas. in cm	max. absolute Abweichung mit Klas. in cm	maximale absolute Abweichung ohne Klas. in cm
<b>1</b>	<b>7,0 (5,2)</b>	<b>12,1 (5,7)</b>	<b>60,4 (69,7)</b>	<b>85,3 (84,7)</b>
2	2,4 (2,0)	2,4 (2,0)	84,8 (27,6)	84,5 (39,7)
3	4,6 (3,7)	4,6 (3,8)	22,5 (18,6)	22,5 (18,6)
4	2,0 (2,4)	1,9 (2,7)	16,3 (25,5)	14,1 (39,2)

Tab. 17: Einfluß der Zustandsklassifizierung auf die Qualität der Rekonstruktion

Es ist ersichtlich, daß eine Klassifizierung der Zustände nur für die Rekonstruktion mit Pegel H09 vorteilhaft ist.

In Anlage 5 werden rekonstruierte Ganglinien - mit und ohne Klassifizierung - für den Fall  $H_{10}(t) = a \times H_{09}(t) + b \times H_{09}(t)^2 + c \times H_{09}(t-15 \text{ min}) + d$  gegenübergestellt.

In Anlage 6 werden rekonstruierte Ganglinien - mit und ohne Klassifizierung - für den Fall  $H_{10}(t) = a \times H_{19}(t) + b$  gegenübergestellt.

## Konsistenzanalyse der Meßdaten vom Pegel H10 im Entwässerungskanal Bremen-Linkes-Weserufer

### Teil 2: Implementierung

Ingenieurgesellschaft für Stadthydrologie **ifs**  
im Auftrag der Bremerentsorgungsbetriebe

Projektbearbeitung von  
- Dr.-Ing. A. Khelil  
- L. Schiedt

August-September 1993

## 1. Vorgehensweise zur Prüfung der Konsistenz in H10

### 1.1 Die ausgewählten Pegelkombinationen zur on-line Konsistenzprüfung

Ein gewisser Zusammenhang besteht zwischen dem Wasserstand in H10 und Wasserständen, die von anderen Pegeln H19, H21, H09 gemessen werden. Durch Zeitreihenanalyse wurden verschiedene Pegelkombinationen bzw. Regressionsformeln untersucht. Im folgenden werden diejenigen aufgelistet, die die besten Ergebnisse liefern und für die On-Line Implementierung geeignet sind.

Nr.	Kombination	Klassifikation der Zustände	Genauigkeit
1	H10 = f(H21, H19)	nein	2 cm
2	H10 = f(H19)	nein	2,4 cm
3	H10 = f(H21, H09)	nein	4,6 cm
4	H10 = f(H09)	ja	7 cm

Tab. 1: Pegelkombinationen zur Rekonstruktion Pegelwerte von H10

Die in Tab.1 angegebene Genauigkeit entspricht der mittleren absoluten Abweichung über die Verifizierungsmenge (vgl. Teil I).

## 1.2 Die implementierten Regressionsformeln

### 1.2.1 H10 = f(H21, H19)

$$H10(t) = a \times H19(t) + b \times H21(t) + c$$

Klasse Nr.	a	b	c
keine Klassifizierung	0,9952428	-0,02199084	0,04840799

### 1.2.2 H10 = f(H19)

$$H10(t) = a \times H19(t) + b$$

Klasse Nr.	a	b
keine Klassifizierung	0,9901649	0,01516474

### 1.2.3 H10 = f(H21, H09)

$$H10(t) = a \times H09(t) + b \times H21(t) + c$$

Klasse Nr.	a	b	c
keine Klassifizierung	0,38811280	0,6407467	-0,03355020

### 1.2.4 H10 = f(H09)

$$H10(t) = a \times H09(t) + b \times H09(t)^2 + c \times H09(t-15 \text{ min}) + d$$

Klasse Nr.	a	b	c	d
1	-	-	-	-
2	3,393519	-1,456656	0,225331	-1,287599
3	2,674621	0,0790989	-1,9176230	0,1905252

Anmerkung zur Klassendefinition:

Nr.	Definition der Zustandsklasse
Klas. 1	H10 < -0,50 mNN
Klas. 2	-0,50 mNN < H10 < 1,00 mNN
Klas. 3	H10 > 1,00 mNN

Tab. 2: Definition der Zustandsklassen

## 1.3 Anwendungsbereiche der Pegelkombinationen

Nr.	Restriktionen über die Wasserstände
1	H21 > 1,6 mNN; H19 > -0,3 mNN
2	H19 > -0,3 mNN
3	H21 > 1,6 mNN; H09 > 0,6 mNN
4	H09 > 0,6 mNN

Tab. 3: zulässige Anwendungsbereiche der Regressionsformeln

#### 1.4 Vorgehensweise der Konsistenzprüfung

##### 1.4.1 Die Prinzipien

- Zur Rekonstruktion des Wasserstandwertes in H10 werden die Pegelkombinationen der Reihe nach geprüft - beginnend mit der Kombination, die theoretisch die besten rekonstruierten Werte liefert i.d H10=f(H19,H21) -.
- Die erste anwendbare Kombination wird zum Vergleich zwischen gemessenem und rekonstruiertem Wert in H10 herangezogen und die entsprechende absolute Abweichung in die Faktenbasis gespeichert.
- Falls diese absolute Abweichung dreimal hintereinander (= mehr als 15 Minuten lang) den Grenzwert 30 cm überschreitet, wird eine Warnmeldung vom Expertensystem herausgegeben.
- Warnmeldungen werden nur herausgegeben, wenn eine Inkonsistenz erst entdeckt wurde. Um den Machinisten nicht unnötig zu belasten, wird keine dauernde Warnmeldung angezeigt. Falls jedoch ein dauernder Inkonsistenzzustand sich einstellt, wird jeden Tag um 7:00 Uhr die Warnmeldung angezeigt.
- Falls die Rekonstruktion der Wasserstandwerte in H10 nicht möglich ist, weil die Wasserstände der anderen Pegel H19, H21, H09 außerhalb des zulässigen Bereichs liegen, findet keine Prüfung statt.

##### 1.4.2 Die Variablen

	Zustandsvariablen
E1921	Abs. Abweichung H10-f(H19,H21) (cm)
EH19	Abs. Abweichung H10-f(H19) (cm)
EH921	Abs. Abweichung H10-f(H09,H21) (cm)
STUND	Uhrzeit -Stunde-
MINUT	Uhrzeit -Minute-

	Entscheidungsvariablen
H10t0	ob der gemessene Wert in H10 OK ist? NOVAL/FALSE
H10t1	ob der vor 5 Min. gemessene Wert in H10 OK ist? NOVAL/FALSE
H10t2	ob der vor 10 Min. gemessene Wert in H10 OK ist? NOVAL/FALSE
V1H10	H10 konsistent im letzten 15 Min.-Intervall? NOVAL / FALSE

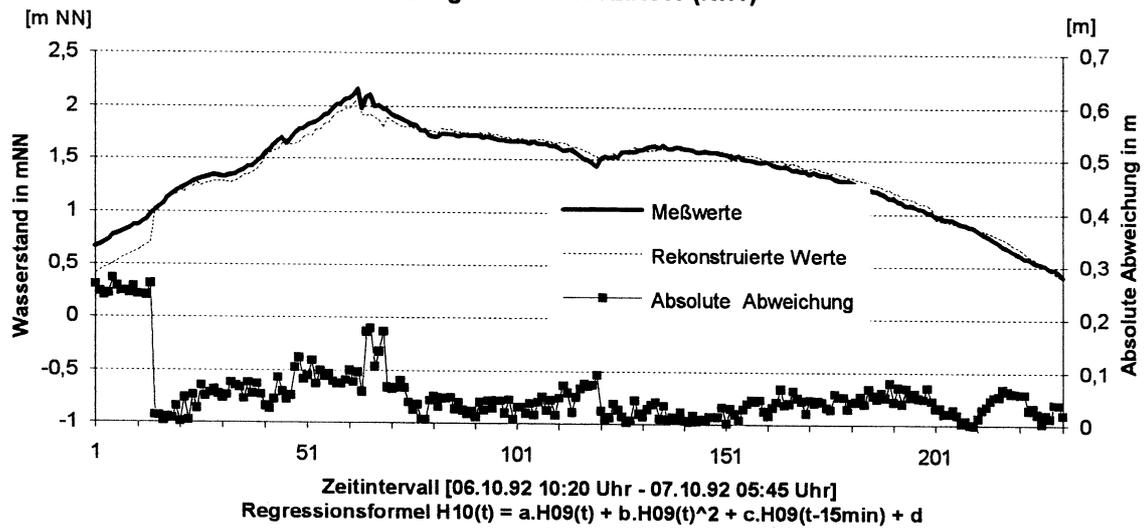
V2H10	H10 konsistent im vorletzten 15 Min.-Intervall? NOVAL / FALSE
-------	--

##### 1.4.3 Die Meldungen

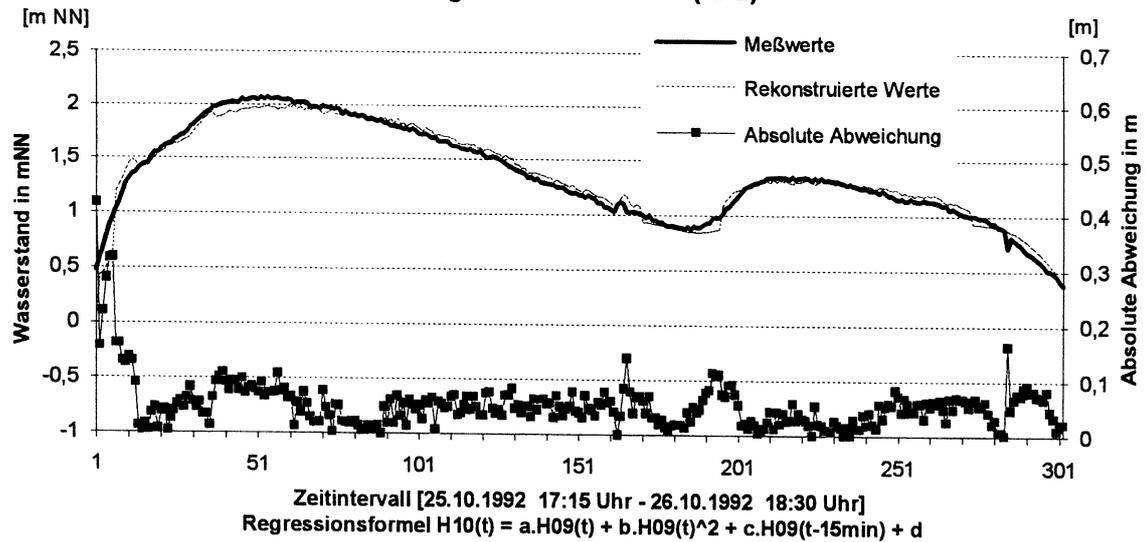
MEL61	Pegel H10 stimmt nicht mit Pegeln H19, H21, H09, ueberein, bitte Daten prüfen.
-------	--

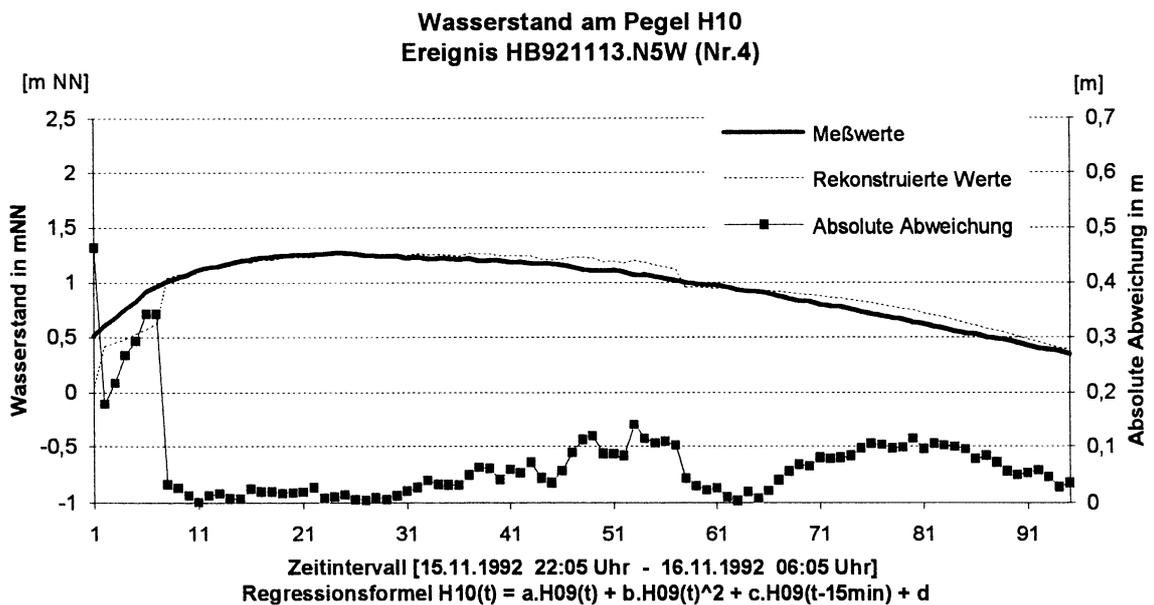
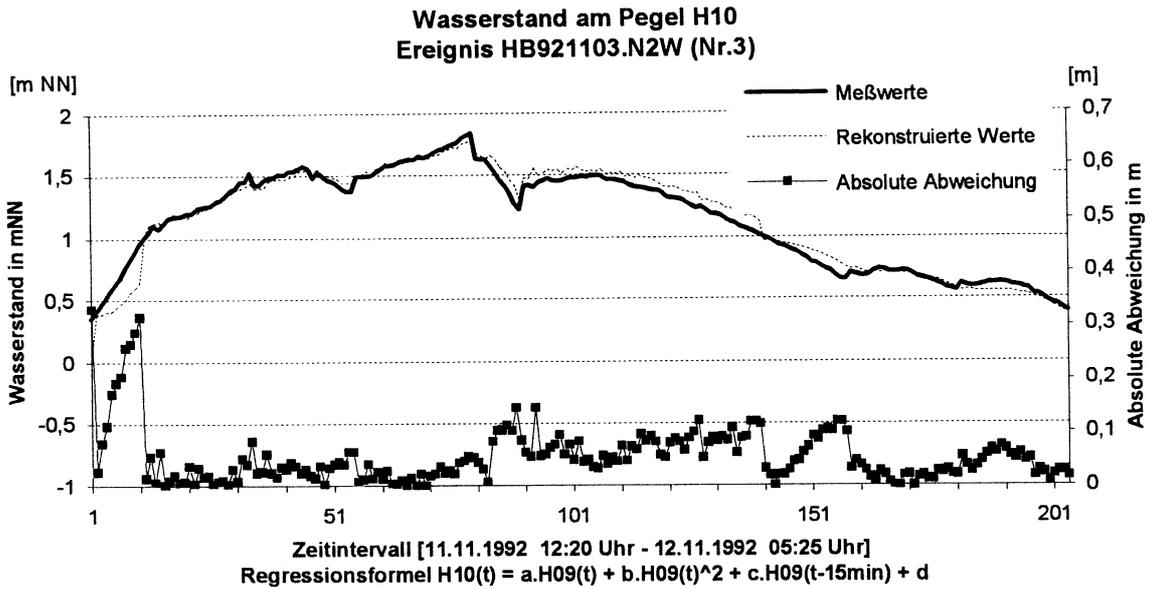
##### 1.4.4 Die Regeln (vgl. Regelbasis)

**Wasserstand am Pegel H10  
Ereignis HB921002.N5W (Nr.1)**

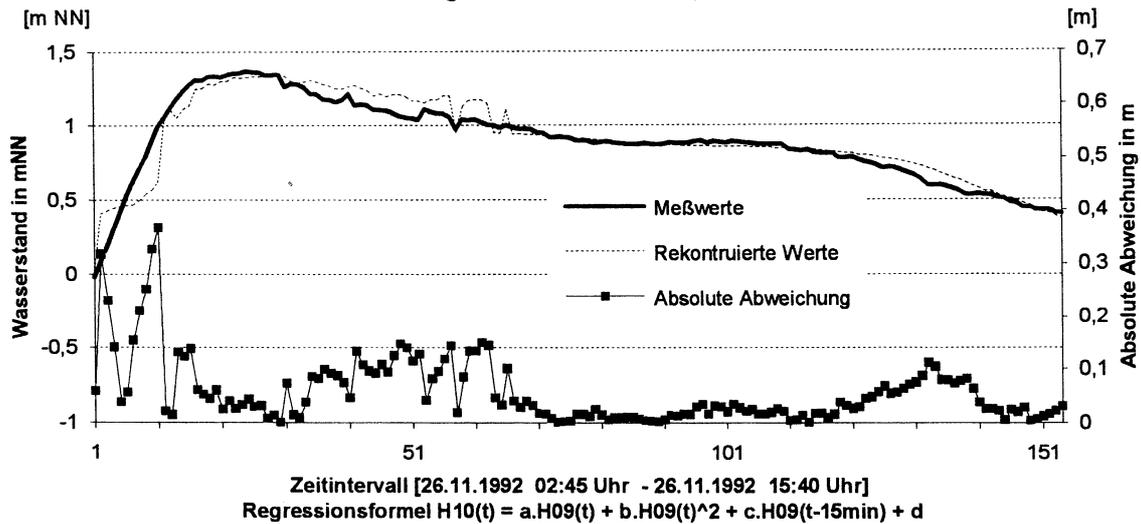


**Wasserstand am Pegel H10  
Ereignis HB921016.N5W (Nr.2)**

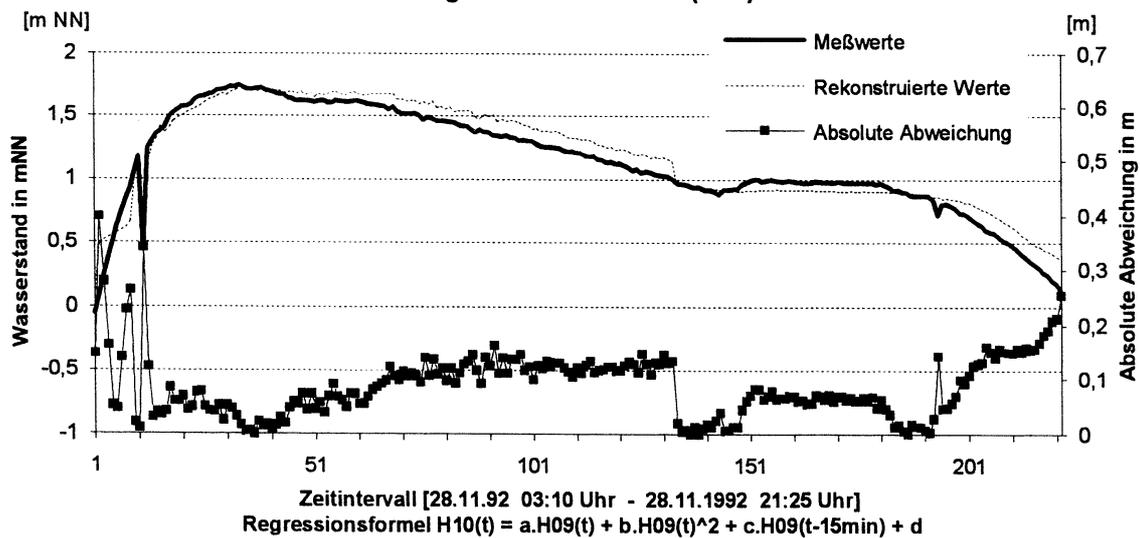


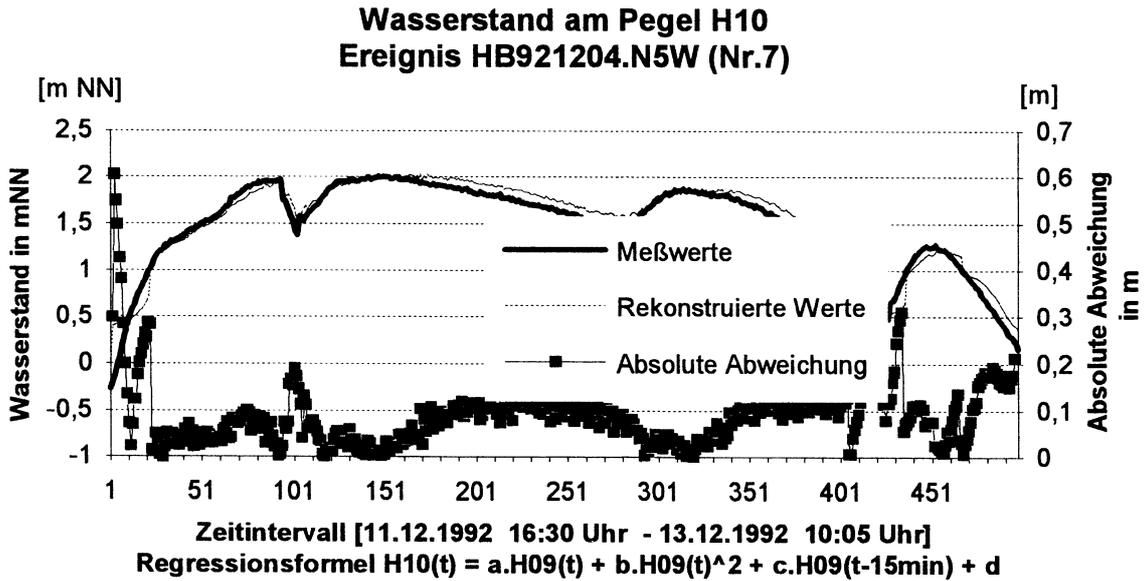


**Wasserstand am Pegel H10  
Ereignis HB921121.N6W (Nr.5)**

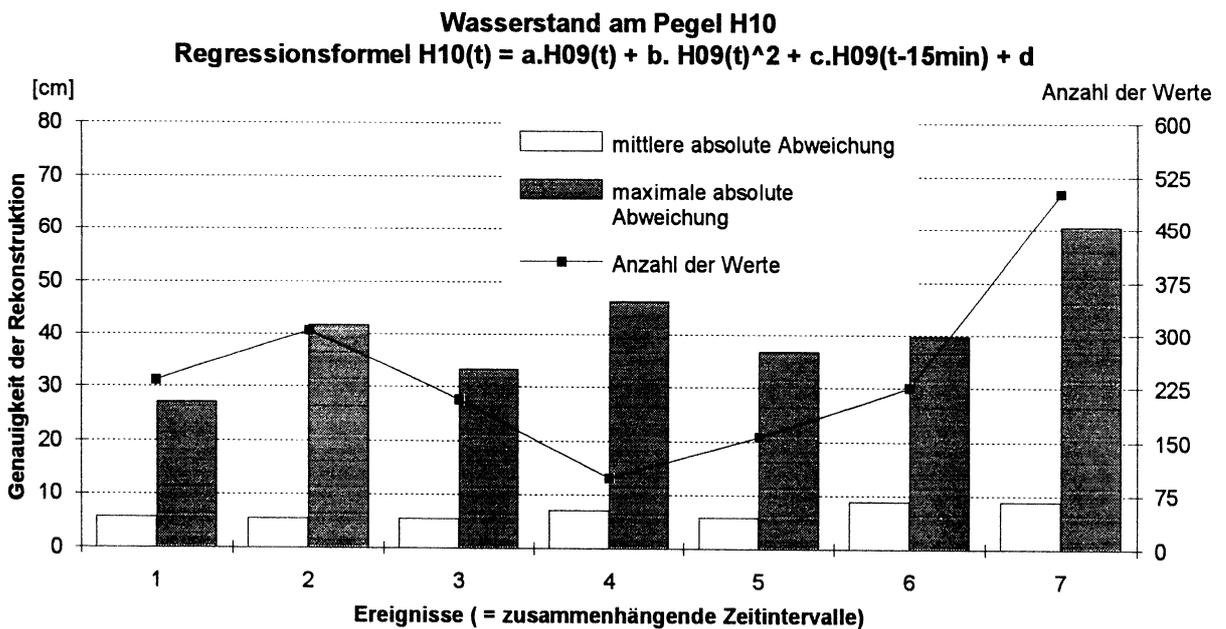


**Wasserstand am Pegel H10  
Ereignis HB921126.N4W (Nr.6)**

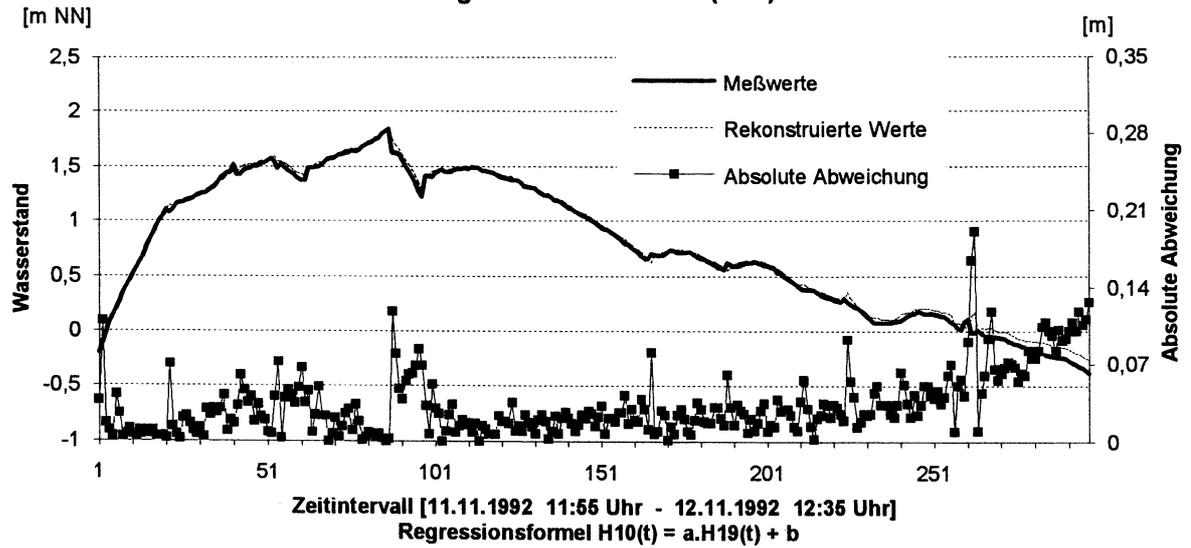




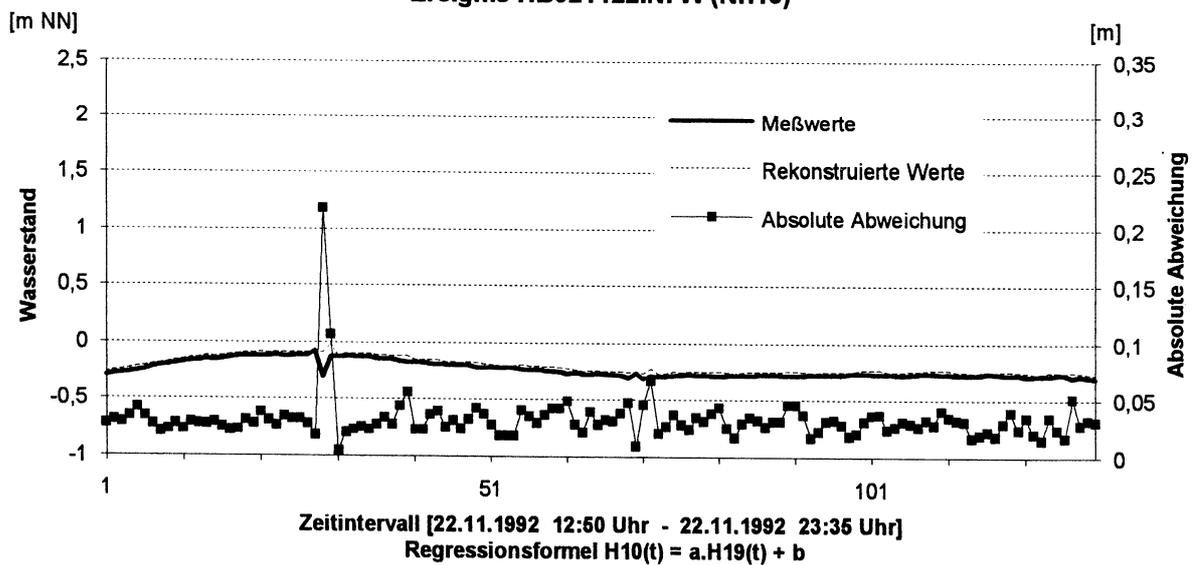
Die letzte Abbildung zeigt einen Überblick der Ergebnisse über alle 7 Ereignisse, die in die Verifizierung miteinbezogen wurden.

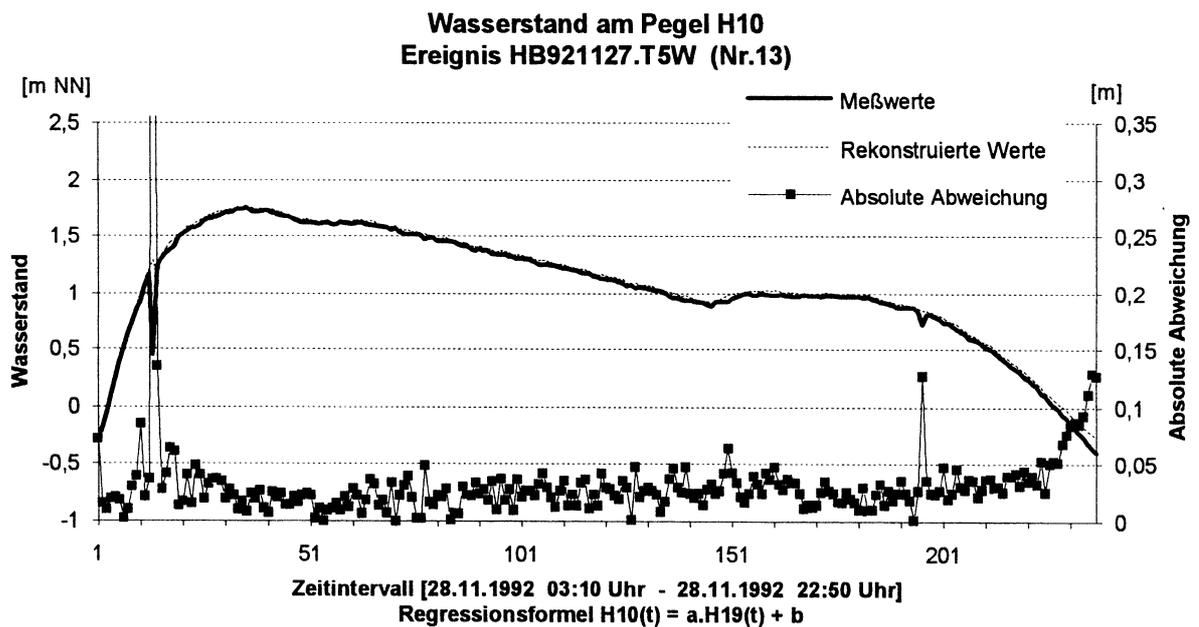
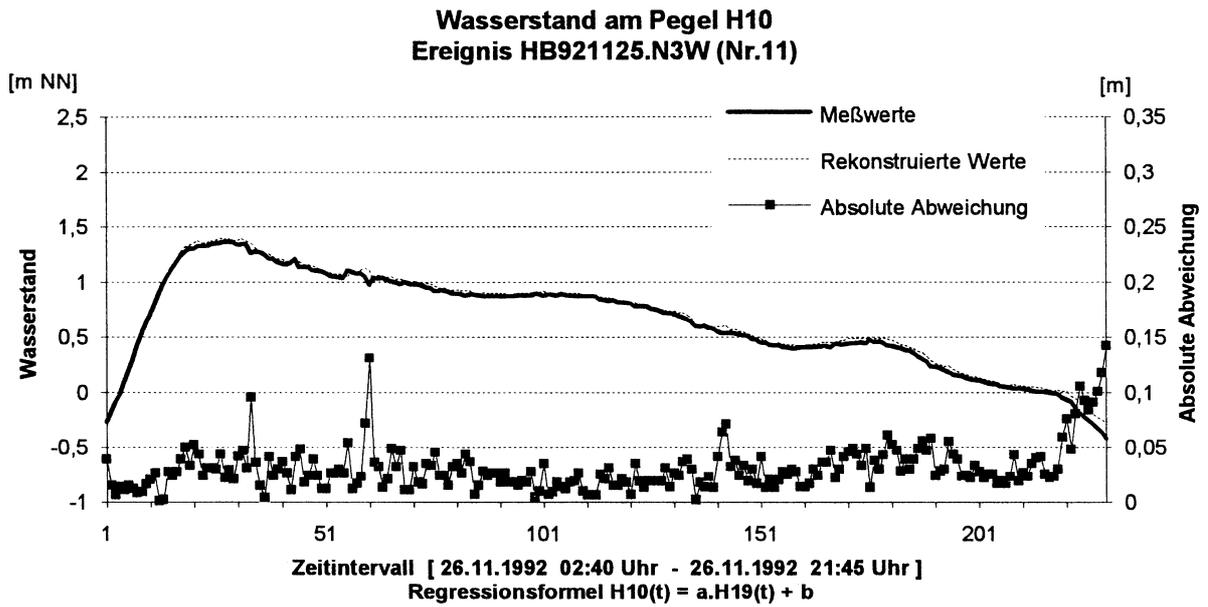


**Wasserstand am Pegel H10  
Ereignis HB921111.N3W (Nr.5)**

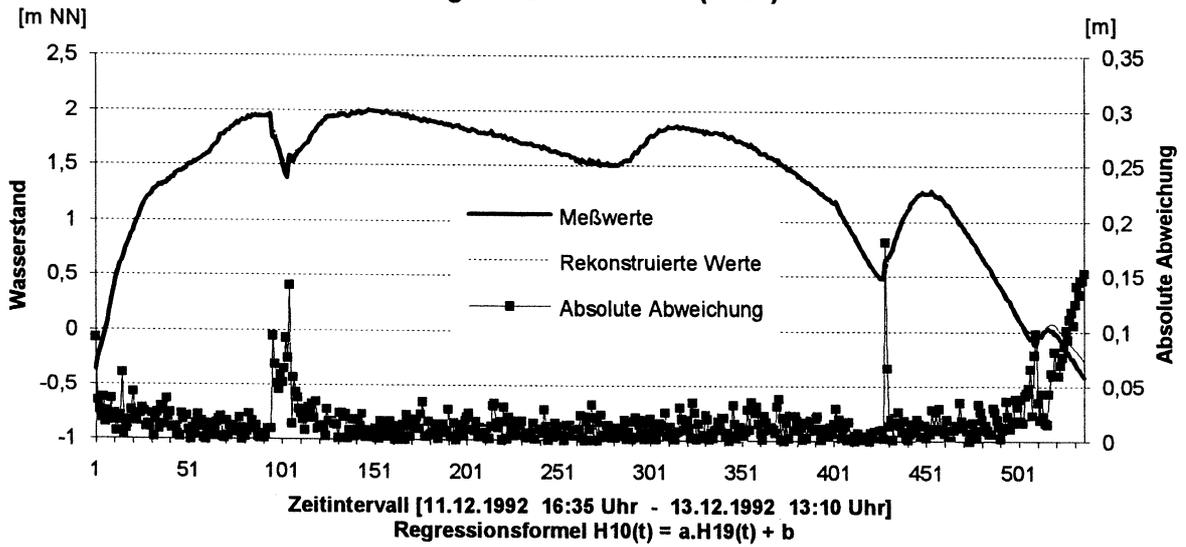


**Wasserstand am Pegel H10  
Ereignis HB921122.N7W (Nr.10)**

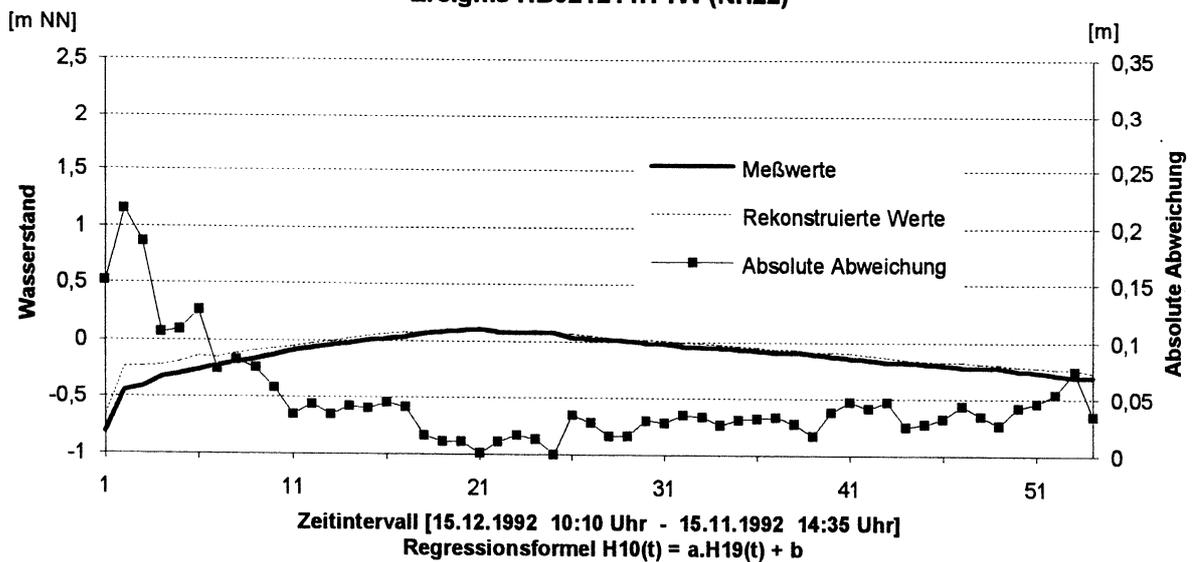




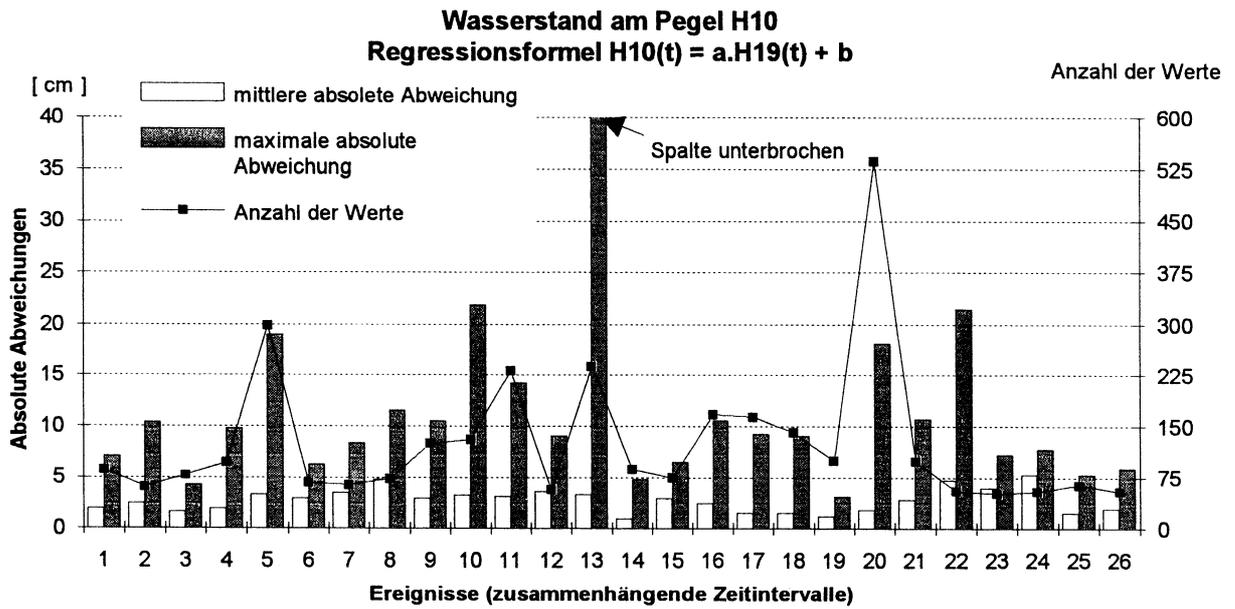
**Wasserstand am Pegel H10  
Ereignis HB921210.T4W (Nr.20)**



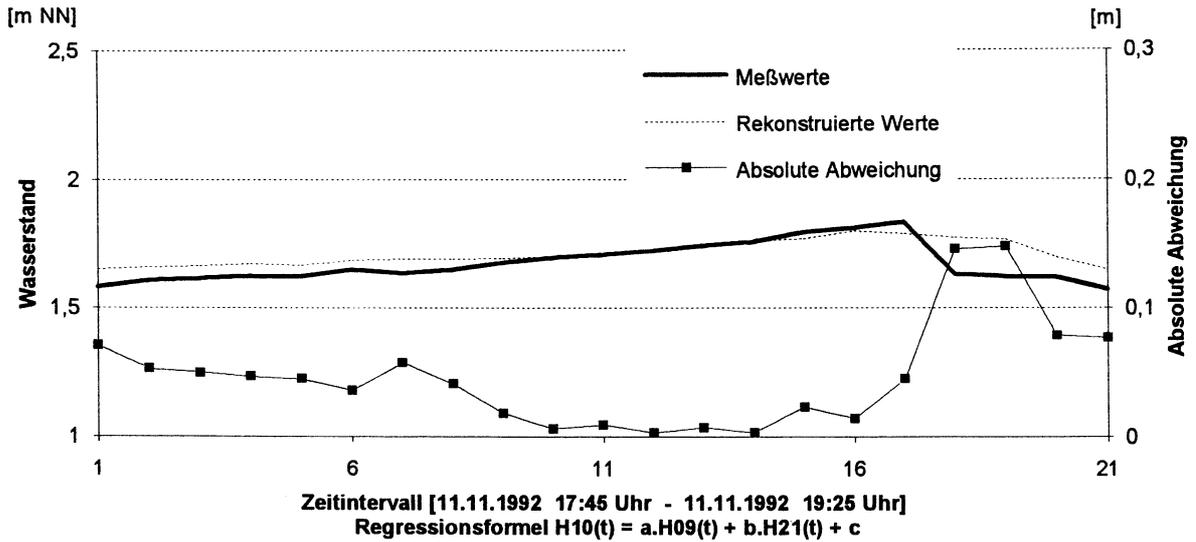
**Wasserstand am Pegel H10  
Ereignis HB921214.T1W (Nr.22)**



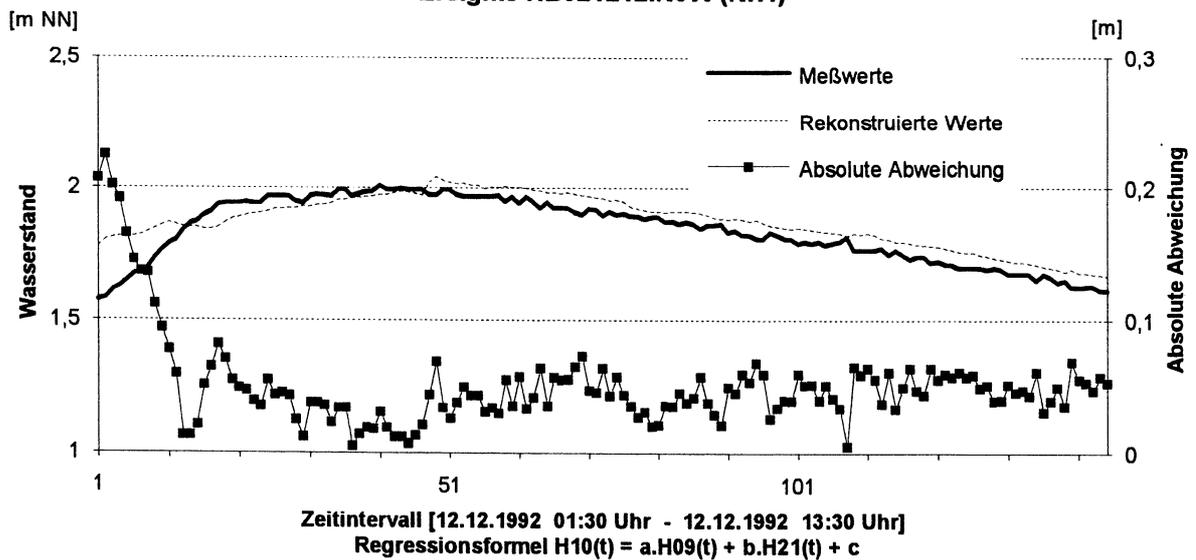
Die letzte Abbildung zeigt einen Überblick über alle 26 Ereignisse, die in die Verifizierung miteinbezogen wurden.

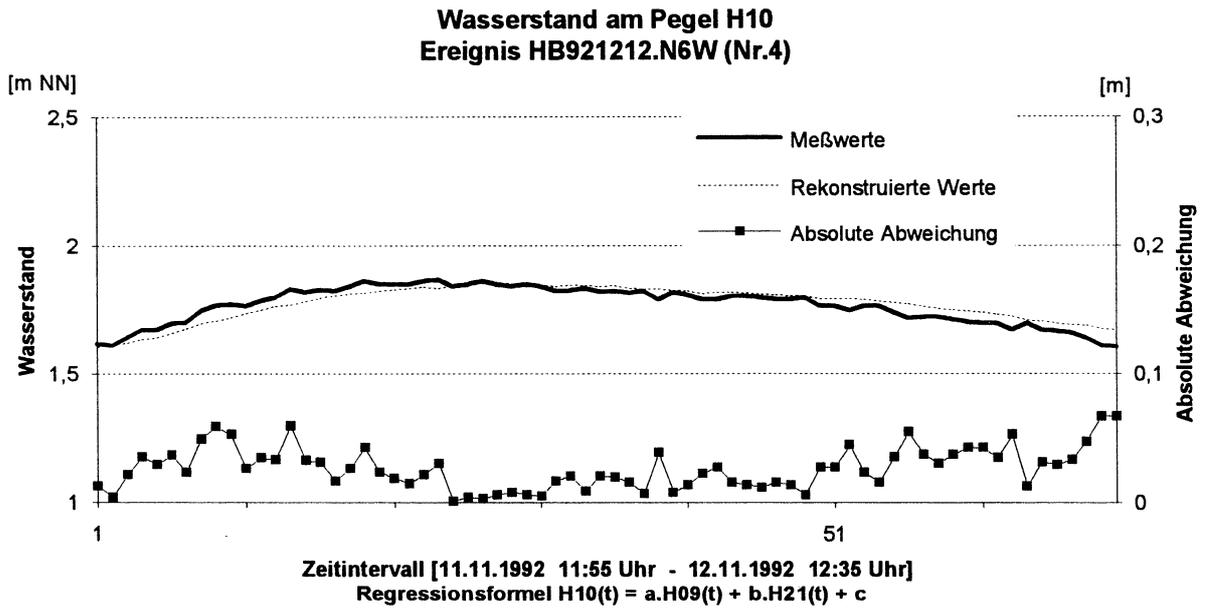


**Wasserstand am Pegel H10  
Ereignis HB921026.N1W (Nr.1)**

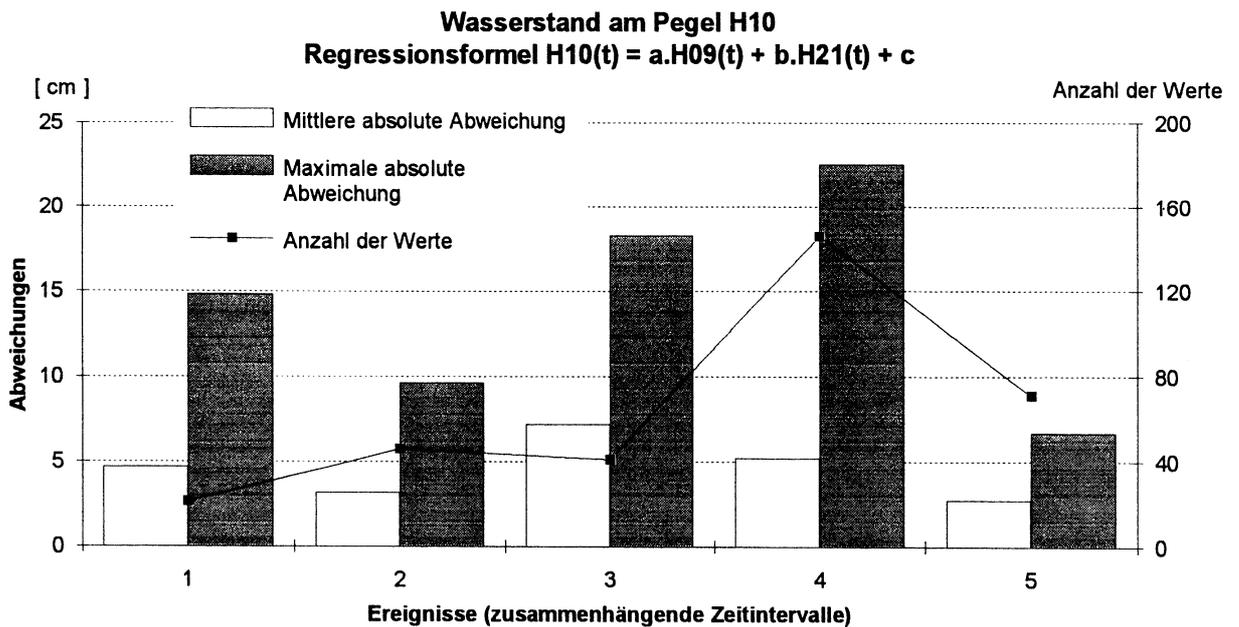


**Wasserstand am Pegel H10  
Ereignis HB921212.N6W (Nr.4)**

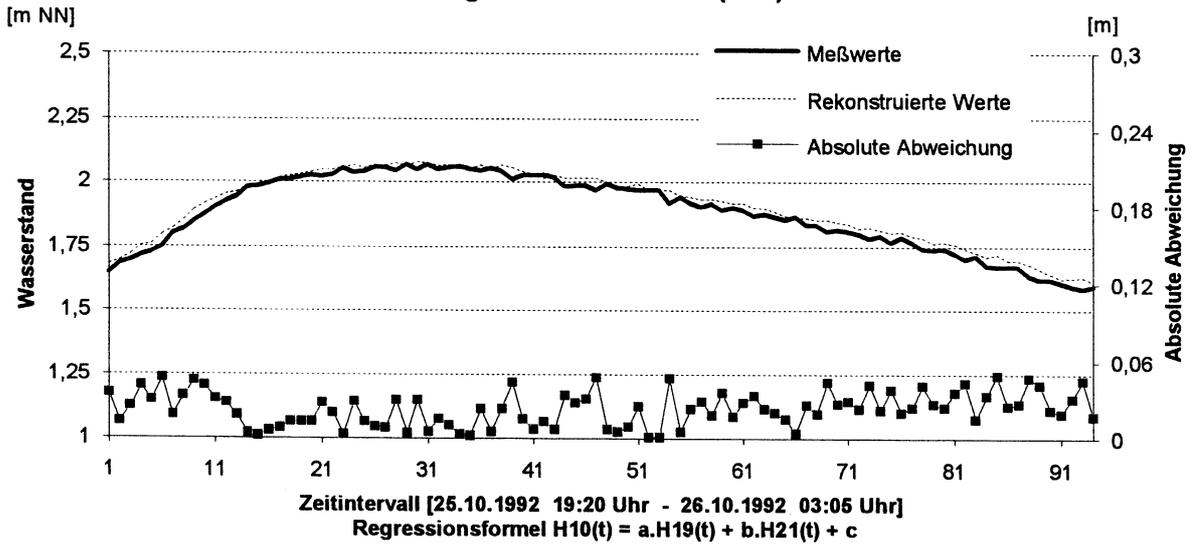




Die letzte Abbildung verschafft einen Überblick über alle 5 Ereignisse, die in die Verifizierung miteinbezogen wurden.



**Wasserstand am Pegel H10  
Ereignis HB921025.N7W (Nr.1)**



**Wasserstand am Pegel H10  
Ereignis HB921111.N3W (Nr.2)**

