



---

**ERMITTLUNG DES BINNENZUFLUSSES ALS GRUNDLAGE FÜR EINEN  
HOCHWASSERALARMPPLAN NORD-OSTSEE-KANAL (NOK)**

---

Auftraggeber: Landesamt für Natur und Umwelt  
des Landes Schleswig-Holstein  
Herr Dr. Hirschhäuser  
Hamburger Chaussee 25  
24220 Flintbek

Auftragnehmer: Golder Associates GmbH  
Kasernenstraße 12  
21073 Hamburg

Projekt-Nr: 08505300334

November 2008



---

## ERMITTLUNG DES BINNENZUFLUSSES ALS GRUNDLAGE FÜR EINEN HOCHWASSERALARMPPLAN NORD-OSTSEE-KANAL (NOK)

---

Auftraggeber: Landesamt für Natur und Umwelt  
des Landes Schleswig-Holstein  
Herr Dr. Hirschhäuser  
Hamburger Chaussee 25  
24220 Flintbek

Auftragnehmer: Golder Associates GmbH  
Kasernenstraße 12  
21073 Hamburg

Projekt-Nr: 08505300334

Angebot vom: 22.04.2008

Auftrag vom: 30.04.2008

Bearbeitungszeitraum: Mai bis November 2008

Berichtsumfang: 76 Seiten, Anlagen

Projektbearbeitung: Dipl.-Ing. Thorsten Evertz

## **INHALTSVERZEICHNIS**

1	Einleitung .....	1
1.1	Veranlassung und Aufgabenstellung .....	1
1.2	Projektgebiet und Analyse der Gebietseigenschaften.....	1
1.3	Betrieb des Nord-Ostsee-Kanals .....	4
2	Datengrundlage und Datenaufbereitung .....	6
2.1	Übersicht der Datengrundlage.....	6
2.2	Landnutzung .....	6
2.3	Pedologie .....	8
2.4	Einzugsgebiete.....	9
2.5	Hydrotope.....	9
2.6	Grundwasser.....	10
2.7	Seenrückhalt .....	10
2.7.1	Wittensee .....	11
2.7.2	Westensee .....	12
2.7.3	Bothkamper See.....	15
2.7.4	Brahmsee.....	18
2.8	Translation und Retention im Gewässer.....	21
2.9	Zeitreihen .....	22
2.9.1	Niederschlagsdaten.....	22
2.9.2	Klimadaten .....	23
2.9.3	Abflüsse und Wasserstände .....	23
3	NA-Modell .....	24
3.1	Theoretische Grundlagen .....	24
3.2	Berücksichtigung der Gerinneretention.....	30
3.3	Zuordnung von Niederschlagsstationen.....	31
3.4	Modelltechnische Abbildung der Schöpfwerke.....	32
3.5	Modellkalibrierung .....	34
3.5.1	Einzugsgebiet der Eider, des Wittensees und des Wardersees.....	36
3.5.2	Einzugsgebiet der Wehrau .....	42
3.5.3	Einzugsgebiet der Jevenau und der westlich gelegenen Zuflüsse.....	43
3.5.4	Einzugsgebiet der Haalerau .....	45
3.5.5	Einzugsgebiet der Gieselau und des Mühlenbachs .....	46
3.5.6	Übertragung der Kalibriergrößen auf das Einzugsgebiet .....	48
3.6	Gesamtzufluss in den NOK .....	49
4	Verfahren zur Abschätzung der Zuflüsse.....	50

4.1	Datengrundlage Niederschlagstationen .....	50
4.2	Pegelkorrelation .....	54
4.3	Entwicklung der Vorhersagediagramme .....	55
4.4	Ergebnisse .....	58
5	Handlungsstrategien.....	67
5.1	Einfluss der Schöpfwerke .....	67
5.2	Fließzeiten im NOK .....	69
5.2.1	Ausbreitung von Wasserspiegeländerungen nach dem Entwässern.....	69
5.2.2	Fließzeiten im NOK unter Annahme stationärer Bedingungen.....	71
6	Literatur .....	75
Anhang	.....	77
Anhang A	Modellgrundlagen .....	77
A1	Retentionskonstanten nach Riek.....	77
A2	Grundwasserzuflüsse und -abflüsse zwischen den Teilgebieten .....	78
Anhang B	Kalibrierung.....	79
Anhang C	Ergebnisse der Kalibrierung.....	80
C1	Bothkamper See (Eider).....	80
C2	Pegel Eiderkaten (Eider) .....	83
C3	Pegel Schmalstede (Eider) .....	85
C4	Pegel Flintbek (Eider) .....	87
C5	Pegel Hammer (Eider) .....	90
C6	Westensee (Eider) .....	93
C7	Wittensee.....	96
C8	Pegel Osterrönfeld (Wehrau) .....	99
C9	Pegel Bokel (Jevenau) .....	102
C10	Pegel Brammer (Jevenau) .....	105
C11	Pegel Jevenstedt (Jevenau).....	108
C12	Pegel Papenau oben (Haalerau).....	111
C13	Pegel Todenbüttel (Haalerau) .....	114
C14	Pegel Wennbüttel.....	117
C15	Pegel Schafstedt.....	119
Anhang D	Datengrundlage Zuflussprognose .....	122
D1	NOK-Ost .....	122
D2	NOK-Mitte/Ost .....	124
D3	NOK-Mitte/West.....	126
D4	NOK-West.....	128
Anhang E	Einzugsgebiet .....	130

**Tabellen**

Tabelle 1:	Versiegelungsgrade der Landnutzungsklassen .....	7
Tabelle 2:	Wasserstands-Volumen-Beziehung Wittensee.....	12
Tabelle 3:	Wasserstands-Volumen-Abfluss-Beziehung Westensee .....	15
Tabelle 4:	Wasserstands-Volumen-Abfluss-Beziehung Bothkamper See .....	18
Tabelle 5:	Wasserstands-Volumen-Abfluss-Beziehung Wardersee .....	21
Tabelle 6:	Übersicht der aktiven Niederschlagsstationen im Einzugsgebiet des NOK..	22
Tabelle 7:	Übersicht vorhandener Pegel im Einzugsgebiet des NOK.....	23
Tabelle 8:	Methoden zur Bestimmung der Kalinin-Miljukow-Parameter .....	31
Tabelle 9:	Im Modell berücksichtigte Schöpfwerke .....	33
Tabelle 10:	Korrelationskoeffizienten für die Paare aller Abflusspegel im Einzugsgebiet des NOK.....	55
Tabelle 11:	Ermittlung der Basiswerte für die Retentionskonstanten.....	77
Tabelle 12:	Definition der Grundwasserfließrichtung im Modell.....	78
Tabelle 13:	Korrekturfaktoren der Retentionskonstanten und der Infiltrationskapazität .....	79

**Abbildungen**

Abbildung 1:	Fließgewässerlandschaften von Schleswig-Holstein aus [7].....	2
Abbildung 2:	Tiefenlinien Wittensee, Umweltbericht des Landes Schleswig-Holstein [7].....	11
Abbildung 3:	Tiefenlinien Westensee, Umweltbericht des Landes Schleswig- Holstein [7].....	13
Abbildung 4:	Lage des Profils Auslauf Westensee.....	14
Abbildung 5:	Tiefenlinien Bothkamper See, Umweltbericht des Landes Schleswig- Holstein [7].....	16
Abbildung 6:	Lage des Profils Auslauf Bothkamper See .....	17
Abbildung 7:	Tiefenlinien Brahmsee mit Wardersee, Umweltbericht des Landes Schleswig-Holstein [7].....	19
Abbildung 8:	Wasserstände Wardersee/Brahmsee aus [7] .....	20
Abbildung 9:	Aufteilung in Abflussbildung und -konzentration (Baumgartner, 1990).....	25
Abbildung 10:	Bodenspeicher .....	26
Abbildung 11:	Funktionelle Abhängigkeiten in der Bodenfeuchte (Ostrowski, 1984) .....	27
Abbildung 12:	Bodenfeuchtebereiche (Bear, 1972).....	27
Abbildung 13:	Oberflächennaher Grundwasserleiter.....	30
Abbildung 14:	Zuordnung der Niederschlagsstationen zu den Teilgebieten.....	32
Abbildung 15:	Füllvolumen Bothkamper See .....	37
Abbildung 16:	Kalibrierung Abflusspegel Eiderkatzen.....	38
Abbildung 17:	Kalibrierung Abflusspegel Schmalstede .....	38

Abbildung 18:	Kalibrierung Abflusspegel Flintbek .....	39
Abbildung 19:	Kalibrierung Abflusspegel Hammer .....	39
Abbildung 20:	Füllvolumen Westensee .....	40
Abbildung 21:	Füllvolumen Wittensee .....	41
Abbildung 22:	Kalibrierung Abflusspegel Osterrönfeld .....	42
Abbildung 23:	Kalibrierung Abflusspegel Bokel .....	43
Abbildung 24:	Kalibrierung Abflusspegel Brammer .....	44
Abbildung 25:	Kalibrierung Abflusspegel Jevenstedt .....	44
Abbildung 26:	Kalibrierung Abflusspegel Papenau oben .....	45
Abbildung 27:	Kalibrierung Abflusspegel Todenbüttel .....	46
Abbildung 28:	Kalibrierung Abflusspegel Wennbüttel .....	47
Abbildung 29:	Kalibrierung Abflusspegel Schafstedt .....	48
Abbildung 30:	Gesamtzufluss in den NOK .....	49
Abbildung 31:	Aktive und online verfügbare Niederschlagstationen .....	51
Abbildung 32:	Verwendung von online-Stationen – Auswirkungen auf den Abfluss (O) .....	52
Abbildung 33:	Verwendung von online-Stationen – Auswirkungen auf den Abfluss (MO) .....	53
Abbildung 34:	Verwendung von online-Stationen – Auswirkungen auf den Abfluss (MW) .....	53
Abbildung 35:	Verwendung von online-Stationen – Auswirkungen auf den Abfluss (W) .....	54
Abbildung 36:	Entwicklung des Vorhersagediagramms NOK-Ost, Vorregen > 20 mm .....	57
Abbildung 37:	Erwarteter Zufluss NOK-Ost; Vorregen 0 - 10 mm .....	59
Abbildung 38:	Erwarteter Zufluss NOK-Ost; Vorregen 10 - 20 mm .....	59
Abbildung 39:	Erwarteter Zufluss NOK-Ost; Vorregen > 20 mm .....	60
Abbildung 40:	Erwarteter Zufluss NOK-Mitte/Ost; Vorregen 0 - 10 mm .....	60
Abbildung 41:	Erwarteter Zufluss NOK-Mitte/Ost; Vorregen 10 - 20 mm .....	61
Abbildung 42:	Erwarteter Zufluss NOK-Mitte/Ost; Vorregen > 20 mm .....	61
Abbildung 43:	Erwarteter Zufluss NOK-Mitte/West; Vorregen 0 - 10 mm .....	62
Abbildung 44:	Erwarteter Zufluss NOK-Mitte/West; Vorregen 10 - 20 mm .....	62
Abbildung 45:	Erwarteter Zufluss NOK-Mitte/West; Vorregen > 20 mm .....	63
Abbildung 46:	Erwarteter Zufluss NOK-West; Vorregen 0 - 10 mm .....	63
Abbildung 47:	Zufluss NOK-West; Vorregen 10 - 20 mm .....	64
Abbildung 48:	Zufluss NOK-West; Vorregen > 20 mm .....	64
Abbildung 49:	Vergleich Gesamtabfluss NOK bei abgeschalteten Schöpfwerken .....	68
Abbildung 50:	Vergleich Gesamtabfluss NOK bei abgeschalteten Schöpfwerken (Kyrill) .....	69
Abbildung 51:	Wasserstandsänderungen Pegel Brunsbüttel und Kiel während Kyrill .....	70
Abbildung 52:	Entwässerung NOK am 17.01.2007; NOK-Pegel .....	71
Abbildung 53:	Kalibrierung Füllvolumen Bothkamper See – Übersicht .....	80
Abbildung 54:	Kalibrierung Füllvolumen Bothkamper See – Hochwasser 1995 .....	80

Abbildung 55:	Kalibrierung Füllvolumen Bothkamper See – Hochwasser 1998 .....	81
Abbildung 56:	Kalibrierung Füllvolumen Bothkamper See – Hochwasser 2002 .....	81
Abbildung 57:	Kalibrierung Füllvolumen Bothkamper See – Hochwasser 2004 .....	82
Abbildung 58:	Kalibrierung Füllvolumen Bothkamper See – Hochwasser 2007 (Kyrill) .....	82
Abbildung 59:	Kalibrierung Abflusspegel Eiderkaten – Übersicht.....	83
Abbildung 60:	Kalibrierung Abflusspegel Eiderkaten – Hochwasser 2002.....	83
Abbildung 61:	Kalibrierung Abflusspegel Eiderkaten – Hochwasser 2004.....	84
Abbildung 62:	Kalibrierung Abflusspegel Eiderkaten – Hochwasser 2007 (Kyrill).....	84
Abbildung 63:	Kalibrierung Abflusspegel Schmalstede – Übersicht .....	85
Abbildung 64:	Kalibrierung Abflusspegel Schmalstede – Hochwasser 2002.....	85
Abbildung 65:	Kalibrierung Abflusspegel Schmalstede – Hochwasser 2004.....	86
Abbildung 66:	Kalibrierung Abflusspegel Schmalstede – Hochwasser 2007 (Kyrill) .....	86
Abbildung 67:	Kalibrierung Abflusspegel Flintbek – Übersicht .....	87
Abbildung 68:	Kalibrierung Abflusspegel Flintbek – Hochwasser 1995 .....	87
Abbildung 69:	Kalibrierung Abflusspegel Flintbek – Hochwasser 1998.....	88
Abbildung 70:	Kalibrierung Abflusspegel Flintbek – Hochwasser 2002 .....	88
Abbildung 71:	Kalibrierung Abflusspegel Flintbek – Hochwasser 2004 .....	89
Abbildung 72:	Kalibrierung Abflusspegel Flintbek – Hochwasser 2007 (Kyrill) .....	89
Abbildung 73:	Kalibrierung Abflusspegel Hammer – Übersicht .....	90
Abbildung 74:	Kalibrierung Abflusspegel Hammer – Hochwasser 1995.....	90
Abbildung 75:	Kalibrierung Abflusspegel Hammer – Hochwasser 1998.....	91
Abbildung 76:	Kalibrierung Abflusspegel Hammer – Hochwasser 2002.....	91
Abbildung 77:	Kalibrierung Abflusspegel Hammer – Hochwasser 2004.....	92
Abbildung 78:	Kalibrierung Abflusspegel Hammer – Hochwasser 2007 (Kyrill) .....	92
Abbildung 79:	Kalibrierung Füllvolumen Westensee – Übersicht .....	93
Abbildung 80:	Kalibrierung Füllvolumen Westensee – Hochwasser 1995.....	93
Abbildung 81:	Kalibrierung Füllvolumen Westensee – Hochwasser 1998.....	94
Abbildung 82:	Kalibrierung Füllvolumen Westensee – Hochwasser 2002.....	94
Abbildung 83:	Kalibrierung Füllvolumen Westensee – Hochwasser 2004.....	95
Abbildung 84:	Kalibrierung Füllvolumen Westensee – Hochwasser 2007 (Kyrill).....	95
Abbildung 85:	Kalibrierung Füllvolumen Wittensee – Übersicht .....	96
Abbildung 86:	Kalibrierung Füllvolumen Wittensee – Hochwasser 1995.....	96
Abbildung 87:	Kalibrierung Füllvolumen Wittensee – Hochwasser 1998.....	97
Abbildung 88:	Kalibrierung Füllvolumen Wittensee – Hochwasser 2002.....	97
Abbildung 89:	Kalibrierung Füllvolumen Wittensee – Hochwasser 2004.....	98
Abbildung 90:	Kalibrierung Füllvolumen Wittensee – Hochwasser 2007 (Kyrill).....	98
Abbildung 91:	Kalibrierung Abflusspegel Osterrönfeld – Übersicht .....	99
Abbildung 92:	Kalibrierung Abflusspegel Osterrönfeld – Hochwasser 1995.....	99

Abbildung 93:	Kalibrierung Abflusspegel Osterrönfeld – Hochwasser 1998 .....	100
Abbildung 94:	Kalibrierung Abflusspegel Osterrönfeld – Hochwasser 2002 .....	100
Abbildung 95:	Kalibrierung Abflusspegel Osterrönfeld – Hochwasser 2004 .....	101
Abbildung 96:	Kalibrierung Abflusspegel Osterrönfeld – Hochwasser 2007 (Kyrill) .....	101
Abbildung 97:	Kalibrierung Abflusspegel Bokel – Übersicht .....	102
Abbildung 98:	Kalibrierung Abflusspegel Bokel – Hochwasser 1995.....	102
Abbildung 99:	Kalibrierung Abflusspegel Bokel – Hochwasser 1998.....	103
Abbildung 100:	Kalibrierung Abflusspegel Bokel – Hochwasser 2002.....	103
Abbildung 101:	Kalibrierung Abflusspegel Bokel – Hochwasser 2004.....	104
Abbildung 102:	Kalibrierung Abflusspegel Bokel – Hochwasser 2007 (Kyrill).....	104
Abbildung 103:	Kalibrierung Abflusspegel Brammer – Übersicht .....	105
Abbildung 104:	Kalibrierung Abflusspegel Brammer – Hochwasser 1995.....	105
Abbildung 105:	Kalibrierung Abflusspegel Brammer – Hochwasser 1998.....	106
Abbildung 106:	Kalibrierung Abflusspegel Brammer – Hochwasser 2002.....	106
Abbildung 107:	Kalibrierung Abflusspegel Brammer – Hochwasser 2004.....	107
Abbildung 108:	Kalibrierung Abflusspegel Brammer – Hochwasser 2007 (Kyrill).....	107
Abbildung 109:	Kalibrierung Abflusspegel Jevenstedt – Übersicht.....	108
Abbildung 110:	Kalibrierung Abflusspegel Jevenstedt – Hochwasser 1995 .....	108
Abbildung 111:	Kalibrierung Abflusspegel Jevenstedt – Hochwasser 1998 .....	109
Abbildung 112:	Kalibrierung Abflusspegel Jevenstedt – Hochwasser 2002 .....	109
Abbildung 113:	Kalibrierung Abflusspegel Jevenstedt – Hochwasser 2004 .....	110
Abbildung 114:	Kalibrierung Abflusspegel Jevenstedt – Hochwasser 2007 (Kyrill) .....	110
Abbildung 115:	Kalibrierung Abflusspegel Papenau oben – Übersicht.....	111
Abbildung 116:	Kalibrierung Abflusspegel Papenau oben – Hochwasser 1995 .....	111
Abbildung 117:	Kalibrierung Abflusspegel Papenau oben – Hochwasser 1998 .....	112
Abbildung 118:	Kalibrierung Abflusspegel Papenau oben – Hochwasser 2002 .....	112
Abbildung 119:	Kalibrierung Abflusspegel Papenau oben – Hochwasser 2004 .....	113
Abbildung 120:	Kalibrierung Abflusspegel Papenau oben – Hochwasser 2007 (Kyrill).....	113
Abbildung 121:	Kalibrierung Abflusspegel Todenbüttel – Übersicht .....	114
Abbildung 122:	Kalibrierung Abflusspegel Todenbüttel – Hochwasser 1995.....	114
Abbildung 123:	Kalibrierung Abflusspegel Todenbüttel – Hochwasser 1998.....	115
Abbildung 124:	Kalibrierung Abflusspegel Todenbüttel – Hochwasser 2002.....	115
Abbildung 125:	Kalibrierung Abflusspegel Todenbüttel – Hochwasser 2004.....	116
Abbildung 126:	Kalibrierung Abflusspegel Todenbüttel – Hochwasser 2007 (Kyrill).....	116
Abbildung 127:	Kalibrierung Abflusspegel Wennbüttel – Übersicht.....	117
Abbildung 128:	Kalibrierung Abflusspegel Wennbüttel – Hochwasser 2002.....	117
Abbildung 129:	Kalibrierung Abflusspegel Wennbüttel – Hochwasser 2004.....	118
Abbildung 130:	Kalibrierung Abflusspegel Wennbüttel – Hochwasser 2007 (Kyrill).....	118

Abbildung 131:	Kalibrierung Abflusspegel Schafstedt – Übersicht .....	119
Abbildung 132:	Kalibrierung Abflusspegel Schafstedt – Hochwasser 1995.....	119
Abbildung 133:	Kalibrierung Abflusspegel Schafstedt – Hochwasser 1998.....	120
Abbildung 134:	Kalibrierung Abflusspegel Schafstedt – Hochwasser 2002.....	120
Abbildung 135:	Kalibrierung Abflusspegel Schafstedt – Hochwasser 2004.....	121
Abbildung 136:	Kalibrierung Abflusspegel Schafstedt – Hochwasser 2007 (Kyrill).....	121
Abbildung 137:	Datengrundlage Zuflussprognose; NOK-Ost, Vorregen 0 - 10 mm.....	122
Abbildung 138:	Datengrundlage Zuflussprognose; NOK-Ost, Vorregen 10 - 20 mm.....	122
Abbildung 139:	Datengrundlage Zuflussprognose; NOK-Ost, Vorregen > 20 mm.....	123
Abbildung 140:	Datengrundlage Zuflussprognose; NOK-Mitte/Ost, Vorregen 0 - 10 mm ...	124
Abbildung 141:	Datengrundlage Zuflussprognose; NOK-Mitte/Ost, Vorregen 10 - 20 mm .	124
Abbildung 142:	Datengrundlage Zuflussprognose; NOK-Mitte/Ost, Vorregen > 20 mm .....	125
Abbildung 143:	Datengrundlage Zuflussprognose; NOK-Mitte/West, Vorregen 0 - 10 mm.	126
Abbildung 144:	Datengrundlage Zuflussprognose; NOK-Mitte/West, Vorregen 10 - 20 mm	126
Abbildung 145:	Datengrundlage Zuflussprognose; NOK-Mitte/West, Vorregen > 20 mm...	127
Abbildung 146:	Datengrundlage Zuflussprognose; NOK-West, Vorregen 0 - 10 mm .....	128
Abbildung 147:	Datengrundlage Zuflussprognose; NOK-West, Vorregen 10 - 20 mm .....	128
Abbildung 148:	Datengrundlage Zuflussprognose; NOK-West, Vorregen > 20 mm .....	129

## **1 Einleitung**

Die GOLDER ASSOCIATES GmbH wurde mit Datum vom 30.04.2008 auf der Basis ihres Angebotes vom 22.04.2008 vom Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein mit der Ermittlung des Binnenzuflusses als Grundlage für einen Hochwasseralarmplan Nord-Ostsee-Kanal (NOK) beauftragt.

### **1.1 Veranlassung und Aufgabenstellung**

Derzeit wird als Grundlage für die Einleitung von Maßnahmen des Krisen- und Katastrophenmanagements durch das Wasser- und Schifffahrtsamt Brunsbüttel in Zusammenarbeit mit der Landesverwaltung Schleswig-Holstein ein Hochwasseralarmplan Nord-Ostsee-Kanal (NOK) entwickelt. Die Ermittlung der Binnenzuflüsse ist ein Baustein davon. Die Ergebnisse werden auch für das planrechtliche Verfahren der vorgesehenen 5. Schleusenkammer genutzt.

Neben der Kenntnis der Binnenzuflüsse besteht das Ziel darin, im Hochwasserfall den Zufluss in den NOK abschätzen zu können. Dazu wird ein deterministisches Niederschlag-Abfluss-Modell für das Einzugsgebiet des NOK aufgestellt. Mit Hilfe des Modells werden Einflussfaktoren wie Pegel- oder Niederschlagsaufzeichnungen identifiziert, mit deren Hilfe eine Abschätzung des zu erwartenden Zuflusses möglich ist.

### **1.2 Projektgebiet und Analyse der Gebietseigenschaften**

Der Nord-Ostsee-Kanal wurde 1895 als Kaiser-Wilhelm-Kanal eröffnet und ist heute die meist befahrene künstliche Wasserstraße der Welt [10]. Der Kanal erstreckt sich von der Elbe bei Brunsbüttel im Westen bis zur Kieler Förde im Osten über eine Länge von 98,7 km [15]. Das Einzugsgebiet der Zuflüsse in den NOK liegt mit einer Gesamtgröße von etwa 1.580 km<sup>2</sup> nördlich des Einzugsgebietes der Stör [9].

Der Nord-Ostsee-Kanal verläuft, beginnend bei Brunsbüttel (Elbe), in nordöstliche Richtung, wo er die Marsch (bis zu -3 m NHN) durchläuft und folgt anschließend den bis zu 25 m hohen Geestrücken. Der Kanal durchfließt die Eiderniederung und knickt bei Rendsburgs nach Osten in das holsteinische Hügelland ab, um bei Kiel an die Ostsee anzuschließen [10]. Die Teileinzugsgebiete der in ihn einmündenden Fließgewässer befinden sich zum hauptsächlichen Teil südlich des Kanals und werden von anschließenden Hügellandschaften eingerahmt.

Sämtliche in Schleswig-Holstein existierenden Landschaftstypen mit ihren charakteristischen Fließgewässern werden so durchlaufen. Herauszustellen sind die Landschaften der Hohen Geest und des Östlichen Hügellandes, deren Flächenanteil jeweils etwa 40% beträgt. Einen guten Überblick über die Landschaftstypen gibt die Abbildung 1.

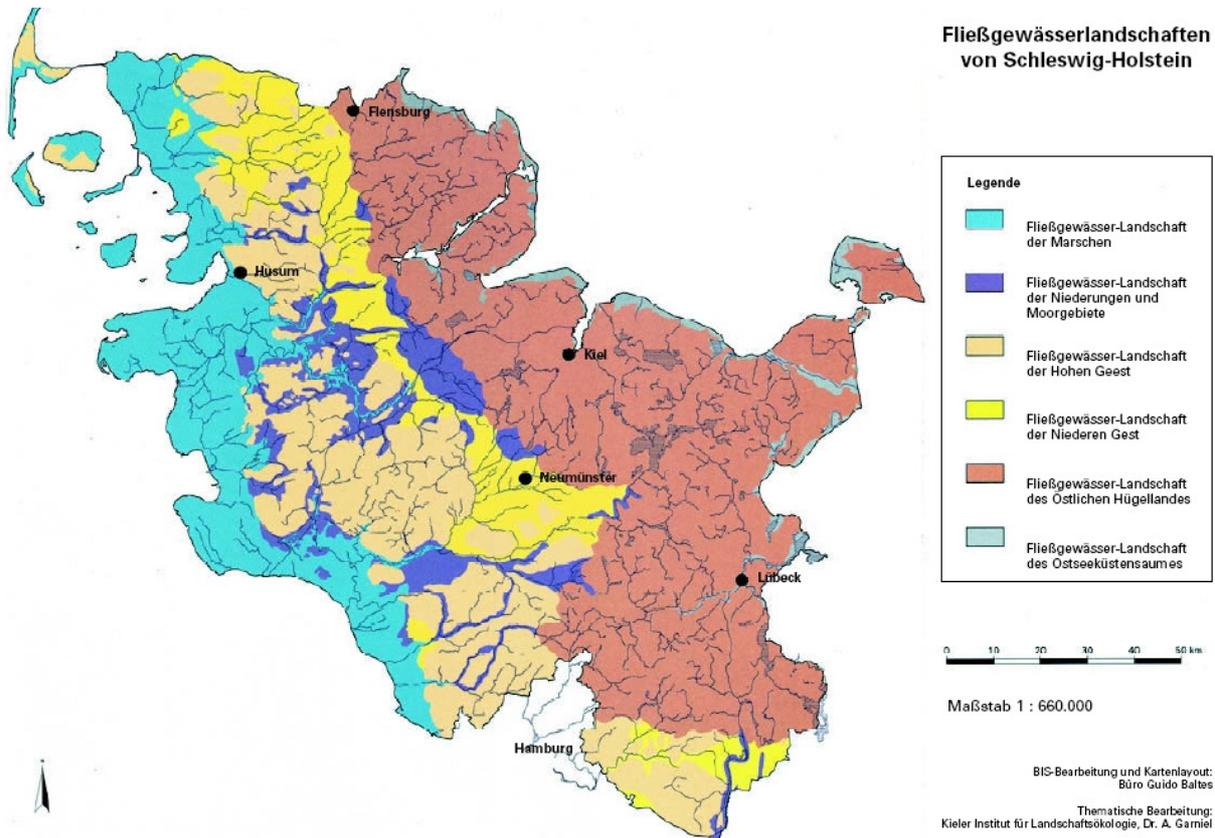


Abbildung 1: Fließgewässerlandschaften von Schleswig-Holstein aus [7]

Das östliche Hügelland ist stark eiszeitlich geprägt und entstand aus Ablagerungen von Jungmoränen durch die sich zurückziehenden Gletscher. Später hat abfließendes Schmelzwasser Täler erodiert und tiefe Rinnen geschaffen, die zum Teil heute noch Bestandteil des Gewässernetzes sind. Weiterhin hat der Anstieg des Meeresspiegels (Transgression), wodurch Meerwasser in die Rinnen flutete, zu Umformungsprozessen geführt [1].

Das sich im Westen anschließende Geestgebiet im Innern des Landes untergliedert sich in Niedere Geest (Vorgeest) und Hohe Geest. Die Niederungen der Niederen Geest wurden wie die Erhebungen der Hohen Geest mit Flugsanden überdeckt, wobei sich die Hohe Geest zuvor aus Altmoränen entwickelte [1]. An der Nordseeküste schließt sich das Marschgebiet an,

welches nahezu ohne Erhebungen ist. Teilweise liegt die Marsch unterhalb des Meeresspiegelniveaus und unterliegt starken Tideinflüssen [2].

Das Östliche Hügelland ist durch Ton, Feinsand und Geschiebe geprägt. Die Böden liegen oftmals über Geschiebemergel; dieses mergelige, lehmige (zum Teil tonige) Material gilt als Ausgangssediment. In der Hohen und Niederen Geest sind überwiegend sandige, kiesige Böden und Schwemmsande sowie vereinzelt anthropogen beeinflusste Moorgebiete anzutreffen [13]. Marschböden sind Ablagerungen aus Feinsand und Schlick an gezeitenaktiven Flachküsten und in Flussmündungen. Niederungen und Moore weisen Böden mit hohem Anteil an organischem Material auf [1]. Vielerorts können Inseln unterschiedlichster Bodenarten vorkommen.

Insgesamt steigt das Einzugsgebiet in östliche Richtung von Meeresspiegelniveau bis auf die Erhebungen des Östlichen Hügellandes stetig an. Darin begründet sich unter anderem ein deutliches West-Ost-Gefälle der mittleren Jahresniederschlagssummen. Während im Gebiet der Hohen Geest etwa 800 mm/a Niederschläge zu verzeichnen sind, fällt beispielsweise auf der Insel Fehmarn im gleichen Zeitraum weniger als 600 mm/a Niederschlag [3].

Schleswig-Holsteins Klima wird durch die planetarische Westwindzone beeinflusst. Neben der Westwetterlage treten immer wieder Ostwetterlagen auf, weshalb das Abflussgeschehen in erster Linie von den Niederschlagsereignissen abhängt [14]. Rund zwei Drittel des Landes, dessen Hauptwasserscheide im Osten liegt, entwässern zur Nordsee. Ansonsten sind die Wasserscheiden nicht klar ausgeprägt. Insbesondere im Hügelland besteht eine häufig wechselnde Abflussrichtung, während im Westen das Gewässernetz strukturierter ist [1].

Fast alle Einzugsgebiete der Fließgewässer sind eher kleinräumig. Die Fließgewässer haben selten Sohlbreiten von mehr als zwei Metern.

Das Abflussgeschehen im Östlichen Hügelland ist sehr unterschiedlich, was auf den heterogenen Aufbau der oberen Bodenschichten zurückzuführen ist.

Niedrige Oberflächenabflüsse sind im Geestgebiet zu verzeichnen, da die oberflächennahen sandigen Bodenschichten eine hohe Infiltrationsrate haben. Weiterhin wird die Versickerung durch eine geringere Reliefenergie gefördert.

Im Marschgebiet, wo das Grundwasser bodennah ansteht, ist zunächst mit einem hohen Oberflächenabfluss zu rechnen. In Marschgebieten mit einem dichten Graben- und Drännetz

kann es zu vergleichsweise hohen Abflussraten in den Gerinnen kommen. Aufgrund von Bodenabsenkungen liegen weite Gebiete unterhalb des Meeresspiegels und müssen mit Deichen, Sielen, Pumpwerken u.a. geschützt werden. Eine Entwässerung in den NOK wird über Pumpwerke gewährleistet.

### 1.3 Betrieb des Nord-Ostsee-Kanals

Das Wasser- und Schifffahrtsamt Brunsbüttel ist verantwortlich für das Einhalten des Wasserstandes (WST) im Nord-Ostsee-Kanal. Die WST werden von den folgenden fünf Pegeln erfasst und registriert: Kiel-Holtenau, Königsförde, Breiholz, Dückerwisch und Brunsbüttel [10]. Der festgesetzte Betriebswasserstand des NOK hat eine bezogene Wasserspiegelhöhe von Normalhöhennull (NHN) = 0,00 m, wobei der Pegelnullpunkt (PN) auf NHN = 5,00 m festgelegt ist. Dieser darf nur bedingt um max. 0,20 m im Vergleich zum niedrigsten zulässigen Pegelwert unterschritten werden [5]. Aus planfestgestellten, wasserwirtschaftlichen und sicherheitsrelevante Gründen muss der Wasserstand auf gleichbleibendem Niveau gehalten werden. Dies erfolgt durch eine gesteuerte Entwässerung. Der Kanal ist so zu entwässern, dass ein durchgehender Wasserstand auf PN = 4,90 m (NHN = -0,10 m) eingehalten wird [5].

Die hierbei unvermeidlichen Wasserstandsschwankungen auf der Strecke sollen grundsätzlich

- PN + 4,80 m (NHN -0,20 m) nicht unterschreiten
- PN + 5,10 m (NHN +0,10 m) nicht überschreiten.

Die Entwässerung in Brunsbüttel ist spätestens zu beenden, wenn für den NOK-Fernpegel Brunsbüttel der Wasserstand PN = 4,80 m (NHN = -0,20 m) angezeigt wird.

Die Entwässerung in Kiel-Holtenau ist spätestens zu beenden, wenn für den NOK-Fernpegel Kiel-Holtenau der Wasserstand PN = 4,80 m (NHN = -0,20 m) angezeigt wird [5].

In baustatischer Hinsicht ist eine Unterschreitung des NHN um 0,20 m Wasserstand bereits kritisch. Aus Gründen der Verkehrssicherheit der Schifffahrt gibt es bei NHN = -0,40 m ein Verbot des Einlaufens in die Schleusen sowie des Auslaufens [11].

Ein Wasserstand PN = 5,40 m tritt zumeist in Verbindung mit einer Sturmflut in der Nordsee auf, wenn eine Entwässerung in Brunsbüttel unausweichlich ist [10]. Ab einem Mittelwert aller fünf Pegelmessstellen von PN = 5,60 ist keine Schifffahrt im Kanal zulässig [12].

Das Einzugsgebiet der Zuflüsse im NOK umfasst eine Fläche von etwa 1.580 km<sup>2</sup> und setzt sich aus einem stark gegliederten Gewässernetz zusammen. Daraus erhält der NOK, ausgehend von einer mittleren Abflussspende von 13,5 l/s km<sup>2</sup>, einen mittleren Jahreszufluss von 21,3 l/s. Im vieljährigen Mittel entspricht dies einer Jahressumme von ca. 673 Mio. m<sup>3</sup> [10].

Die Entwässerung hat so zu erfolgen, dass die Schifffahrt so gering wie möglich beeinträchtigt wird. Eine regelmäßige Entwässerung über die Schleusen in Brunsbüttel ist im freien Gefälle, aufgrund der Tide aber nur bedingt möglich [10]. Der mittlere Tidehochwasserstand der Elbe bei Brunsbüttel liegt bei ca. 1,50 m über dem WSP des NOK, der mittlere Tideniedrigwasserstand ca. 1,20 m darunter. Somit steht nur ein Drittel der Zeit (3 h 30 min pro Tide) zur Entwässerung zur Verfügung [10]. Zur geordneten Wasserstandshaltung dienen die Entwässerungsschütze in den Ebbetoren bei Brunsbüttel, das Entwässerungssiel bei Kiel und das Siel am Alten Eiderkanal.

Die Fließrichtung lässt sich aus den Abflussleistungen der Schütze bei Brunsbüttel und des Sieles bei Kiel ableiten. Damit ergibt sich eine klare Fließrichtung von der Ostsee zur Nordsee mit einer mittleren Fließgeschwindigkeit von ca. 0,30 m/s [10].

## 2 Datengrundlage und Datenaufbereitung

### 2.1 Übersicht der Datengrundlage

Für die Aufstellung des NA-Modells wird auf eine Vielzahl unterschiedlicher Daten zugegriffen:

- Topografische Daten (DGK5, TK25, Gewässerkundliches Flächenverzeichnis)
- Digitale Höhendaten (50-m-Raster)
- Meteorologische Daten
- Hydrologische Daten
- Landnutzungsdaten (ATKIS)
- Pedologische und geologische Daten (BÜK)
- Repräsentative Vermessungsdaten von Gewässerabschnitten

### 2.2 Landnutzung

Für das Einzugsgebiet liegt die Landnutzungsinformation als ATKIS-Daten vor. Die Nutzungsinformationen sind thematisch gegliedert in verschiedenen Folien abgelegt, die jeweils als einzelne Shape-Datei zur Verfügung stehen.

Innerhalb der einzelnen Folien sind bestimmte Flächen doppelt abgelegt. So liegen beispielsweise in der Folie 101 ein wesentlicher Anteil der Flächen mit der Nutzung „2101 Ortslage“ daneben als weitere Fläche mit der Nutzung „2102 Wohnplatz“ vor. Dies hat zur Folge, dass einerseits den entsprechenden Flächen keine eindeutige Nutzung zuzuweisen ist. Andererseits ergeben sich durch übereinander liegende Flächen falsche Flächensummen für das Einzugsgebiet.

Das Problem der übereinander liegenden Teilflächen besteht nicht nur innerhalb der einzelnen ATKIS-Folien sondern auch bei der Kombination der Folien mit den im vorangehenden Absatz beschriebenen Problemen für diese Anwendung.

Es wurde wie folgt vorgegangen. Alle ATKIS-Folien wurden in die Anzahl der enthaltenen verschiedenen Nutzungstypen aufgeteilt, in einzelnen Dateien (shape) abgelegt und anschließend wieder zusammengesetzt. Dabei wurden die in den Attributen enthaltenen Landnutzungs-Informationen so wieder aneinandergesetzt, dass überlappende Flächen nicht vorkom-

men, sondern die mehrfach vorliegenden Informationen in den Attributtabelle abgelegt sind. Diese wurden in der Rangfolge überschrieben, die auch in der Struktur des Objektartenkataloges des Basis-DLM vorliegt. Dieses Vorgehen wurde zunächst innerhalb der ATKIS-Folien, anschließend auch bei der Überlagerung der Folien angewendet. Im Ergebnis steht eine Datei (shape) zur Verfügung, in der flächeneindeutig eine Nutzung zugewiesen ist.

Da kein Schlüssel für die Übersetzung der in ATKIS enthaltenen Informationen in die von KALYPSO verarbeiteten Landnutzungsklassen vorlag, ist eine entsprechende Zuordnung der ATKIS-Informationen zu den Klassen nach Berlekamp und Pranzas (KALYPSO) definiert worden. Eine Übersicht der verwendeten Nutzungsklasse ist in Tabelle 1 gegeben.

Zur Vorbereitung der Daten für den KALYPSO-Import ist dieser Schlüssel entsprechend der Formatanforderungen von KALYPSO den Attributen der Landnutzungsdatei beigefügt worden.

Tabelle 1: Versiegelungsgrade der Landnutzungsklassen

TUHH-Klasse	Beschreibung	Versiegelungsgrad
1	Einzelhaus	27,80%
2	Neue Zeilenbebauung	40,80%
3	Hochhaus	50,30%
4	Neue Randbebauung	60,60%
5	Blockbebauung mit Neubauten	80,80%
6	Grosse Bildungseinrichtungen	59,00%
7	Verwaltung	78,20%
8	Industrie	70,80%
9	Sonstiges Gewerbe	72,90%
10	Sportanlagen, Deichanlagen	35,60%
11	Schienenverkehrsflächen	13,70%
12	Grün-u.Parkanlagen	19,60%
13	Kleingartenanlagen	2,90%
14	Acker-u.Gartenland	0,00%
15	Grünland	0,00%
16	Laubwald	0,00%
17	Mischwald	0,00%
18	Wasserflächen	0,00%
19	Straßen und Plätze	95,00%
20	Nutzung unbekannt	56,10%
21	Wege	0,00%
22	Wasserflächen RHB's	100,00%
23	Nadelwald	0,00%
24	Gehölz, Gebüsch	0,00%
25	Flughafengelände	40,80%

Die Kanalisation der städtischen Bereiche im Einzugsgebiet (z.B. Kiel und Rendsburg) wurde nicht in der Schärfe der Kanaleinzugsgebiete aufgelöst, sondern über eine entsprechende Berücksichtigung als prozentual versiegelte Fläche im Modell berücksichtigt.

### 2.3 Pedologie

Für das Modellgebiet stand zur Ableitung der benötigten pedologischen Informationen die Bodenübersichtskarte (BÜK) zur Verfügung. Im NA-Modell wird ausschließlich die oberste Bodenschicht mit einer Tiefe von einem Meter betrachtet.

Zur Erstellung der Hydrotupe (hydrologisch gleichwertige Flächeneinheiten) wird neben einer flächigen Auflösung von aggregierten Nutzungstypen (Kapitel 2.2) auf Basis von ATKIS-Daten<sup>1</sup> das Bodenkartenwerk der BÜK200<sup>2</sup> verwendet.

In der BÜK200 wird die Verbreitung und Vergesellschaftung von Böden mit den wichtigsten pedogenetischen und substratgenetischen Attributen einheitlich für Deutschland im Maßstab 1 : 200.000 dargestellt. Die Datensätze werden bei den zuständigen Fachbehörden der Länder in der zugehörigen Flächendatenbank abgeleitet und verwaltet. Der Detaillierungsgrad der BÜK200 umfasst neben den Leitböden auch die Bodenvergesellschaftungen (Leit- und Begleitböden), um die Variabilität der Bodendecke wiederzugeben.

Die Böden werden dazu als Bodenformen beschrieben, die aus einer Kombination von bodensystematischer Einheit und substratsystematischer Einheit bestehen. Den unterschiedlichen Bodenformen sind klassifizierte Flächenanteile der Begleitböden in der BÜK200 zugewiesen, um die zugeordneten bodenkundlichen Parameter entsprechend des Verbreitungsgrades gewichten zu können. Die Schichtenfolge der Begleitböden reicht bis zu einer Tiefe von 2,0 m.

Das verwendete NA-Modell benötigt zur Simulation des Bodenwasserhaushalts die nicht direkt in der Flächendatenbank erfassten bodenspezifischen Parameter: Welkpunkt, Feldkapazität, max. Porenvolumen sowie Durchlässigkeit (über den  $k_f$ -Wert). Diese Parameter werden modellintern in einer Datenbank für definierte Böden vorgehalten und über eine Verknüpfung in den Hydrotopattributen der Berechnung zugeführt. Mit Stand Juni 2008 sind in der KALYPSO-Datenbank nur aufbereitete Leitböden für das Einzugsgebiet des Gewässers Krückau in

---

<sup>1</sup> Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem

<sup>2</sup> Bodenübersichtskarte

Schleswig-Holstein durch die TUHH<sup>3</sup> eingepflegt worden. Im Einzugsgebiet des NOK liegen 44 weitere Leitböden vor. Diese wurden durch den AN entsprechend des nachfolgend beschriebenen Verfahrens, das im Rahmen des Projektes „Überprüfung und Neufestlegung der Überschwemmungsgebiete an der Krückau“ durch die Planungsgemeinschaft „Überschwemmungsgebiete an der Krückau“ entwickelt wurde, aufbereitet. Die modellrelevanten bodenkundlichen Parameter wurden dazu je Begleitboden aus der bodenkundlichen Kartieranleitung [6] ermittelt und digital als neue Datentabelle in die zur Verfügung stehende Flächendatenbank aufgenommen. Auch für die NA-Simulation am NOK wird ein 3-schichtiger Bodenaufbau gewählt. Entsprechend der Flächendatenbank werden die Horizontschichten mit einer Mächtigkeit von 0,3 m, 0,4 m und 0,5 m vorgesehen. Nach Zuordnung der zum jeweiligen Begleitboden gehörigen modellrelevanten Bodenparameter wurde eine Wichtung dieser Parameter auf Basis der Flächenanteile der Begleitböden innerhalb eines Leitbodens vorgenommen, um einen einheitlichen Datensatz je Leitboden zu erhalten. Diese Datensätze wurde abschließend durch den AN in die KALYPSO-Datenbank eingepflegt.

## 2.4 Einzugsgebiete

Für die Festlegung der äußeren Grenzen des Modellgebietes und der Teileinzugsgebiete sind neben Informationen zur Topografie auch die Gewässerstruktur, Seen mit hydrologisch relevantem Rückhaltevermögen und Pegel herangezogen worden.

Für das Einzugsgebiet des NOK wurden die digital vorliegenden Teileinzugsgebietsgrenzen (GFV 5) entsprechend der oben aufgeführten Kriterien aggregiert. Dies führt zu Teilgebietsgrenzen an den berücksichtigten Seen, Abflusspegeln und berücksichtigten Flussgabelungen.

Das etwa 1.580 km<sup>2</sup> große Modellgebiet wurde in 49 Teilgebiete unterteilt. Die Größe der Teilgebiete liegt zwischen 5 km<sup>2</sup> und 62 km<sup>2</sup>. Die Anordnung der Teilgebiete und deren Nummerierung sind in Anhang E dargestellt.

## 2.5 Hydrotope

Hydrotope sind Flächen mit gleichen hydrologischen und hydrogeologischen Eigenschaften. Neben der Zuordnung zu dem gleichen Teilgebiet und somit zu dem gleichen Gewässersystem definieren sich die Hydrotope über gleichartige Nutzungsklassen und Bodentypen.

---

<sup>3</sup> Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Wasserbau

Grundlage für die Erstellung der Hydrotope sind die Datensätze für die Pedologie, Landnutzung und Teilgebiete. Diese werden miteinander in ArcView zu dem Datensatz Hydrotope verschnitten.

Die Hydrotopdatei bildet eine der Eingabedateien für KALYPSO.

## **2.6 Grundwasser**

Die Basisabflussanteile in der hydrologischen Modellierung mit KALYPSO werden auch durch Grundwasserzuflüsse bzw. -abflüsse in bzw. aus benachbarten Teilgebieten beeinflusst. Daher ist es notwendig, Kenntnisse über die zu erwartende Fließrichtung oberflächennaher Grundwasseranteile zu haben und diese in der Modellvernetzung entsprechend zu berücksichtigen. Die notwendigen Informationen liefern im Idealfall Grundwassergleichenpläne, die für das Einzugsgebiet des NOK nicht zur Verfügung stehen. Stattdessen wurde durch das LANU die Information bereitgestellt, dass vereinfachend von einer Fließrichtung des oberflächennahen Grundwassers im Einzugsgebiet des NOK zum Kanal hin ausgegangen werden kann. Diese Annahme konnte durch einige vorliegende Messstellen des oberflächennahen Grundwasserleiters plausibilisiert werden. In der Anlage A2 ist die im Modell vorgenommene Grundwasseraufteilung zwischen den Teilgebieten dargestellt.

## **2.7 Seenrückhalt**

Im Einzugsgebiet des NOK befinden sich vier Seen, die aufgrund ihrer erwarteten nennenswerten Retentionswirkung auf die durchfließenden Gewässer im Modell als Rückhalteraum abgebildet werden. Diese sind der Wittensee, der Westensee, der Brahmsee und der Bothkamper See.

Der hydrologische Modellansatz in KALYPSO berücksichtigt den Seenrückhalt über eine Wasserstands-Volumen-Beziehung und eine Wasserstands-Abfluss-Beziehung.

Die Wasserstands-Volumen-Beziehung wird in den nachfolgenden Abschnitten für die im Modell berücksichtigten Seen durch eine Betrachtung der Seefläche, der mittleren Wasserstände und der Tiefenlinien der Seen [7] bestimmt. Für die zu bestimmende funktionale Abhängigkeit werden keine realen Wasservolumina des Seeinhaltes bestimmt, sondern die Betrachtung auf den zu erwartenden Schwankungsbereich beschränkt.

Die Wasserstands-Abfluss-Beziehung wird unter Zuhilfenahme charakteristischer Gewässerquerprofile im Bereich des Auslaufs aus dem See durch eine Spiegellinienberechnung bestimmt.

### 2.7.1 Wittensee

Der Wittensee liegt im Einzugsgebiet der Schirnauer Au und hat gemäß Digitalem Anlagenverzeichnis (DAV) eine Fläche von 9,9 km<sup>2</sup>. Es wird angenommen, dass diese Fläche bei einem mittleren Wasserstand eingenommen wird. Der mittlere Seewasserstand liegt sowohl über die Jahre 2006 bis 2007, als auch über die gesamte vorliegende Pegelaufzeichnung zwischen den Jahren 1984 und 2008 bei 3,85 müNN. In diesem Zeitraum liegt der maximal aufgetretene Wasserstand bei 4,19 müNN, der minimale Wasserstand bei 3,65 müNN.

Die Tiefenverhältnisse des Wittensees gehen aus Abbildung 2 hervor.

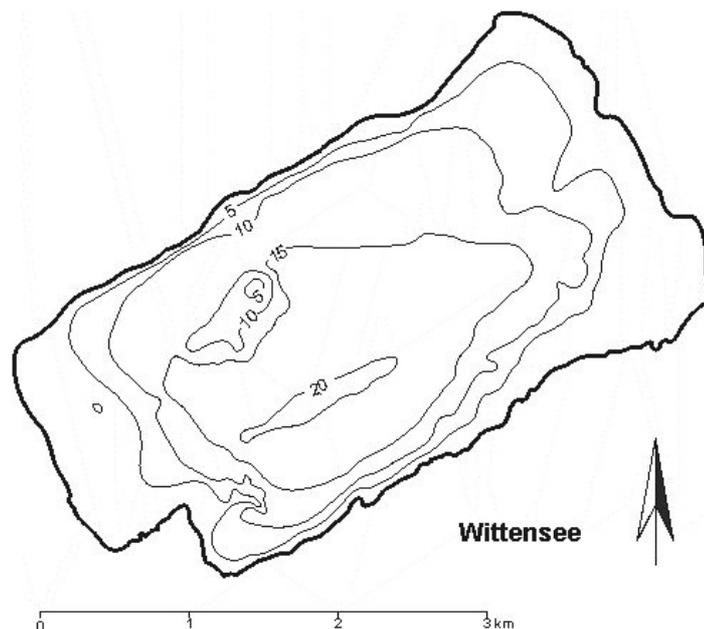


Abbildung 2: Tiefenlinien Wittensee, Umweltbericht des Landes Schleswig-Holstein [7]

Es wird für die Volumenberechnung rechnerisch eine Betrachtung der Seewasserstände größer als 0 müNN durchgeführt und der Wittensee vereinfachend als Rechteck mit der Länge  $l$  von 4.500 m und der Breite  $b$  von 2.200 m betrachtet. Aus Abbildung 2 folgt ein Böschungsge-

fälle von etwa 1:80 und 1:25 für l und b. Damit ergeben sich die nachfolgend dargestellten Volumina bei den zu erwartenden Wasserständen.

Tabelle 2: Wasserstands-Volumen-Beziehung Wittensee

<b>Wasserstand [cm]</b>	<b>Volumen [m<sup>3</sup>]</b>
360	31.502.772
365	31.989.987
370	32.478.600
375	32.968.613
380	33.460.026
385	33.952.842
390	34.447.062
395	34.942.688
400	35.439.720
405	35.938.161
410	36.438.012
415	36.939.275
420	37.441.950
425	37.946.040
430	38.451.546

### 2.7.2 Westensee

Der Westensee liegt im Einzugsgebiet der Eider und hat (gemäß DAV) eine Fläche von 6,9 km<sup>2</sup>. Es wird angenommen, dass diese Fläche bei einem mittleren Wasserstand eingenommen wird. Der mittlere Seewasserstand liegt sowohl über die Jahre 2006 bis 2007, als auch über die gesamte vorliegende Pegelaufzeichnung zwischen den Jahren 1984 und 2008 bei 6,59 müNN. In diesem Zeitraum liegt der maximal aufgetretene Wasserstand bei 7,05 müNN, der minimale Wasserstand bei 6,39 müNN.

Die Tiefenverhältnisse des Westensees gehen aus Abbildung 3 hervor. Da die Form des Sees sehr unregelmäßig ist, wird die Volumenbestimmung ausgehend von der Uferlinie vorgenommen. Aus der Flächendarstellung des Westensees im DAV wird mit Hilfe von GIS-Operationen eine Uferlänge von ca. 22,65 km ermittelt.



Abbildung 3: Tiefenlinien Westensee, Umweltbericht des Landes Schleswig-Holstein [7]

Es wird für die Volumenberechnung rechnerisch eine Betrachtung der Seewasserstände größer als 6,30 mÜNN durchgeführt. Ausgehend von einem mittleren Böschungsgefälle von 1:40 werden Flächen- und Volumenänderungen in Abhängigkeit des Wasserstandes bestimmt. Damit ergeben sich die in Tabelle 3 dargestellten Volumina bei den zu erwartenden Wasserständen.

Die Beziehung zwischen Wasserstand und dem Ablauf aus dem See (W-Q-Beziehung) wird mit einer Spiegellinienberechnung erstellt. Dazu wird das in Abbildung 4 dargestellte, vom LANU vermessene Profil verwendet, das sich etwa 1.900 m im Unterwasser vom Seeablauf befindet.

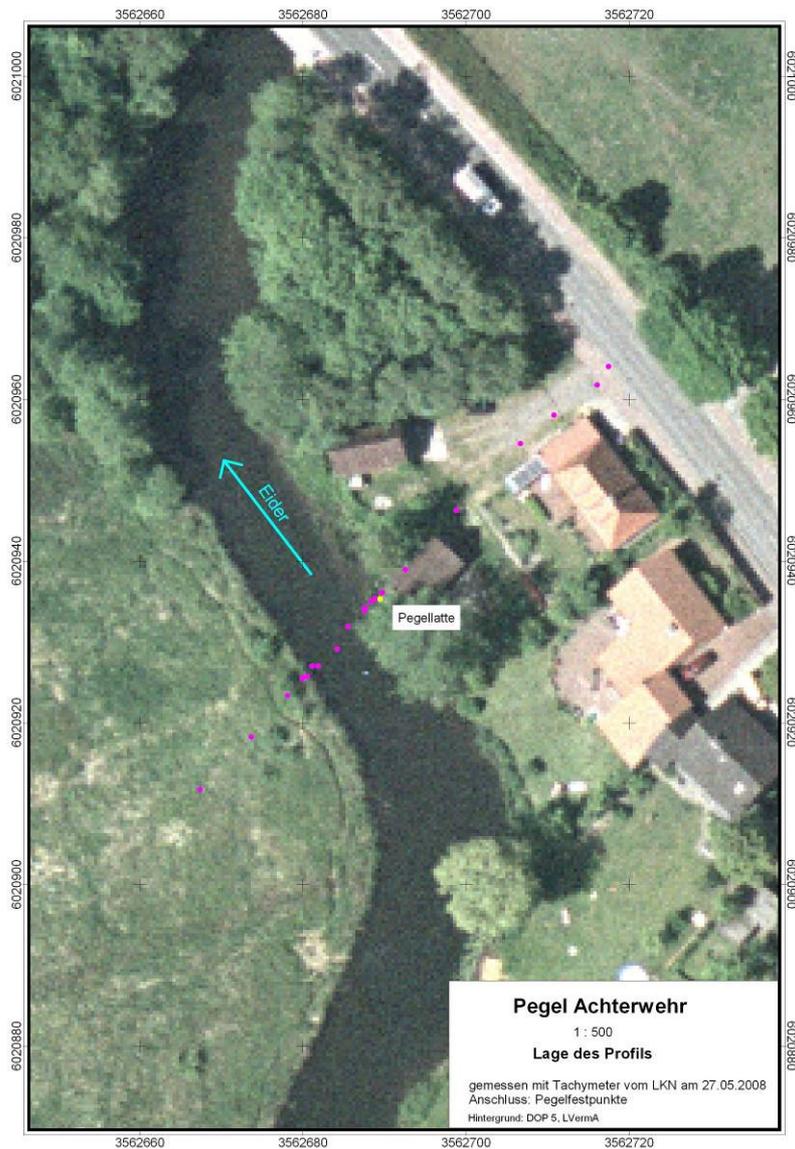


Abbildung 4: Lage des Profils Auslauf Westensee

Es wurde für den Bereich zwischen Profil und Seeauslauf auf der Basis vorliegender Geländehöhen ein mittleres Gefälle von 0,01 % angenommen. Da eine die W-Q-Beziehung am Seeauslauf vorliegen muss, wird für die Lage des vermessenen Profils der Seeauslauf angenommen und alle Profilpunkte dem angenommenen Gefälle entsprechend um 20 cm angehoben. Für die Spiegellinienberechnung wurde für das Profil am Seeauslauf ebenfalls ein Gefälle von 0,01 % angenommen. So wurde für alle in Tabelle 3 dargestellten Wasserstände im Profil (gleich Seewasserstand am Seeauslauf) der Abfluss berechnet.

Tabelle 3: Wasserstands-Volumen-Abfluss-Beziehung Westensee

<b>Wasserstand [cm]</b>	<b>Volumen [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Abfluss [m<sup>3</sup>/s]</b>
630	0	3,56
635	332.632	3,72
640	667.530	3,99
645	1.004.693	4,28
650	1.344.120	4,57
655	1.685.813	4,92
660	2.029.770	5,29
665	2.375.993	5,67
670	2.724.480	6,07
675	3.075.233	6,46
680	3.428.250	6,87
685	3.783.533	7,30
690	4.141.080	7,74
695	4.500.893	8,19
700	4.862.970	8,65
705	5.227.313	9,14
710	5.593.920	9,68
715	5.962.793	10,27
720	6.333.930	10,90

### 2.7.3 Bothkamper See

Der Bothkamper See liegt im Einzugsgebiet der Eider und hat (gemäß DAV) eine Fläche von 1,4 km<sup>2</sup>. Es wird angenommen, dass diese Fläche bei dem in der DGK 5 angegebenen Wasserstand von 23,90 m eingenommen wird. Es stehen daneben Wasserstandsdaten eines Pegels am Einlauf des Sees zur Verfügung.

Die Tiefenverhältnisse des Bothkamper Sees gehen aus Abbildung 5 hervor. Da die Form des Sees sehr unregelmäßig ist, wird die Volumenbestimmung analog zu dem Vorgehen bei dem Westensee in Kapitel 2.7.2 ausgehend von der Uferlinie vorgenommen. Aus der Flächendarstellung des Bothkamper Sees im DAV wurde mit Hilfe von GIS-Operationen eine Uferlänge von ca. 8,7 km ermittelt.

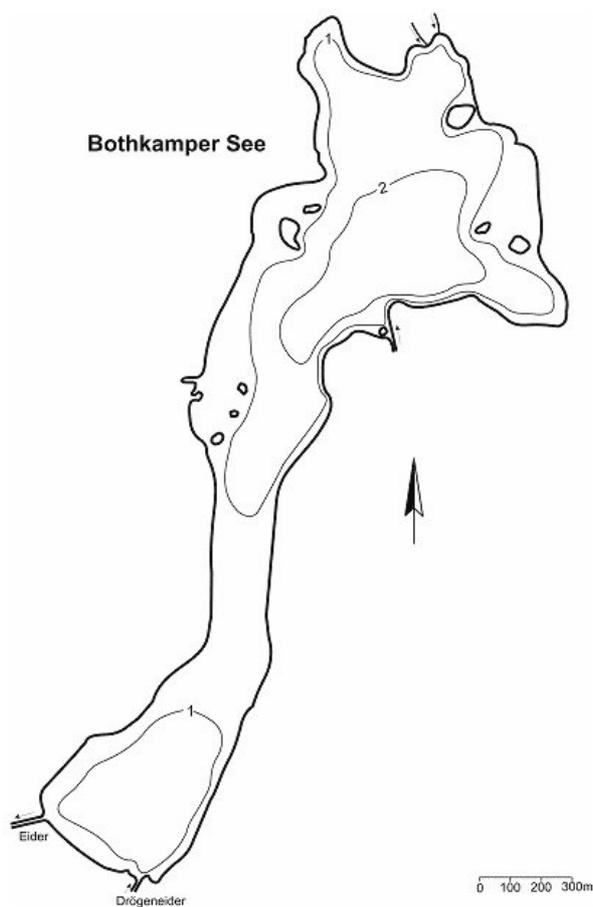


Abbildung 5: Tiefenlinien Bothkamper See, Umweltbericht des Landes Schleswig-Holstein [7]

Es wird für die Volumenberechnung rechnerisch eine Betrachtung der Seewasserstände größer als 23,00 müNN durchgeführt. Ausgehend von einem mittleren Böschungsgefälle von 1:50 werden Flächen- und Volumenänderungen in Abhängigkeit des Wasserstandes bestimmt. Damit ergeben sich die in Tabelle 4 dargestellten Volumina bei den zu erwartenden Wasserständen.

Die Beziehung zwischen Wasserstand und dem Ablauf aus dem See (W-Q-Beziehung) wird mit einer Spiegellinienberechnung erstellt. Dazu wird das in Abbildung 6 dargestellte, vom LANU vermessene Profil verwendet, das sich etwa 200 m im Unterwasser vom Seeablauf befindet.



Abbildung 6: Lage des Profils Auslauf Bothkamper See

Es wurde für den Bereich zwischen Profil und Seeauslauf auf der Basis vorliegender Geländehöhen ein mittleres Gefälle von 0,05 % angenommen. Da eine die  $W$ - $Q$ -Beziehung am Seeauslauf vorliegen muss, wird für die Lage des vermessenen Profils der Seeauslauf angenommen und alle Profilpunkte dem angenommenen Gefälle entsprechend um 10 cm angehoben. Für die Spiegellinienberechnung wurde für das Profil am Seeauslauf ebenfalls ein Gefälle von 0,05 % angenommen. So wurde für alle in Tabelle 4 dargestellten Wasserstände im Profil (gleich Seewasserstand am Seeauslauf) der Abfluss berechnet.

Tabelle 4: Wasserstands-Volumen-Abfluss-Beziehung Bothkamper See

<b>Wasserstand [m]</b>	<b>Volumen [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Abfluss [m<sup>3</sup>/s]</b>
23,00	0	0,02
23,10	125.175	0,06
23,20	254.700	0,13
23,30	388.575	0,23
23,40	526.800	0,37
23,50	669.375	0,54
23,60	816.300	0,73
23,70	967.575	0,95
23,80	1.123.200	1,19
23,90	1.283.175	1,46
24,00	1.447.500	1,76
24,10	1.616.175	2,08
24,20	1.789.200	2,41
24,30	1.966.575	2,76
24,40	2.148.300	3,18
24,50	2.334.375	3,67
24,60	2.524.800	4,21
24,70	2.719.575	4,79
24,80	2.918.700	5,44
24,90	3.122.175	6,16
25,00	3.330.000	6,96

#### 2.7.4 Brahmsee

Der Brahmsee liegt im Einzugsgebiet der Wehrau und hat (gemäß DAV) gemeinsam mit dem Wardersee eine Fläche von 1,6 km<sup>2</sup>. Es wird angenommen, dass diese Fläche bei einem mittleren Wasserstand eingenommen wird. Ausgehend von der grafischen Darstellung des Wasserstandsverlaufes der Jahre 1997 und 1998 in [7] muss von einer Wasserstandsschwankung im Bereich zwischen 19,00 müNN und 19,90 müNN ausgegangen werden. Der Wasserstand liegt im Mittel bei etwa 19,30 müNN.

Die Tiefenverhältnisse des Brahmsees gehen aus Abbildung 7 hervor. Da die Form des Sees sehr unregelmäßig ist, wird die Volumenbestimmung analog zu dem Vorgehen bei dem Westensee in Kapitel 2.7.2 ausgehend von der Uferlinie vorgenommen. Aus der Flächendarstel-

lung des Brahmsees im DAV wurde mit Hilfe von GIS-Operationen eine Uferlänge von ca. 10,6 km ermittelt.

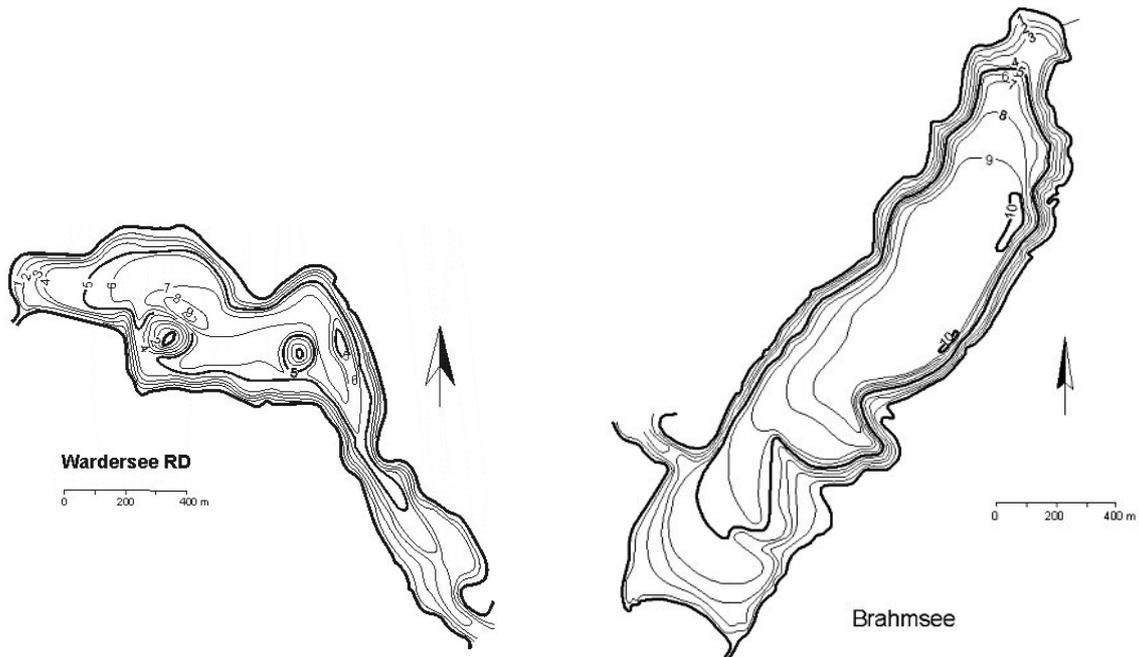


Abbildung 7: Tiefenlinien Brahmsee mit Wardersee, Umweltbericht des Landes Schleswig-Holstein [7]

Es wird für die Volumenberechnung rechnerisch eine Betrachtung der Seewasserstände größer als 18,80 müNN durchgeführt. Ausgehend von einem mittleren Böschungsgefälle von 1:50 werden Flächen- und Volumenänderungen in Abhängigkeit des Wasserstandes bestimmt. Damit ergeben sich die in Tabelle 5 dargestellten Volumina bei den zu erwartenden Wasserständen.

Aufgrund fehlender Vermessungsdaten im Bereich des Seeauslaufs wird angenommen, dass Gefälle und Querschnitt des Auslaufbereiches mit denen des Bothkamper Sees vergleichbar sind (vergleiche Kapitel 2.7.3). Mit dieser Annahme ist es notwendig, entsprechende Wasserpiegel der beiden Seen festzulegen. Da für den Brahmsee auch keine Wasserstandsdaten vorliegen, ist anhand der grafischen Darstellung der Wasserstände der Jahre 1997 und 1998 (Abbildung 8) durch einen Vergleich der Wasserstandsverläufe über die Zeit mit den Aufzeichnungen vom Bothkamper See ein „korrespondierender“ Wasserstand festgelegt worden.

Demnach ist für die Wasserstände:

- Bothkamper See = 23,40 müNN
- Brahmsee/Wardersee = 19,20 müNN

der gleiche Abfluss von 0,37 m<sup>3</sup>/s angenommen worden.

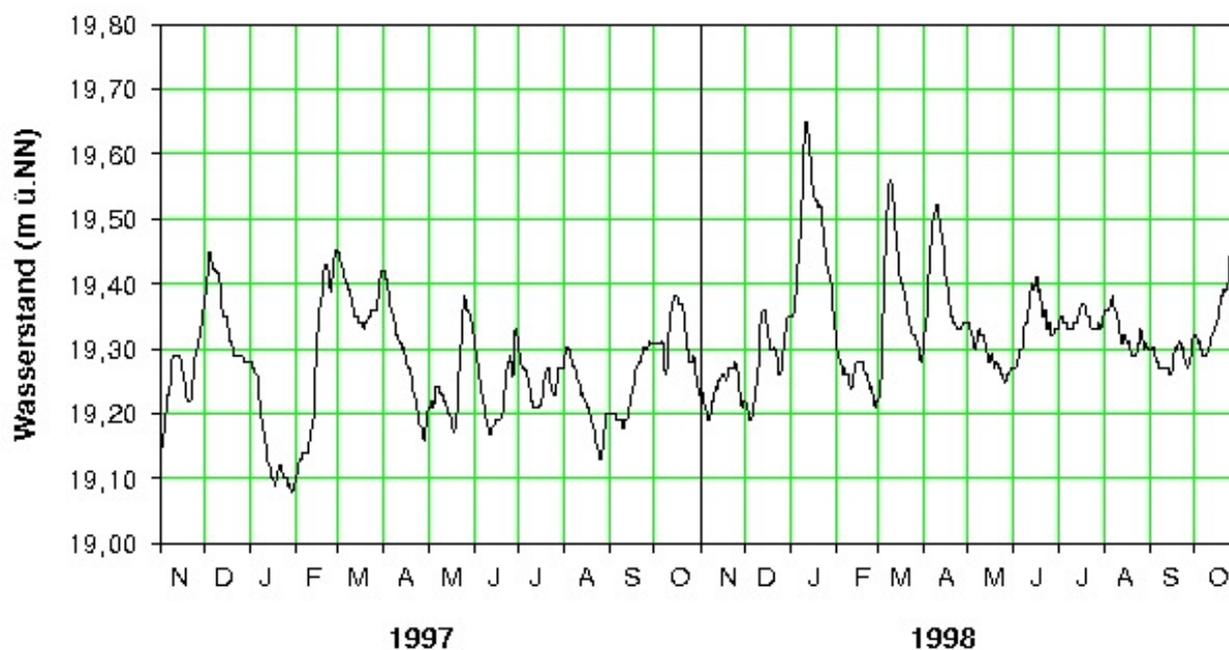


Abbildung 8: Wasserstände Wardersee/Brahmsee aus [7]

Damit ergeben sich die nachfolgend in Tabelle 5 zusammengestellten Werte.

Tabelle 5: Wasserstands-Volumen-Abfluss-Beziehung Wardersee

<b>Wasserstand [m]</b>	<b>Volumen [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Abfluss [m<sup>3</sup>/s]</b>
18,80	0	0,02
18,90	667.530	0,06
19,00	1.344.120	0,13
19,10	2.029.770	0,23
19,20	2.724.480	0,37
19,30	3.428.250	0,54
19,40	4.141.080	0,73
19,50	4.862.970	0,95
19,60	5.593.920	1,19
19,70	6.333.930	1,46
19,80	7.083.000	1,76
19,90	7.841.130	2,08
20,00	8.608.320	2,41
20,10	9.384.570	2,76
20,20	10.169.880	3,18
20,30	10.964.250	3,67
20,40	11.767.680	4,21
20,50	12.580.170	4,79
20,60	13.401.720	5,44

## 2.8 Translation und Retention im Gewässer

In KALYPSO wird die Wellenverformung im Gewässer über das Verfahren nach Kalinin-Miljukov (KM) abgebildet. Eingangsdaten für die Berechnung der KM-Parameter bilden die in einer stationär-ungleichförmigen Spiegellinienberechnung ermittelten WQ-Beziehungen eines Querprofils. Bedingung für die Berechnung der KM-Parameter sind kontinuierlich mit dem Abfluss steigende Wasserstände sowie die eindeutige Definition der Bordvollhöhe im Gewässerprofil zur Bestimmung des Zeitpunktes der Vorlandüberströmung.

Im Rahmen des Projektes ist keine Vermessung der Profile vorgenommen worden. Stattdessen sind an Pegelmessstellen vorliegende Profilvermessungen für die Bestimmung der KM-Werte verwendet worden.

## 2.9 Zeitreihen

### 2.9.1 Niederschlagsdaten

Das Beobachtungsnetz des Deutschen Wetterdienstes (DWD) wurde und wird derzeit stark ausgedünnt. Dies hat dazu geführt, dass von ehemals über 20 im Einzugsgebiet (bzw. in der Nähe) derzeit nur noch an 11 Stationen Tageswerte des anfallenden Niederschlages registriert werden.

Für die Kalibrierung des Modells soll aufgrund der signifikanten Auswirkungen auf die Wasserstände des NOK auch das Hochwasserereignis des Januars 2007 mit verwendet werden. Deshalb werden die vorliegenden Niederschlagsdaten, die mindestens diese Laufzeit haben, entsprechend aufbereitet.

Eine Überprüfung von Laufzeiten und aktuellem Status der Stationen führt zu der Verwendung der nachfolgend in Tabelle 6 aufgelisteten Stationen.

Tabelle 6: Übersicht der aktiven Niederschlagsstationen im Einzugsgebiet des NOK

Name	Koorx	Koory	Intervall	Start	Ende	Lücken
Barlohe	3540900	6002500	Tag/Min.	23.05.2001 (->Haale)	07.07.2008	23.05.01, 27.03.- 02.04.04, 11.04.- 08.06.04, 27.,29.08.04, 04.,06.09.04, 21.06.-13.10.05 (->Haale)
Bordesholm	3568180	6005000	Tag	01.01.1971	31.01.2007	nein
Brunsbüttel	3509360	5976530	Tag	01.01.1971	31.01.2007	1.4.96-31.7.96 1.1.97-31.1.97 (->Osdorf)
Gr. Wittensee	3549750	6030600	Tag	01.01.1971	31.01.2007	nein
Haale (Todenbüttel)	3537480	6000300	Tag	01.01.1971	31.01.2007	nein
Hohn	3534760	6020550	Tag	01.10.1981 (->Haale)	31.01.2007	nein
Itzehoe	3532590	5977850	Tag	01.01.1971	31.01.2007	nein
Jevenstedt	3543330	6011880	Tag	01.01.1971	31.01.2007	nein
Kiel - Holtenu	3574370	6027950	Tag	01.06.1986 (->Kronshagen)	31.01.2007	1.2.-28.2.2006, 25.02.2002, 10.02.2002 (->Osdorf)
Nettelsee	3577580	6005410	Tag	01.06.1993 (->Bordesholm)	31.01.2007	nein
Osdorf	3566130	6034140	Tag	01.01.1971	31.01.2007	nein

## 2.9.2 Klimadaten

Es werden Klimadaten der Station Hamburg-Fuhlsbüttel verwendet.

## 2.9.3 Abflüsse und Wasserstände

Für die Kalibrierung des Modells sind gemessene Daten zu den simulierten Ereignissen notwendig. Dazu werden Abflusspegel genutzt, deren Position am Gewässer bereits bei der Abgrenzung der Teilgebiete berücksichtigt worden ist.

Neben den Abflusspegeln werden auch Wasserstandspegel an den Seen zur Plausibilisierung der WQ-Beziehung der Retentionsbecken benutzt.

In der nachfolgenden Zusammenstellung wird eine Übersicht der vorliegenden Pegel im Einzugsgebiet des NOK gegeben.

Tabelle 7: Übersicht vorhandener Pegel im Einzugsgebiet des NOK

Pegel	Nr.	Pegelart	Start	Ende	vorh. Lücken
Flintbek	114031	Abflusspegel	01.11.1975	13.02.2008	keine
Hammer	114034	Abflusspegel	01.11.1975	13.02.2008	keine
Bokel/Bokeler Au	114280	Abflusspegel	01.06.1988	08.11.2007	11.12.03 - 31.12.03 13.09.02 - 28.10.02
Jevenstedt	114207	Abflusspegel	31.10.1993	07.12.2007	keine
Osterrönfeld/Wehrau	114204	Abflusspegel	01.11.1980	01.11.2007	keine
Papenau oben	114316	Abflusspegel	01.06.1991	08.11.2007	keine
Schafstedt	114245	Abflusspegel	02.11.1984	10.01.2008	1.11.85 - 31.12.85 1.12.88 - 31.01.1988
Todenbüttel	114068	Abflusspegel	01.11.1962	01.11.2007	1.7.92 - 30.10.92 5.3.04 - 8.3.04 28.4.04 - 30.4.04
Wennbüttel	114108	Abflusspegel	01.11.1969	01.11.2007	01.11.84 - 31.10.99
Westensee	114202	Wasserstand	01.11.1984	27.03.2008	keine
Schmalstede	114340	Abflusspegel	28.03.2001	21.11.2007	21.7.05 - 22.7.05
Brammer	114321	Abflusspegel	01.11.1993	07.12.2007	keine
Wittensee	114259	Wasserstand	01.11.1984	30.04.2008	keine
Eiderkaten	114416	Abflusspegel	01.11.1998	27.11.2007	keine
Bothkampersee		Wasserstand	01.11.1992	25.06.2008	11.03.05 - 06.04.05

Die Lage der Pegel ist im Anhang E dargestellt.

### 3 NA-Modell

#### 3.1 Theoretische Grundlagen

Im Gegensatz zu Blockmodellen unterteilen semi-distributive NA-Modelle das Einzugsgebiet in einzelne Teilgebiete, die über einen Entwässerungspunkt in den Vorfluter entwässern. Dabei wird das reale Gewässersystem als Ordnungsstruktur eines gerichteten Baumes abgebildet. Das Schema orientiert sich in Fließrichtung, wobei die Kanten des Baumes einzelne Gewässerabschnitte bilden. Jeder Strang wird durch einen oberen und unteren Knoten begrenzt, wobei am unteren Knoten der Anschluss der Teilgebiete erfolgt. Basisgleichung der deterministischen NA-Modelle ist die Wasserbilanz der Landoberfläche:

$$N = A + V + /- \Delta S$$

**Gleichung 3-1**

mit	N	mittlere Niederschlagshöhe im Einzugsgebiet [mm]
	A	mittlere Abflusshöhe [mm]
	V	Verdunstung [mm]
	$\Delta S$	Speicheränderung [mm]

Fachlich ist zur physikalisch korrekten Abbildung der Flachlandhydrologie die Berücksichtigung der Speicherelemente Schneedecke, Bodenoberfläche, Boden- und Grundwasserspeicher erforderlich (TUHH, 2004). Nach Abbildung 9 wird dabei in die vertikalen Prozesse der Abflussbildung und horizontal in die Prozesse der Abflusskonzentration unterschieden. Erst unter Berücksichtigung von Translations- und Retentionseigenschaften sind diese zum Gesamtabfluss zu addieren, da sich besonders im Flachland die Speichereigenschaften der Bodenoberfläche z. B. durch Mulden verzögernd auf die Abflussbildung auswirken können.

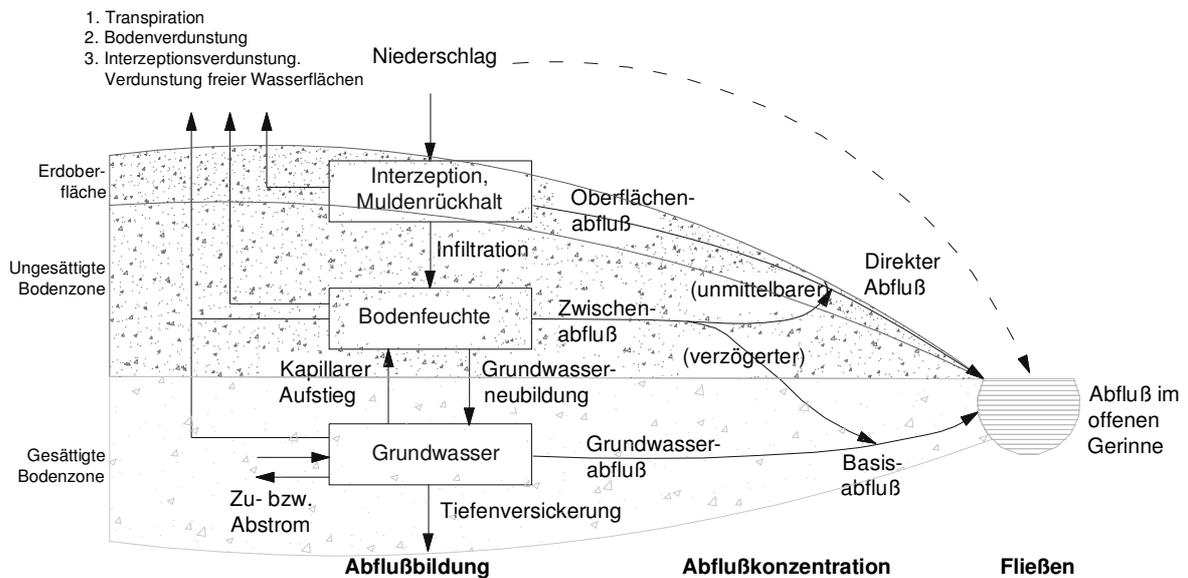


Abbildung 9: Aufteilung in Abflussbildung und -konzentration (Baumgartner, 1990)

Im Norddeutschen Flachland prägen in den Marsch- und Geestgebieten vor allem die Wechsel von drainierten und undrainierten Flächen das Landschaftsbild. Des Weiteren variiert die Pedologie zwischen Niedermoorböden und Geschiebemergel in den Bereichen der potenziellen natürlichen Überschwemmungsgebiete. Zur modelltechnischen Abbildung dieser Heterogenität im Einzugsgebiet aufgrund von Variationen in der Landnutzung sowie den hydrogeologischen Verhältnissen bedarf es einer weiteren Untergliederung der Teilgebiete in hydrologisch gleichwertige Flächen (Hydrotope). Für diese werden zunächst die vertikalen Prozesse als unabhängige Speicherkaskade simuliert, die maßgeblich durch die Eigenschaften des Bodenspeichers gesteuert werden.

Aufgrund der geringen Gefällesituation infiltriert im Flachland der überwiegende Anteil des um den Rückhalt in der Vegetations- und Schneedecke reduzierten Bestandsniederschlags in den Bodenkörper. Daher ist eine Bodenwasserhaushaltssimulation der ungesättigten und gesättigten Bodenzone notwendig. Dazu eignet sich der Bodenfeuchtespeicher nach Ostrowski, 1984 mit einer zusätzlichen Komponente für den Bodenzwischenabfluss. Die Infiltrationsmenge hängt somit neben den bodenphysikalischen Parametern auch von der aktuellen Bodenfeuchte und der Niederschlagsintensität ab. Zur Quantifizierung der ablaufenden Prozesse wird eine Simulation der zeitlichen Änderung der Bodenfeuchte auf Basis einer eindimensionalen Kontinuitätsgleichung durchgeführt. Dazu wird der obere Bodenkörper über einzelne homogene

Schichten abgebildet, denen die charakteristischen Bodenparameter sowie die Mächtigkeit zugewiesen werden.

$$\frac{dBF_i(t)}{dt} = Inf_i(t) - (Perk_i(t) + Intf_i(t)) - Eva_i(t)$$

**Gleichung 3-2**

mit	BF	nutzbare Bodenfeuchte [mm]
	Inf	Infiltration [mm/h]
	Perk	Perkolation [mm/h]
	Eva	aktuelle Verdunstung [mm/h]
	Intf	Interflow [mm/h]

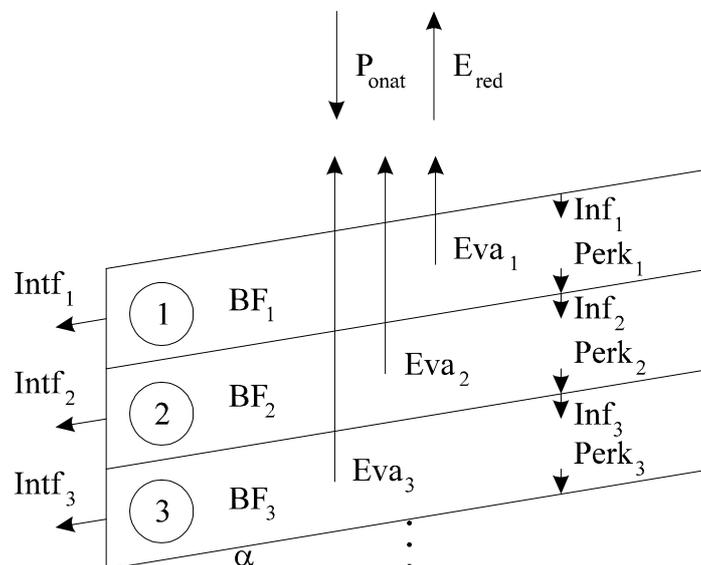


Abbildung 10: Bodenspeicher

Die vertikal nachfolgenden Bodenlamellen erhalten als Zuflusskomponente  $Inf_{i+1}$  die Perkulationsrate  $Perk_i$  der darüber liegenden Schicht, wodurch die Bodenfeuchte gesteigert wird. Perkoliert mehr Wasser als in die darunter liegende Lamelle infiltrieren kann, so tritt Interflow in der oberen Schicht auf. Der Perkolation wirken die Evaporation sowie die kapillare Aufstiegsrate als Verluste entgegen. Die aufgeführten Teilprozesse werden als linear abhängig von der Bodenfeuchte angesetzt. Nach dem Konzept der Porosität von Bear, 1972 werden dabei drei Bereiche der Bodenfeuchte unterschieden.

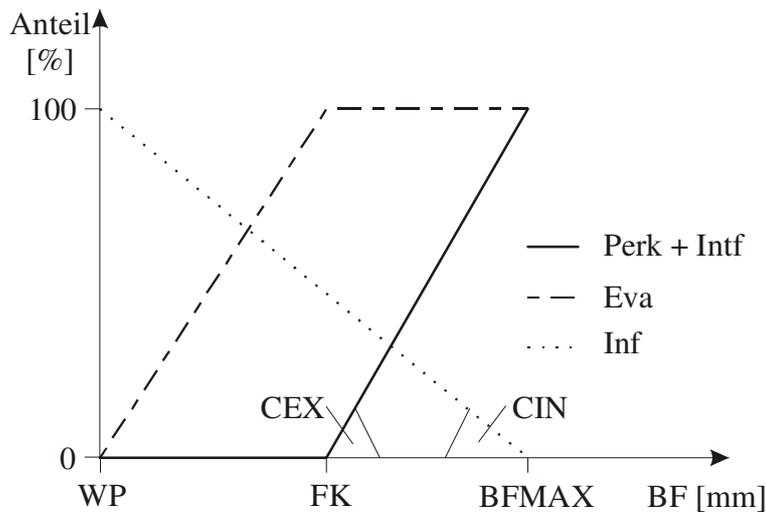


Abbildung 11: Funktionelle Abhängigkeiten in der Bodenfeuchte (Ostrowski, 1984)

Aus Abbildung 11 leiten sich die Gleichungen zur Bestimmung der Infiltration, Perkolation, Evaporation sowie des Interflows ab. Sie variieren innerhalb der Bodenfeuchtebereiche nach Abbildung 12.

Hygroskopisch geb. Wasser	Kapillarwasser	Freies Bodenwasser
ofengetrocknet bei 105 °C  luftrockener Boden	permanenter Welkepunkt WP  Pflanzen- verfügbar  Feldkapazität FK	Sättigung BFMAX
0 %		100 %

Abbildung 12: Bodenfeuchtebereiche (Bear, 1972)

Bezogen auf den um den Welkepunkt reduzierten nutzbaren Bodenfeuchteanteil ergibt sich die potenzielle Infiltration zu:

$$Inf_{p,i}(t) = CIN_i \cdot \frac{BFMAX_i - BF_i(t)}{BFMAX_i - WP} \quad \text{Gleichung 3-3}$$

mit	$Inf_p$	potenzielle Infiltration [mm/h]
	$CIN$	Infiltrationskapazität (Proportionalitätsfaktor [-])
	$BFMAX$	maximale Bodenfeuchte [mm]
	$WP$	Welkepunkt [mm]
	$BF$	aktuelle Bodenfeuchte [mm]

Die tatsächliche Infiltration ist für die oberste Bodenschicht von der Niederschlagsintensität, für die darunter liegenden Schichten von der Perkolation aus der darüber liegenden Schicht abhängig. Bezogen auf die um die Feldkapazität reduzierten nutzbaren Bodenfeuchteanteile ergibt sich die potenzielle Perkolation zu:

$$Perk_{p,i}(t) = \begin{cases} 0, & \text{falls } BF_i < FK_i \\ CEX_i \cdot (BF_i(t) - FK_i), & \text{falls } BF_i \geq FK_i \end{cases} \quad \text{Gleichung 3-4}$$

mit	$Perk_p$	potenzielle Perkolation [mm/h]
	$CEX$	Perkolationskapazität (Proportionalitätsfaktor nach Diagramm 1)
	$FK$	Feldkapazität [mm]
	$BF$	aktuelle Bodenfeuchte [mm]

Als Randbedingung ergibt sich, dass die tatsächliche Perkolation physikalisch nicht höher als die Infiltration in die darunter liegende Schicht sein kann.

$$Inf_i(t) = Perk_{i-1}(t) = \text{Min}\{Inf_{p,i}(t), Perk_{p,i-1}(t)\} \quad \text{Gleichung 3-5}$$

mit	$Inf$	aktuelle Infiltration [mm/h]
	$Perk$	aktuelle Perkolation [mm/h]
	$Inf_p$	potenzielle Infiltration [mm/h]
	$Perk_p$	potenzielle Perkolation [mm/h]

Trifft die oben genannte Randbedingung nicht zu, entsteht horizontaler Bodenzwischenabfluss (Interflow).

$$Intf_i(t) = Perk_{p,i}(t) - Perk_i(t)$$

**Gleichung 3-6**

mit    Intf    Interflowkapazität [mm/h]  
        Perk    aktuelle Perkolation [mm/h]  
        Perk<sub>p</sub>    potentielle Perkolation [mm/h]

Neben der Bodenwasserhaushaltssimulation der gesättigten Bodenzone bedarf die gesättigte Bodenzone im Flachland einer besonderen Betrachtung. Charakteristisch sind hohe Grundwasserstände, die vereinzelt bis an die Oberfläche reichen und so in direkter Wechselwirkung zum Gewässer stehen. Mindestanforderung ist die modelltechnische Aufteilung in einen oberflächennahen Grundwasserleiter und einen Tiefengrundwasserleiter. Für die Wasserbilanzmodellierung werden dazu die Zu- und Abflüsse aus dem Grundwasserleiter benötigt. Diese können über eine Massenbilanz auf Grundlage der Kontinuitätsgleichung und des Linearspeicheransatzes bestimmt werden (TUHH, 2004). Die Speicheränderung im oberflächennahen Grundwasserkörper je Teilgebiet folgt nach Abbildung 13 zu:

$$\frac{dS(t)}{dt} = Q_{Boden}(t) + Q_{GWZU}(t) + Q_{GWAB}(t) - Q_{BASIS}(t) - Q_{TIEF}(t)$$

**Gleichung 3-7**

mit    Q<sub>Boden</sub>    aus Bodenspeicher perkolierender Zufluss [m<sup>3</sup>/h]  
        Q<sub>GWZU</sub>    Grundwasserzustrom [m<sup>3</sup>/h]  
        Q<sub>GWAB</sub>    Grundwasserabstrom [m<sup>3</sup>/h]  
        Q<sub>TIEF</sub>    Abstrom in Tiefengrundwasserleiter [m<sup>3</sup>/h]

Der flachlandtypische Austausch zwischen Grundwasser und Vorfluter stellt sich, bezogen auf diesen Ansatz bei einem höheren Wasserstand im Grundwasserkörper als im Gewässer über Basisabfluss ein. Dieser wird maßgeblich neben der Druckdifferenz durch die Bodendurchlässigkeit an der benetzten Gerinneböschung sowie an der Sohle bestimmt.

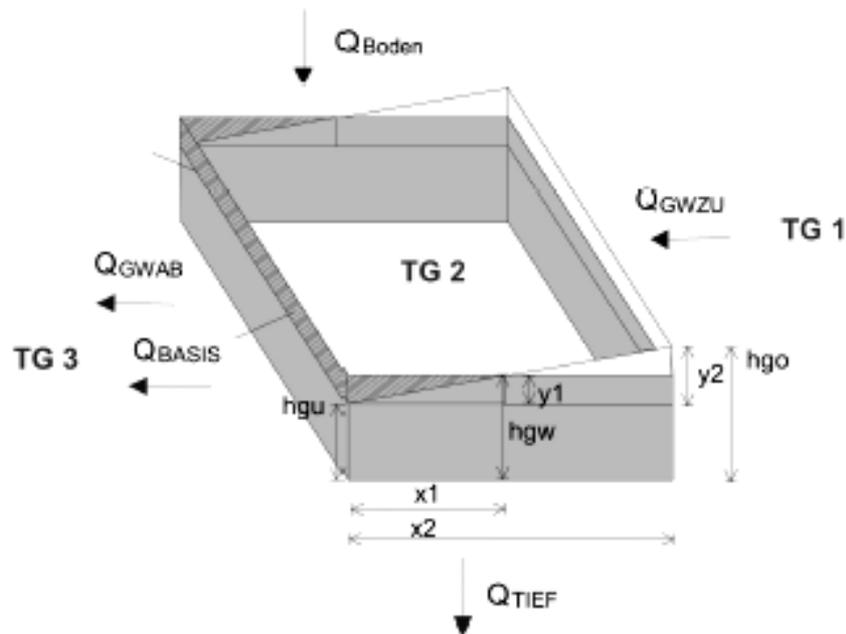


Abbildung 13: Oberflächennaher Grundwasserleiter

Unter den oben genannten Bedingungen kann das zur Speicherung und damit zur Verfügung stehende Wasservolumen im Grundwasserkörper nach Abbildung 13 ermittelt werden.

$$S(t) = GWS(t) \cdot Pors \cdot A \cdot 10^6$$

**Gleichung 3-8**

mit	$S(t)$	Speicherinhalt [ $m^3$ ]
	$GWS(t)$	Höhe des Wasserstandes im Speicherelement [m]
	$Pors$	Porosität des Grundwasserleiters [-]
	$A$	Fläche des Teilgebietes [ $km^2$ ]

[aus 8]

### 3.2 Berücksichtigung der Gerinneretention

Die Retention der Abflusswelle im Gerinne wird über das Verfahren nach Kalinin und Miljukov abgebildet [17]. Die gewählte Modellvernetzung umfasst insgesamt 14 Kalinin-Miljukow-Stränge. Für jeden Strang werden die KM-Parameter  $K$  und  $n$  jeweils für den Flussschlauch und überströmtes Vorland für fünf unterschiedliche Abflüsse bestimmt. Die Bestimmung dieser Parameter kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Methoden zur Bestimmung der Kalinin-Miljukow-Parameter

Art des KM-Stranges	Bestimmungsmethode
offenes Gerinne, Spiegel- linienberechnung verfügbar	automatische Berechnung von WQ-Beziehungen an den Profilen, dann Berechnung von $K$ und $n$ und Aggregation auf den KM-Strang
offenes Gerinne, keine Spiegellinienberechnung verfügbar	Abschätzung oder Vermessung einer mittleren Gerinnegeometrie sowie der Gerinnerauigkeit und des Gefälles des KM-Stranges, dann Berechnung einer WQ-Beziehung für dieses Profil und Bestimmung von $K$ und $n$
geschlossenes Gerinne (verrohrt)	Berechnung nach Wackermann

In dem hydrologischen Modell für den NOK ist der zweite Fall zur Anwendung gekommen, da keine Spiegellinienmodelle für die entsprechenden Bereiche vorliegen.

### 3.3 Zuordnung von Niederschlagsstationen

Die Zuordnung der Niederschlagsstationen wurde nach räumlichen Kriterien vorgenommen. Dabei wurde auch der NOK als Wetterscheide berücksichtigt. Die Zuordnung ist in Abbildung 14 dargestellt.

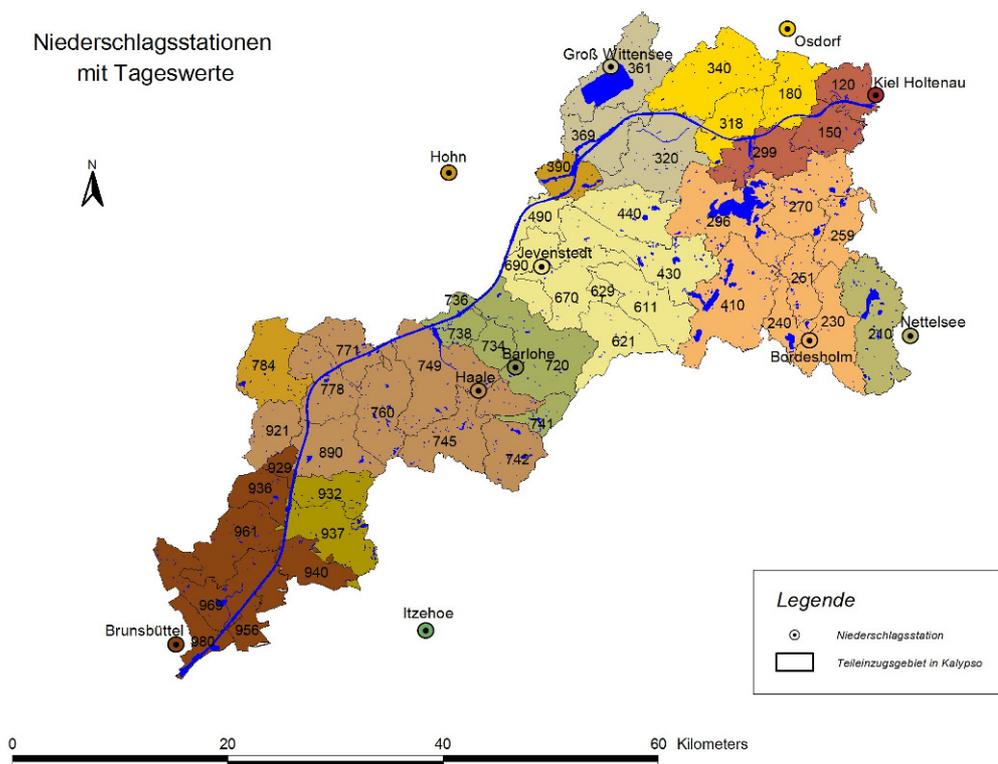


Abbildung 14: Zuordnung der Niederschlagsstationen zu den Teilgebieten

### 3.4 Modelltechnische Abbildung der Schöpfwerke

Da die verwendete und derzeit aktuelle Version von Kalypso NA keine Funktion zur Berücksichtigung von Schöpfwerken beinhaltet, wurde deren Einfluss auf das Abflussverhalten durch das Modellelement Speicherstrang abgebildet. Berücksichtigt wurden alle im DAV verzeichneten Schöpfwerke, die die Hauptabflüsse von Teilgebieten direkt in den NOK fördern. Diese sind in Tabelle 9 mit den maximalen Pumpleistungen aufgeführt.

Tabelle 9: Im Modell berücksichtigte Schöpfwerke

Teilgebiet	Dav-Nr.	Einzelleistung [m <sup>3</sup> /s]	Leistung Teilgebiet [m <sup>3</sup> /s]
980	55777	0,2	2,1
	54909	1,5	
	55160	0,4	
969	57538	5,4	5,4
	55058	1,5	
956	137350	0,9	3,3
	55012	0,9	
940	77749	1,2	9,6
	54746	8,4	
936	58017	1,44	1,44
	40779	2,4	
771	58301	1,2	3,6
	738	53500	
736	40778	0,6	0,6

Bei der Modellierung ist von folgenden Annahmen ausgegangen worden:

1. Die angegebenen Pumpleistungen entsprechen der maximalen Förderleistung der Schöpfwerke.
2. Alle anfallenden Abflüsse, die geringer als die maximale Förderleistung der Schöpfwerke sind, werden unverändert, einem freien Abfluss vergleichbar, in den NOK gepumpt.
3. Alle anfallenden Abflüsse, die höher als die maximale Förderleistung der Schöpfwerke sind, werden auf die maximale Pumpleistung reduziert.

Die Volumen-Abfluss-Beziehung wird dabei für jedes Schöpfwerk so definiert, dass aus verschiedenen Abflüssen die entsprechend sich in der Summation über den Zeitschritt ergebenden Volumina ermittelt werden. Diese Zuordnung erlaubt unterhalb der maximalen Schöpfleistung einen direkten Durchlauf des Abflusses, oberhalb der maximalen Schöpfleistung wird ein Aufstau erzeugt, der entsprechend zeitverzögert abgegeben wird.

Die berücksichtigten Schöpfwerke sind im Anhang E in ihrer Lage dargestellt.

### 3.5 Modellkalibrierung

Die verschiedenen Naturräume im Einzugsgebiet des NOK unterscheiden sich auch durch ihr Abflussverhalten. Dies wird sowohl in den vorliegenden Pegelganglinien deutlich, als auch in der Reaktion des Modells auf veränderte Einstellungen ersichtlich. Insbesondere den drainierten Bereichen der Niederungen und des westlichen Einzugsgebietes kommt der Kalibrierung besondere Beachtung zu, da ein Teil des Niederschlages durch die Entwässerungsmaßnahmen sehr schnell abflusswirksam wird. Es ist an den Pegelganglinien zu erkennen, dass wesentliche Abflussanteile eine deutlich geringere Reaktionszeit nach dem auslösenden Niederschlag aufweisen als die übrigen Abflussanteile.

Damit ähneln diese Bereiche in ihrem Abflussverhalten Einzugsgebieten mit ausgeprägter Gefällestruktur, für die das verwendete Modellkonzept unterschiedlich schnell reagierende Abflussanteile unterscheidet. Als schnellster Anteil werden hier die Abflussspitzen über den Oberflächenabfluss auf natürlichen Flächen abgebildet. Daneben wird Interflow als Abflussanteil bei entsprechend vorliegendem Gefälle abflusswirksam, der zwischen den Bodenschichten aufgestaut wird. Als langsamer Anteil wird Basisabfluss wirksam, der in Abhängigkeit des Grundwasserstandes im Modell ausgelöst wird.

Für die in Schleswig-Holstein vorrangig vorliegenden Naturräume ist wegen des geringen vorhandenen Gefälles im Vergleich zu den Gefällestrukturen (Mittelgebirge), bei denen es im Fall von starkem Niederschlag zur Auslösung von nennenswerten Anteilen Oberflächenabfluss und Interflow kommt, nur in geringem Umfang mit schnellen Abflussanteilen zu rechnen.

Da das verwendete NA-Modell Kalypto keine Funktion zur Abbildung von Meliorationsmaßnahmen im Modell durch ein gesondertes Berechnungsverfahren zur Verfügung stellt, werden für die modelltechnische Abbildung der Drainage die im Modell zur Verfügung stehenden Abflussanteile Oberflächenabfluss und Interflow genutzt. Durch eine Verringerung der Infiltrations- und Perkolationskapazität können durch künstlich definierte „Sperrschichten“ schnelle Abflussanteile erzwungen werden.

Von großem Einfluss auf das Abflussverhalten sind die großen Seen in den Einzugsgebieten der Eider, der Schirnauer Au und der Wehrau. Als weitere Kalibriergröße neben den verschiedenen Abflusspegeln im Einzugsgebiet sind hier die Wasserstandsganglinien der Seen verwendet worden, die für eine Abstimmung mit den Modellergebnissen unter Nutzung der in Abschnitt 2.7 bestimmten Funktion der Wasserstands-Volumenbeziehung in eine Volumenzzeitreihe überführt worden sind.

Nachfolgend wird das Vorgehen bei der Kalibrierung der verschiedenen Bereiche beschrieben und ein Vergleich der simulierten mit den beobachteten Abflüssen anhand entsprechender Grafiken vorgenommen. Alle verwendeten Modellparameter sind in Anhang B zusammengestellt. Weitere Grafiken mit einer höheren zeitlichen Auflösung und einer Darstellung der Simulationsergebnisse für die Hochwasserereignisse der Jahre 1995, 1998, 2002, 2004 und 2007(Kyrill) sind im Anhang C zusammengestellt.

Für die Wahl des Simulationszeitschrittes hat sich, bedingt durch die überwiegend natürliche Prägung des Einzugsgebietes und die Struktur des Modellaufbaus, eine Berechnungsschrittlänge von einem Tag als vorteilhaft erwiesen. Es kann einerseits gezeigt werden, dass die Reaktion des Einzugsgebietes auf Niederschläge mit dem Modell sehr gut wiedergegeben werden kann. Dabei werden sowohl Gradienten der auflaufenden und ablaufenden Hochwasserwelle gut getroffen als auch Abflussspitzen, Niedrigwasserabflüsse und Füllen. Andererseits ist die Wahl eines Tages als Berechnungszeitschritt vorteilhaft, da die Entwicklung von Vorhersagediagrammen für die Zuflüsse in den NOK auf Tagesbasis praktikabel ist.

Bei der Festlegung der Startwerte für die Kalibrierung werden neben physikalischen Informationen, auf die durch eine Verschneidung von pedologischen Daten mit Landnutzungsinformationen in den kleinsten Berechnungseinheiten, den Hydrotopen, während der Simulation zugegriffen wird, auch räumliche Einflüsse wie Form des Einzugsgebietes, Fließlänge des Vorfluters und Gefälle berücksichtigt.

Dazu wird der empirische Ansatz nach Riek für die Ermittlung der Retentionskonstanten des Oberflächenabflusses, des Interflows und des Basisabflusses verwendet. Danach wird die Retentionskonstante für den Oberflächenabfluss in Abhängigkeit der Teilgebietsgröße  $A$  in  $[\text{km}^2]$  berechnet.

$$Ret_{Ob} = 3,9763 A^{0,349}$$

Die Retentionskonstanten für den Interflow und den Basisabfluss ergeben sich in Abhängigkeit von der Retentionskonstante für den Oberflächenabfluss.

$$Ret_{Int} = 3 Ret_{Ob}$$

$$Ret_{Bas} = 200 Ret_{Ob}$$

Die Retentionskonstanten für den Grundwasserabfluss der einzelnen Teileinzugsgebiete ergeben sich aus dem Gefälle des Grundwasserspiegels im Teileinzugsgebiet und der Durchlässigkeit des Bodens. Das Gefälle des Grundwassers wird in Ermangelung von Grundwassergleichen auf der Basis des Oberflächenmodells über die Länge des Fließweges  $L_{GW}$  und die Höhendifferenz abgeschätzt.

$$I_{GW} = \Delta h_{GW} / L_{GW}$$

Der Untergrund im Einzugsgebiet des NOK ist in den Bereichen der Geest und des östlichen Hügellandes größtenteils eiszeitlich geprägt mit wechselnden Anteilen von Geschiebemergel, sowie Sand- und Tonlinsen. Insbesondere die Sandlinsen können mit ihrer größeren Durchlässigkeit eventuell Umläufigkeiten bzw. eine Reduktion der Fließzeit in eigentlich dichterem Material bewirken. Als mittlerer Durchlässigkeitsbeiwert wird als Anfangswert  $k_f = 10^{-4}$  m/s gewählt.

$$v_{GW} = k_f I_{GW}$$

Die Retentionskonstante entspricht der Fließzeit in Stunden [h], die sich aus der Fließgeschwindigkeit  $v_{GW}$  und dem Fließweg  $l_{GW}$  ergibt.

Die Werte für die so ermittelten Retentionskonstanten sind im Anhang A zusammengestellt.

Die Kalibrierung erfolgt unter Beibehaltung der Werte für die Retentionskonstanten für Oberflächenabfluss, Interflow und Basisabfluss. Änderungen werden über multiplikative Faktoren vorgenommen. Diese sind im Anhang B zusammengestellt.

### **3.5.1 Einzugsgebiet der Eider, des Wittensees und des Wardersees**

Das Einzugsgebiet der Eider ist als größter Zufluss des NOK wie auch die Einzugsgebiete des Wittensees und des Wardersees der Fließgewässer-Landschaft des Östlichen Hügellandes zuzuordnen. Im Vergleich zu weiten Teilen des übrigen NOK-Einzugsgebietes liegt eine ausgeprägte Gefällestruktur vor. Im Einzugsgebiet der Eider liegen mit den vier Abflusspegeln Eiderkaten, Schmalstede, Flintbek und Brammer sowie den Aufzeichnungen der Seewasserstände im Bothkamper See und Westensee gute Bedingungen für die Kalibrierung der simulierten Abflüsse vor.

Beginnend im Oberlauf steht mit dem Wasserstandspegel am Bothkamper See eine Möglichkeit zur Validierung der in Abschnitt 2.7.3 ermittelten Wasserstands-Volumen-Beziehung zur Verfügung.

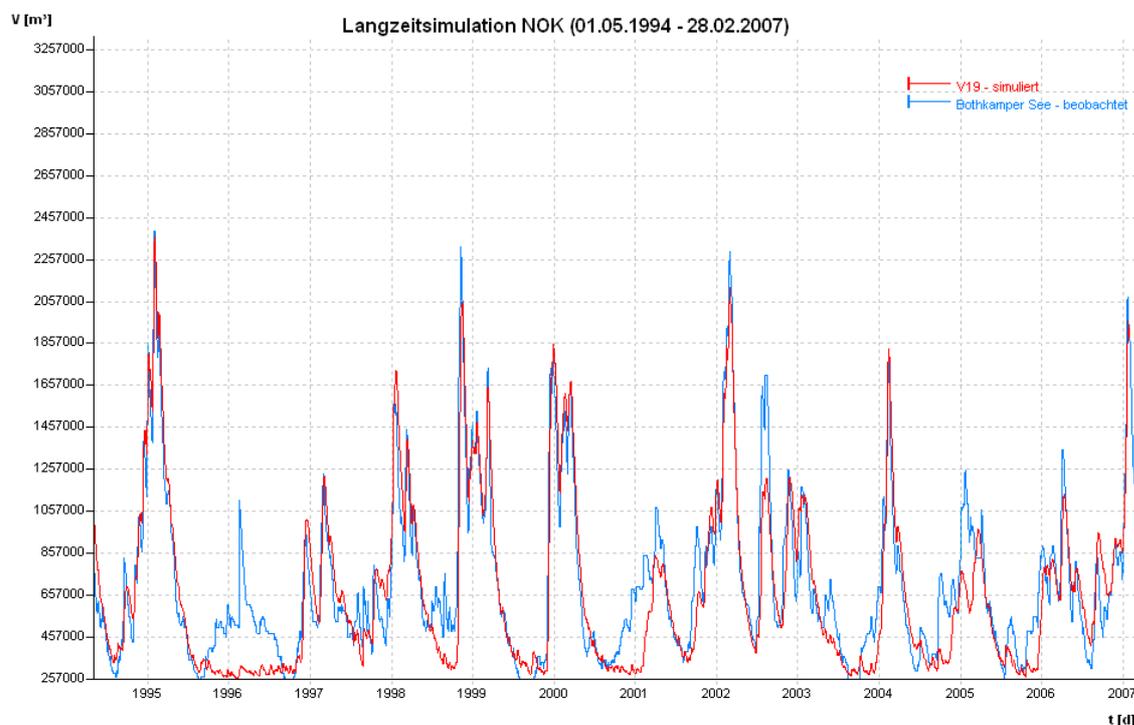


Abbildung 15: Füllvolumen Bothkamper See

In Abbildung 15 ist in rot das simulierte Füllvolumen und in blau das unter Verwendung der hergeleiteten Wasserstands-Volumen-Beziehung aus den gemessenen Wasserständen ermittelte Füllvolumen aufgetragen. Es handelt sich deshalb bei den aufgetragenen Volumina nicht um absolute sondern um relative Werte, die sich aus dem zu erwartenden Schwankungsbereich der Wasserstände ergeben. Abgesehen von größeren Abweichungen 1996, 2001 und 2005 kann das Verhalten des Sees sehr gut wiedergegeben werden.

Die berechneten Abflüsse im weiteren Verlauf der Eider werden nachfolgend jeweils im Vergleich zu den Abflusspegeln Eiderkaten (Abbildung 16), Schmalstede (Abbildung 17), Flintbek (Abbildung 18) und Hammer (Abbildung 19) dargestellt.

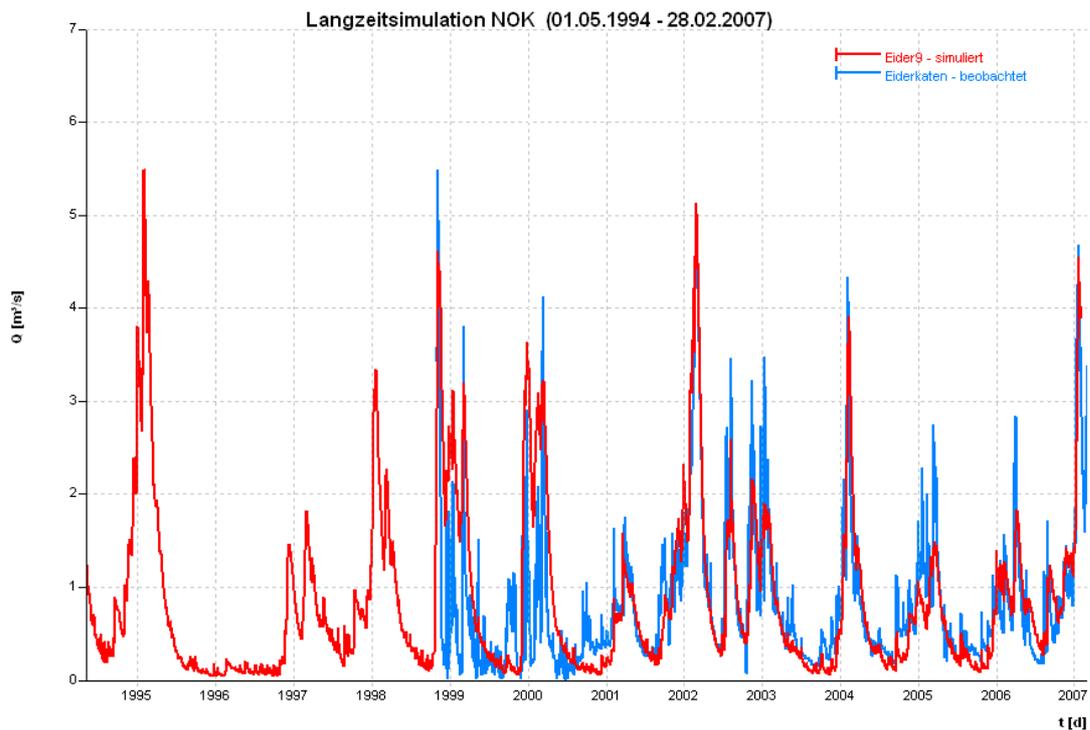


Abbildung 16: Kalibrierung Abflusspegel Eiderkatzen

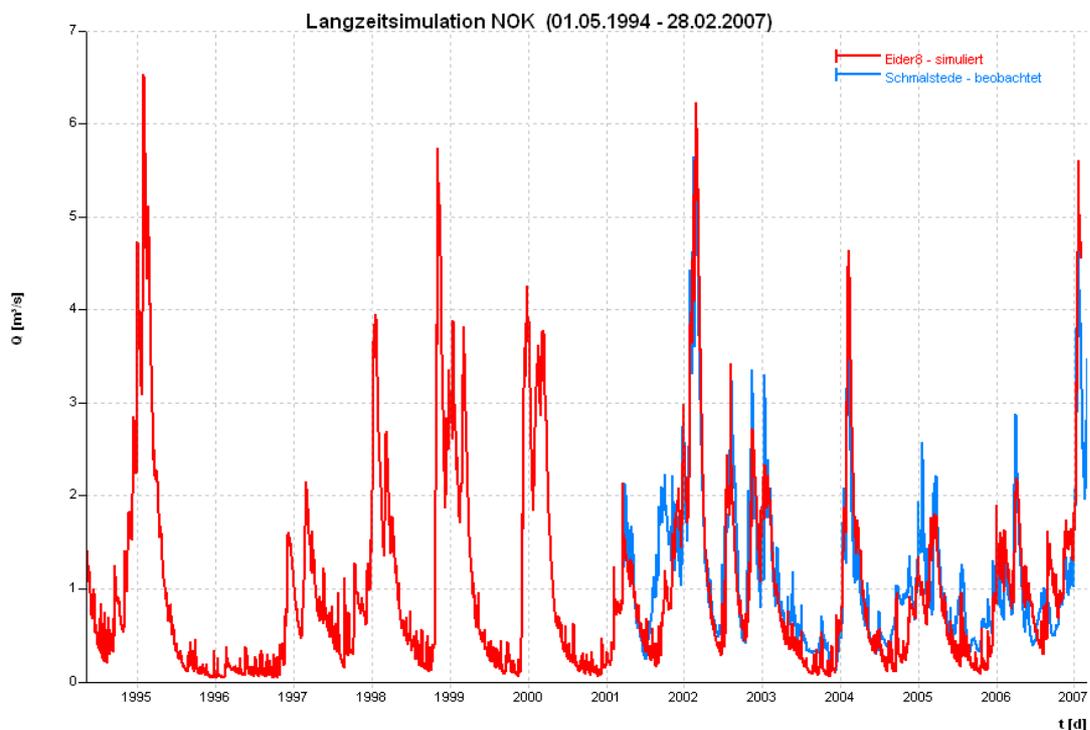


Abbildung 17: Kalibrierung Abflusspegel Schmalstede

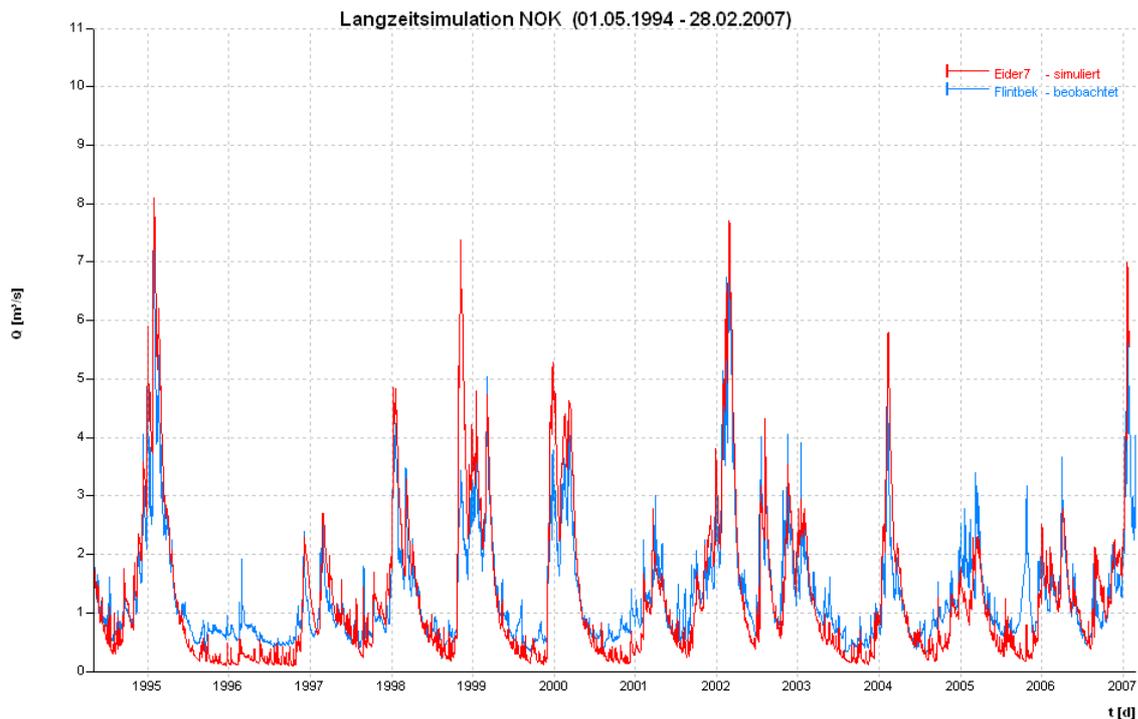


Abbildung 18: Kalibrierung Abflusspegel Flintbek

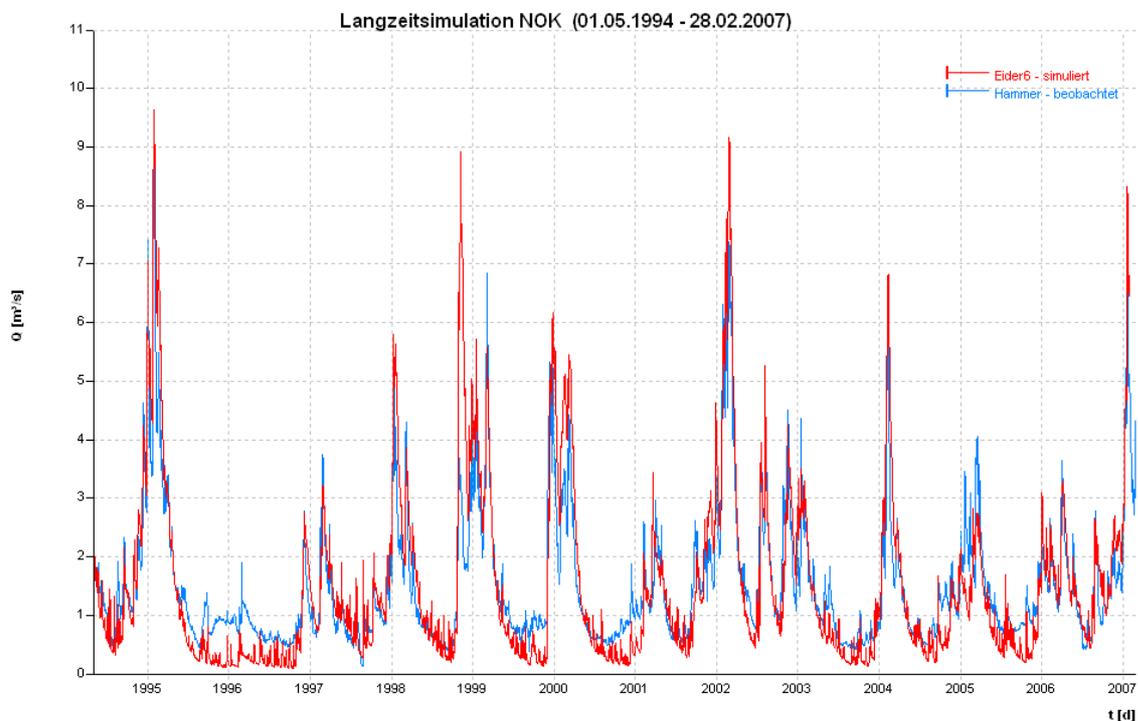


Abbildung 19: Kalibrierung Abflusspegel Hammer

Der Pegel Eiderkaten (blau) zeigt im Vergleich zu den berechneten Abflüssen (rot) insbesondere zu Beginn des Aufzeichnungszeitraumes einige Unstimmigkeiten. Da aber gerade in diesem Zeitraum die berechneten und beobachteten Volumina des Bothkamper Sees eine große Übereinstimmung zeigen, kann von Unstimmigkeiten bei den Pegelaufzeichnungen ausgegangen werden.

Für die simulierten Abflüsse im weiteren Verlauf der Eider bis zum Pegel Hammer liegt eine gute Übereinstimmung zu den Pegelwerten vor. Der simulierte Abfluss besteht zu einem überwiegenden Anteil aus schnell reagierendem Basisabfluss. Interflow und Oberflächenabfluss treten nur in geringem Maß oder gar nicht auf. Die ebenfalls schnell abflusswirksam werdenden Abflüsse von versiegelten Oberflächen haben aufgrund des überwiegend natürlichen Einzugsgebietes geringe Bedeutung. Die Anpassung der Retentionskonstanten wurde über multiplikative Faktoren vorgenommen, die im Anhang B für alle Teilgebiete zusammengestellt sind. Durch die Verwendung von Korrekturfaktoren können während der Kalibrierung die Verhältnisse der zuvor bestimmten Werte nach Riek beibehalten werden. Die Abflüsse der Eider unterliegen aufgrund des Durchlaufens des Westensees vor der Mündung in den NOK weiteren Retentionseinflüssen.

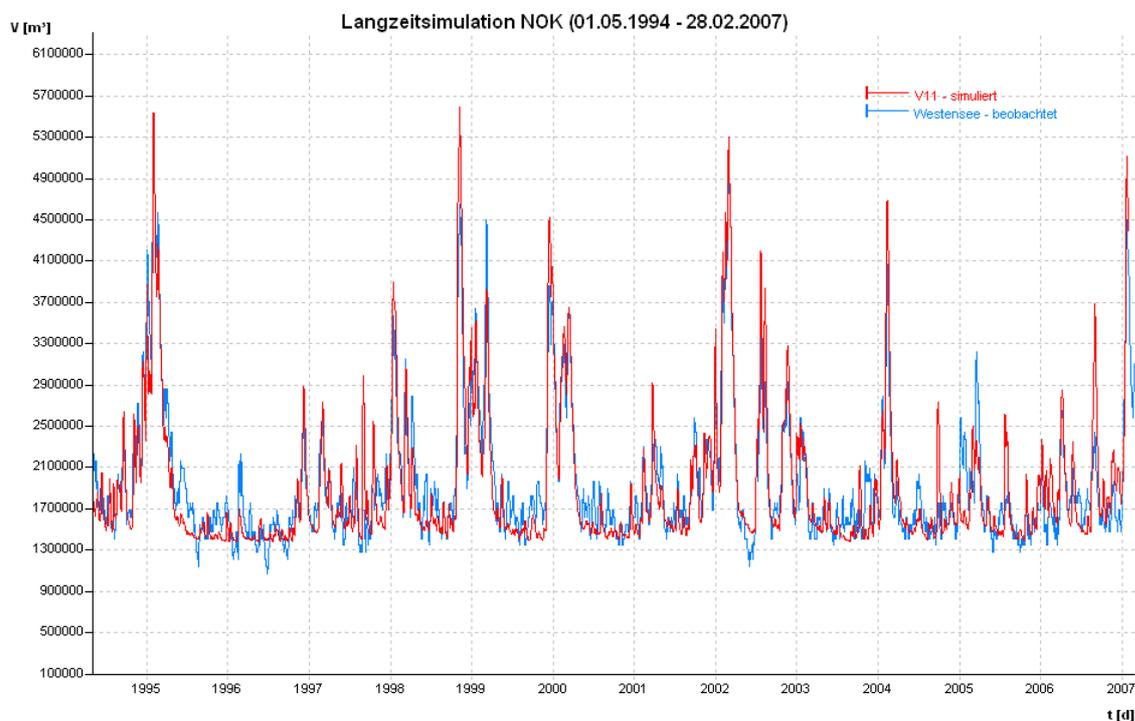


Abbildung 20: Füllvolumen Westensee

Die gute Übereinstimmung der berechneten und der aus den beobachteten Wasserständen abgeleiteten relativen Volumina (siehe Bothkamper See) bestätigt die guten Simulationsergebnisse aller im Oberwasser des Westensees gelegenen Pegel. Die zu erkennenden Schwankungen (unruhiger Verlauf bei den niedrigen Werten) im Volumen des Westensees kann auf den Einfluss von Windstau, Wellengang oder Messungenauigkeiten sowie auf das Verfahren der Umrechnung von  $W$  auf  $V$  zurückgeführt werden. Die in Abbildung 20 gewählte Einteilung auf der Achse der Volumina von  $400.000 \text{ m}^3$  entspricht einer Wasserspiegeldifferenz von  $5,9 \text{ cm}$  (vergleiche Abschnitt 2.7.2).

Das Abflussverhalten im Einzugsgebiet des Wittensees kann, vergleichbar mit dem Einzugsgebiet der Eider, durch schnell reagierenden Basisabfluss abgebildet werden. Interflow und Oberflächenabfluss treten auch hier nur in geringem Maß oder gar nicht auf. Die berechneten Abflüsse können anhand des Wasserstandspegels bei gleichzeitiger Validierung der in Abschnitt 2.7.1 ermittelten Wasserstands-Volumen-Beziehung über einen Vergleich der Füllvolumen überprüft werden.

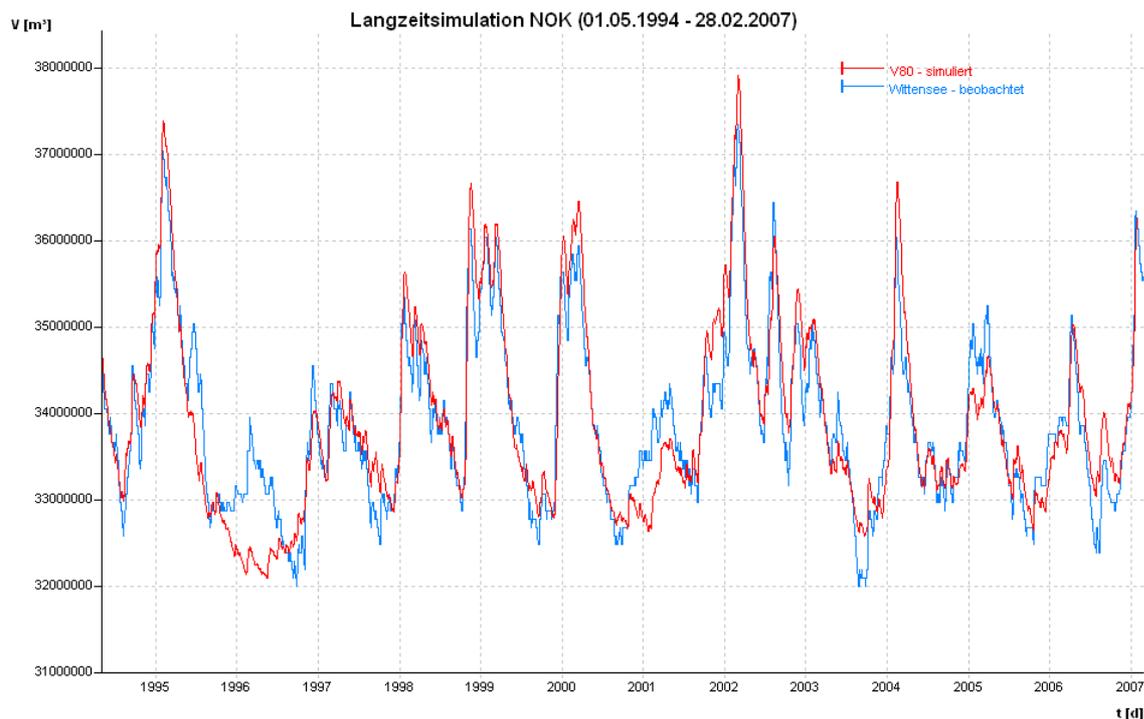


Abbildung 21: Füllvolumen Wittensee

Wie auch bei dem im Quellgebiet der Eider gelegenen Bothkamper See ist bei einem Vergleich der aus Beobachtungsdaten abgeleiteten und simulierten Füllvolumina des Wittensees eine hohe Übereinstimmung zu erkennen. Es fällt auf, dass die größten Abweichungen (1996, 2001 und 2005) bei beiden Seen in ähnlicher Ausprägung zu beobachten sind. Diese Abweichungen können auf der vorliegenden Datenbasis nicht durch einen systematisch in der Modellierung vorliegenden Fehler erklärt werden.

### 3.5.2 Einzugsgebiet der Wehrau

Nach dem Durchfließen des Brahmsees kann das Gewässersystem der Wehrau zum überwiegenden Anteil der Fließgewässer-Landschaft der Niederungen und Mooregebiete zugeordnet werden [7]. Mit dem Abflusspegel in Osterröfeld steht ein Pegel zur Kalibrierung des Abflusses kurz vor der Mündung in den NOK zur Verfügung (Abbildung 22).

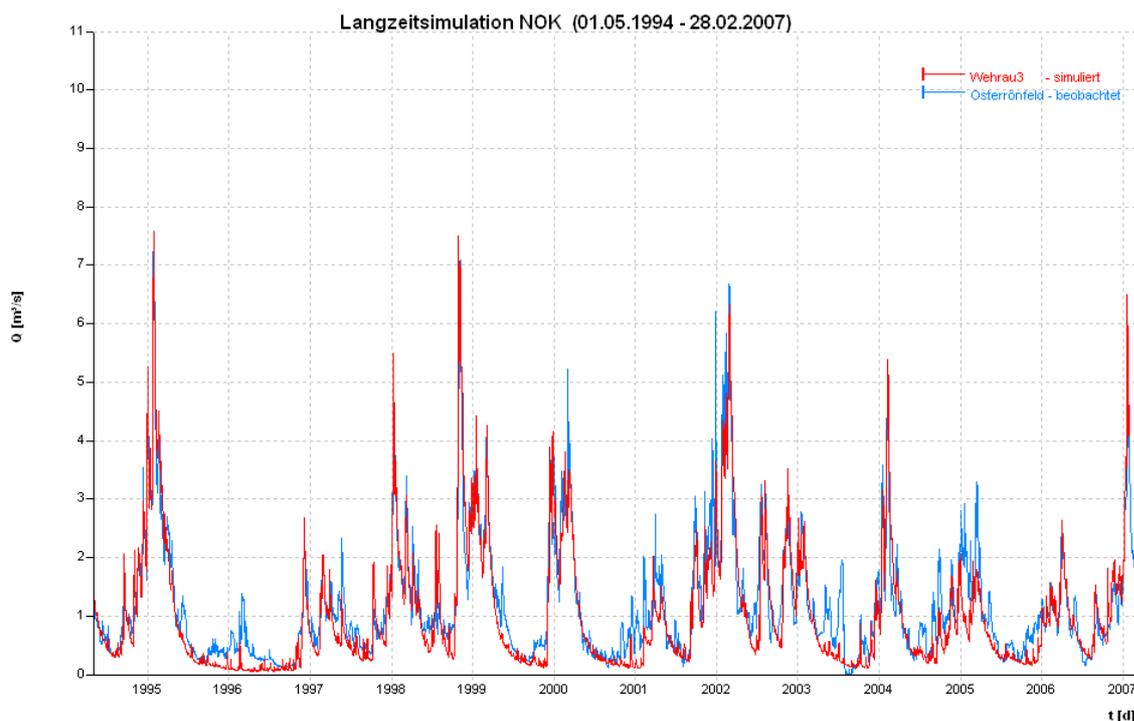


Abbildung 22: Kalibrierung Abflusspegel Osterröfeld

Im Vergleich zu den Abflüssen des Eider-Einzugsgebietes reagieren die Abflüsse in den Niederungsgebieten schneller. Eine Kalibrierung nur mit schnellen Basisabflüssen spiegelt nicht das beobachtete System wieder, weshalb, wie Eingangs beschrieben, bei der Einstellung der Modellparameter die schnelleren Abflussanteile Interflow und natürlicher Oberflächenabfluss

in geringem Maß angeregt wurden. Alle verwendeten Modellparameter sind im Anhang B zusammengestellt.

### 3.5.3 Einzugsgebiet der Jevenau und der westlich gelegenen Zuflüsse

Das Gewässersystem der Jevenau kann zum überwiegenden Anteil der Fließgewässer-Landschaft der Niederungen und Mooregebiete sowie der Niederen Geest zugeordnet werden [7]. Mit dem Abflusspegel in Jevenstedt steht ein Pegel zur Kalibrierung des Abflusses kurz vor der Mündung in den NOK zur Verfügung (Abbildung 25). Im Oberwasser liegen der Pegel Brammer (Abbildung 24) und der Pegel Bokel (Abbildung 23).

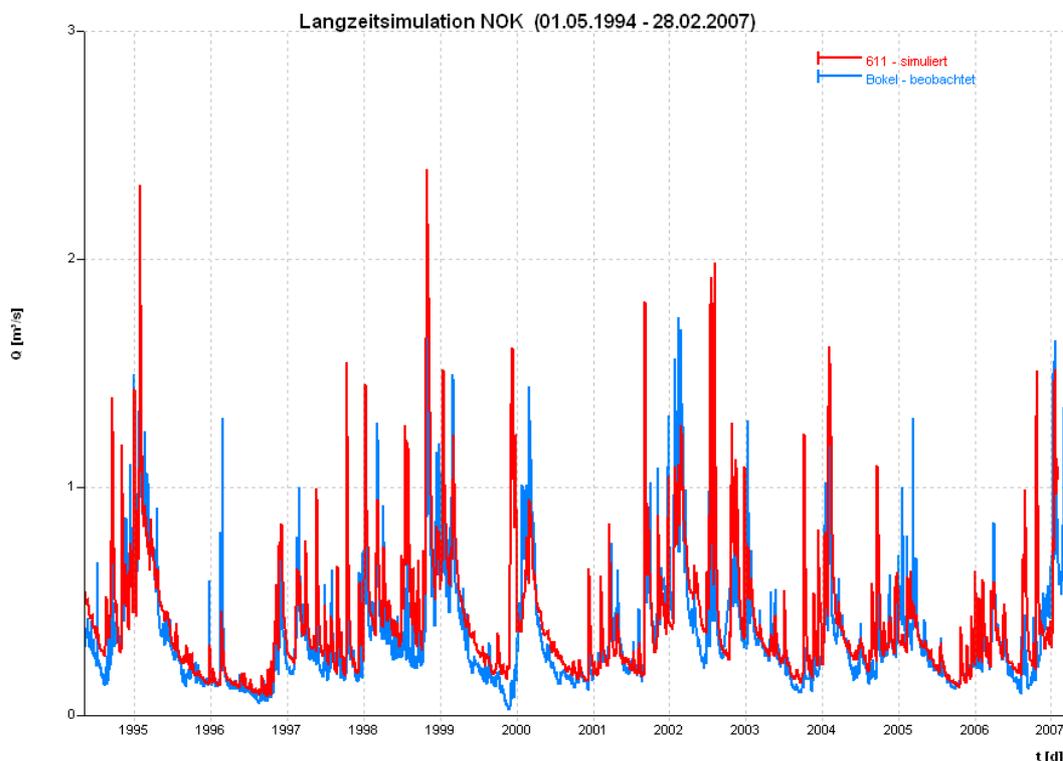


Abbildung 23: Kalibrierung Abflusspegel Bokel

Bereits in den Einzugsgebieten im Quellbereich ist an der Pegelganglinie erkennbar, dass im Vergleich zu den weiter östlich gelegenen Einzugsgebieten des NOK schnelle Abflussanteile kurzfristig zu erhöhten Abflussspenden führen. Dies wird bei dem Pegel Brammer besonders deutlich und ist durch Meliorationsmaßnahmen auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen zu erklären. Die Abbildung dieses Abflussverhaltens ist durch eine entsprechende Anregung von Interflow und natürlichem Oberflächenabfluss gelungen.

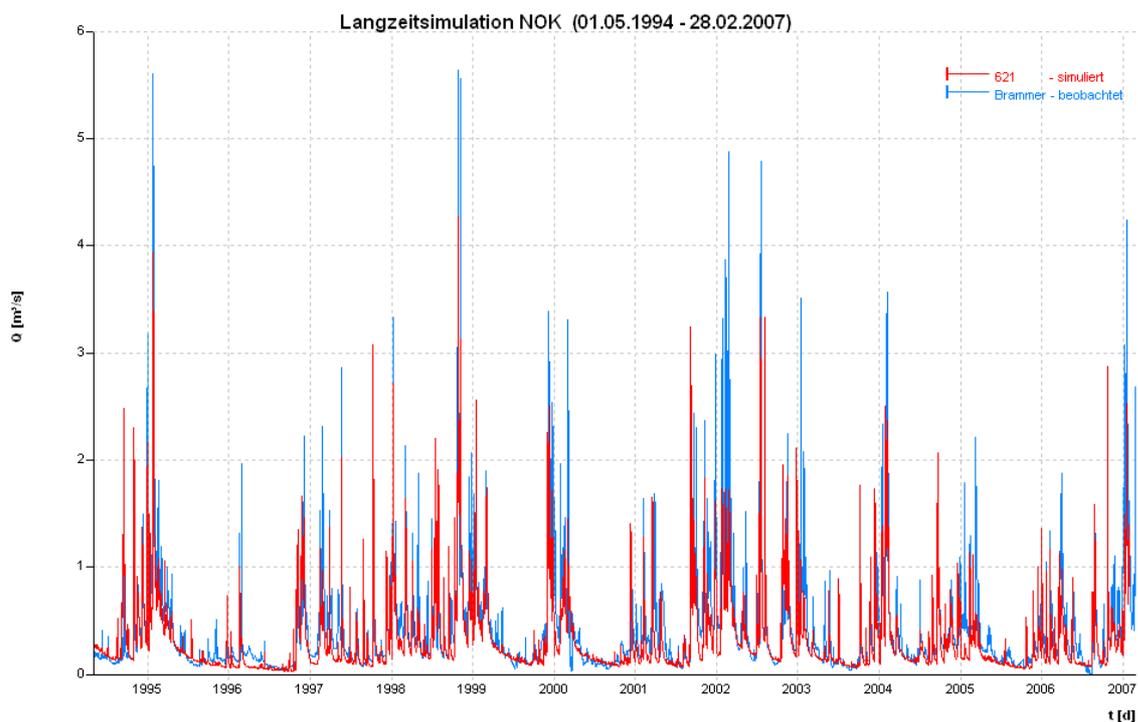


Abbildung 24: Kalibrierung Abflusspegel Brammer

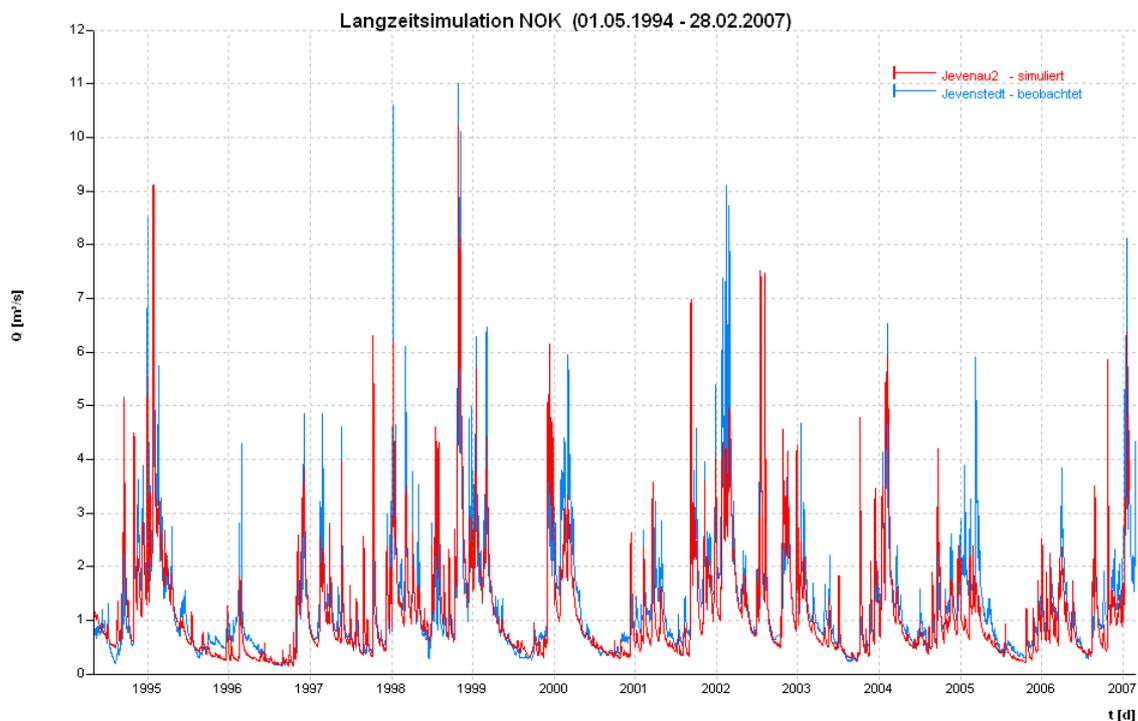


Abbildung 25: Kalibrierung Abflusspegel Jevenstedt

Ein Vergleich der simulierten und beobachteten Abflüsse in Jevenstedt zeigt neben einer guten Abbildung des Abflussgeschehens einige Abweichungen im Erreichen der Abflussspitzen. Zum Teil werden die beobachteten Werte überschätzt, zum Teil aber auch unterschätzt. Diese Abweichungen sind durch nicht repräsentative Niederschlagsdaten zu erklären, die als Punktinformationen nicht immer den wirksamen Gebietsniederschlag richtig wiedergeben.

### 3.5.4 Einzugsgebiet der Haalerau

Das Gewässersystem der Haalerau kann zum überwiegenden Anteil der Fließgewässer-Landschaft der Niederungen und Moorgebiete sowie der Hohen Geest zugeordnet werden [7]. Mit den beiden Abflusspegeln Papenau oben (Abbildung 26) im Quellbereich und dem Pegel Todenbüttel (Abbildung 27) im weiteren Gewässerverlauf stehen zwei Pegel für die Kalibrierung zur Verfügung.

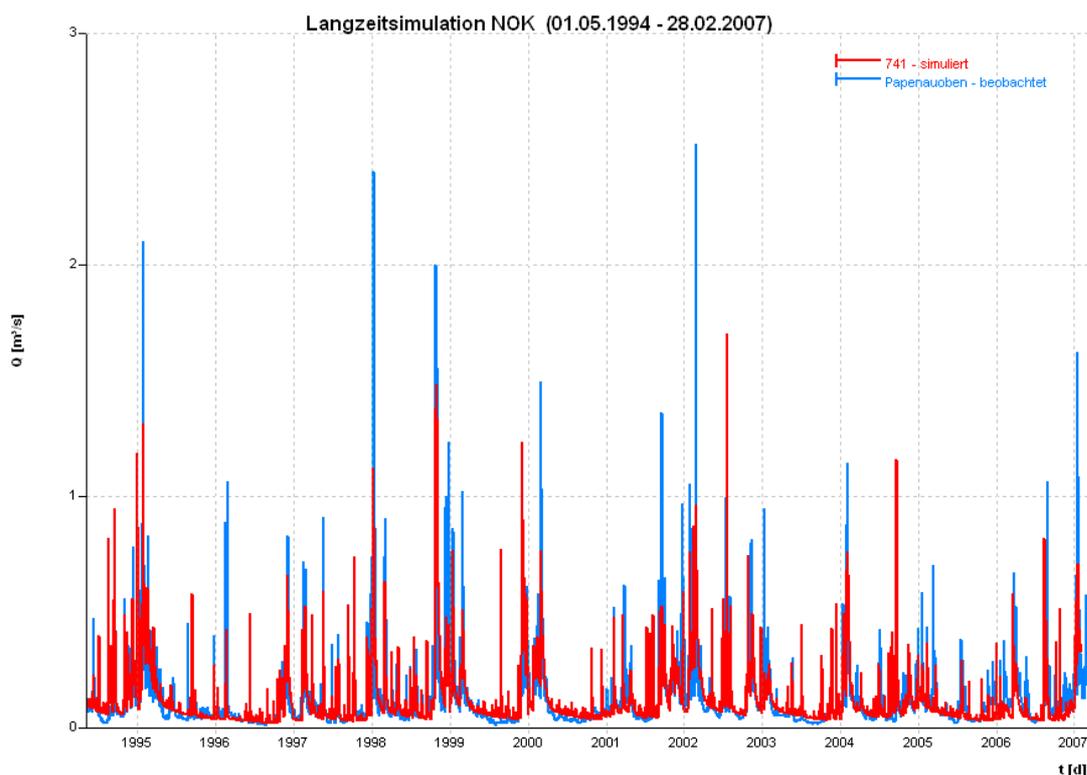


Abbildung 26: Kalibrierung Abflusspegel Papenau oben

Ein Vergleich des Abflussverhaltens mit den im Quellbereich der Jevenau gelegenen Pegeln zeigt Ähnlichkeiten auf. Neben den langsam schwankenden Abflussanteilen treten auch bei dem Pegel Papenau oben spontane Abflussspitzen auf.

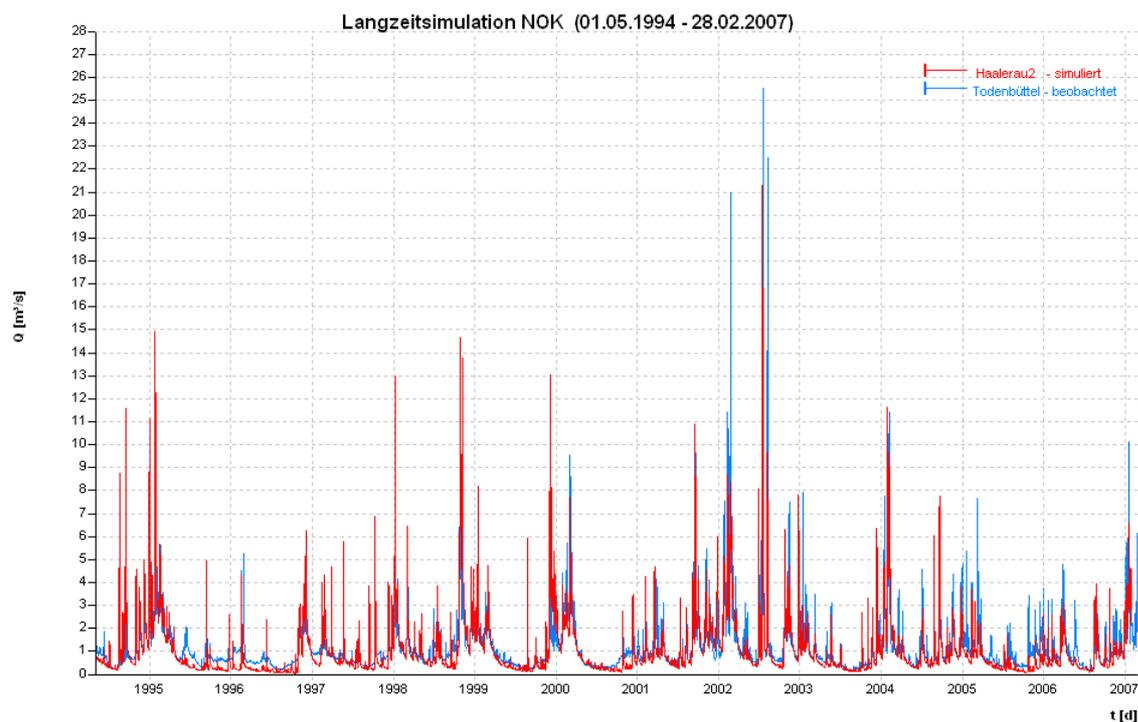


Abbildung 27: Kalibrierung Abflusspegel Todenbüttel

Diese Abflussdynamik ist auch bei dem Pegel in Todenbüttel erkennbar und tritt im Vergleich zu den Abflüssen in Jevenstedt bei den schnellen Abflussanteilen verstärkt auf. Dies wird auch bei den erreichten Spitzenabflüssen deutlich, wobei aber auffallend ist, dass zwischen den Jahren 2000 und 2001 die beobachteten Abflüsse ansteigen. Der Anstieg ist bei einem Vergleich mit den simulierten Werten erkennbar, die vor 2000 die beobachteten Werte in der Spitze überschätzen, nach 2001 aber fast immer unterschätzen. Mögliche Ursachen liegen z.B. in baulichen Änderungen am Gewässer - hierzu liegen aber keine Informationen vor - oder in möglichen Änderungen am Pegel bzw. in der Schlüsselkurve.

### 3.5.5 Einzugsgebiet der Gieselau und des Mühlenbachs

Weiter westlich im Einzugsgebiet des NOK liegt mit Wennbüttel ein Pegel für die Kalibrierung der Gieselau, die der Fließgewässer-Landschaft der Hohen Geest zugeordnet werden kann [7].

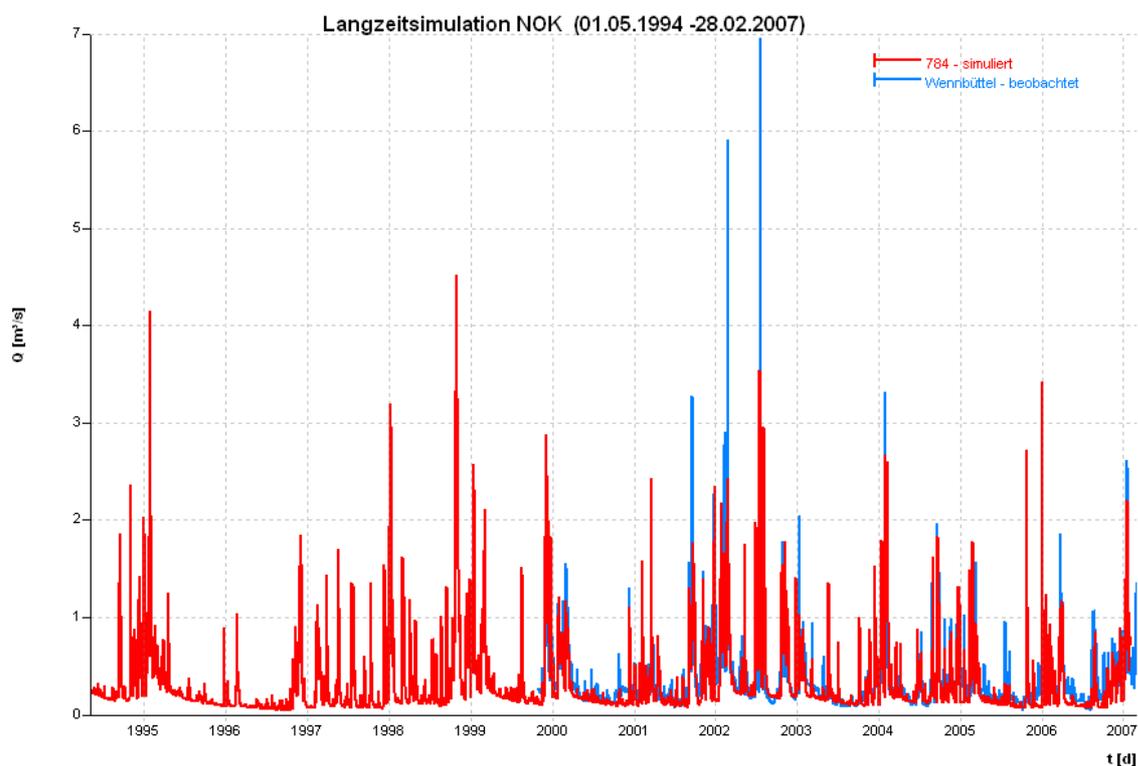


Abbildung 28: Kalibrierung Abflusspegel Wennbüttel

Als Pegel der Hohen Geest ist Wennbüttel im Abflussverhalten den anderen Pegeln der Hohen Geest vergleichbar. Der Anteil der spontan ansteigenden Abflussspitzen ist hoch und ist durch Meliorationsmaßnahmen auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen zu erklären. Die Abbildung dieses Abflussverhaltens ist durch eine entsprechende Anregung von Interflow und natürlichem Oberflächenabfluss gelungen.

Mit Schafstedt als am weitesten westlich gelegenen Pegel im Einzugsgebiet des NOK liegt ein Pegel für die Kalibrierung des Mühlenbachs, welcher der Fließgewässer-Landschaft der Hohen Geest sowie der Niederungen und Moorgebiete zugeordnet werden kann [7].

Der Anteil der spontan ansteigenden Abflussspitzen ist höher als bei allen anderen Abflusspegeln im Einzugsgebiet des NOK und sehr ausgeprägt. Dies deutet auf eine starke Prägung des Einzugsgebietes durch dränierte landwirtschaftlich genutzte Flächen hin. Die modelltechnische Abbildung der Abflüsse ist durch eine starke Anregung von Interflow und Oberflächenabfluss gelungen. Alle verwendeten Modellparameter sind im Anhang B zusammengestellt. In Abbildung 29 sind die errechneten Abflüsse den beobachteten in Schafstedt gegenübergestellt.

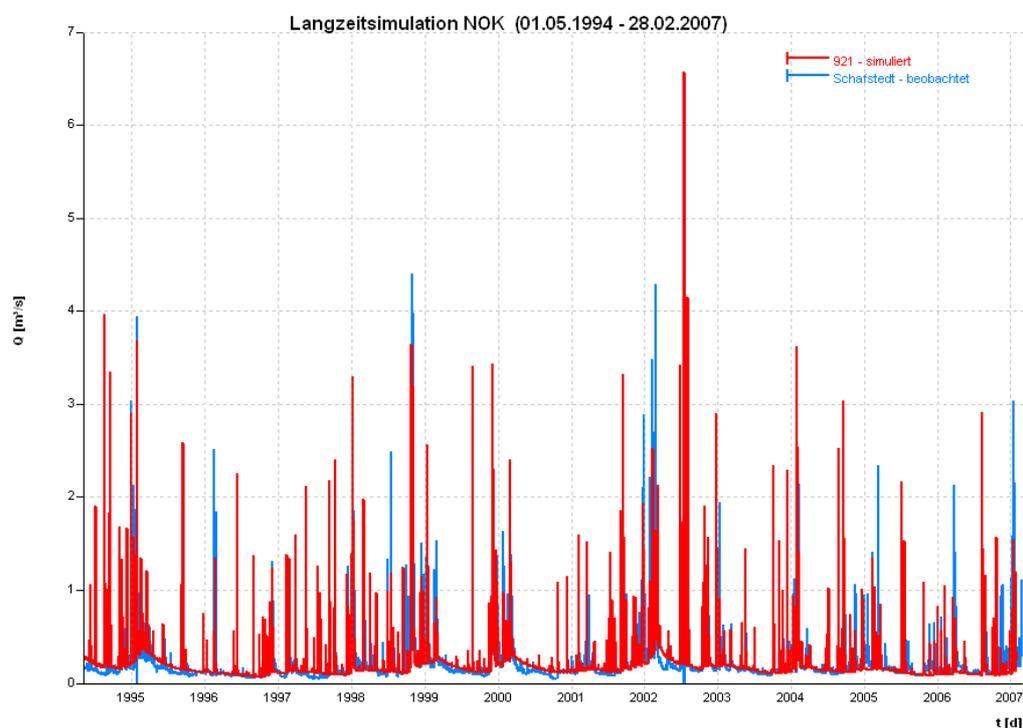


Abbildung 29: Kalibrierung Abflusspegel Schafstedt

### 3.5.6 Übertragung der Kalibriergrößen auf das Einzugsgebiet

In den vorangegangenen Abschnitten sind die Ergebnisse der Kalibrierung anhand einer Gegenüberstellung der errechneten mit den beobachteten Abflüssen dokumentiert worden. Insbesondere für die Unterläufe der beschriebenen Gewässer, die Niederungsbereiche im Westen des Einzugsgebietes und nahe dem NOK stehen keine Pegel zur Verfügung.

Deshalb wurden die Ergebnisse der Kalibrierung auf die Gebiete, für die keine Pegelinformationen zur Verfügung stehen, übertragen. Da bei der Kalibrierung nur multiplikative Faktoren zur Änderung der eingangs bestimmten Gebietskennwerte verwendet werden, können bei diesem Verfahren gebietsspezifische Informationen gewonnen werden. Die Auswahl der verwendeten Bezugspegel richtet sich nach vorliegendem Gefälle und der Zuordnung zu verschiedenen Naturräumen. Die betreffenden Gebiete unterscheiden sich aber insofern überwiegend von den durch Pegel beschreibbaren Gebieten, da sie in Niederungen nahe der Mündung in den NOK liegen oder durch Schöpfwerke den Abfluss in den NOK fördern.

So ist als Bezugspegel für alle Gebiete östlich der Haarbek ost (einschließlich) die Kalibrierung des Pegelinzugsgebietes 611 (Bokel) genutzt worden. Für die Gebiete 760 (Hanerau) und

778 (Broksbek) ist die Kalibrierung des Pegelinzugsgebietes 784 mit dem Bezugspegel Wennbüttel verwendet worden. Für alle übrigen, überwiegend westlich gelegenen Gebiete ist die Kalibrierung des Pegelinzugsgebietes 921 mit dem Bezugspegel Schafstedt verwendet worden.

Unter der Annahme, dass durch die Verwendung der Modelleinstellungen ähnlicher Gebiete das Abflussverhalten dieser Gebiete bestmöglich beschrieben ist, wurden abschließend an jedem Einzugsgebiet eine Überprüfung der einzelnen Teilabflüsse (Oberflächenabfluss, Interflow, Basisabfluss) und des Grundwasserabflusses in benachbarte Gebiete auf Plausibilität vorgenommen und notwendige Anpassungen durchgeführt. Die vorgenommenen Anpassungen der Korrekturfaktoren können der Tabelle in Anhang 2 entnommen werden.

### 3.6 Gesamtzufluss in den NOK

Aus dem Ergebnis der Niederschlag-Abfluss-Berechnung aller Zuflüsse in den NOK und der Teilflächen, die direkt in den NOK entwässern, kann wie in Abbildung 30 dargestellt, die Summe aller Zuflüsse in den NOK ermittelt werden.

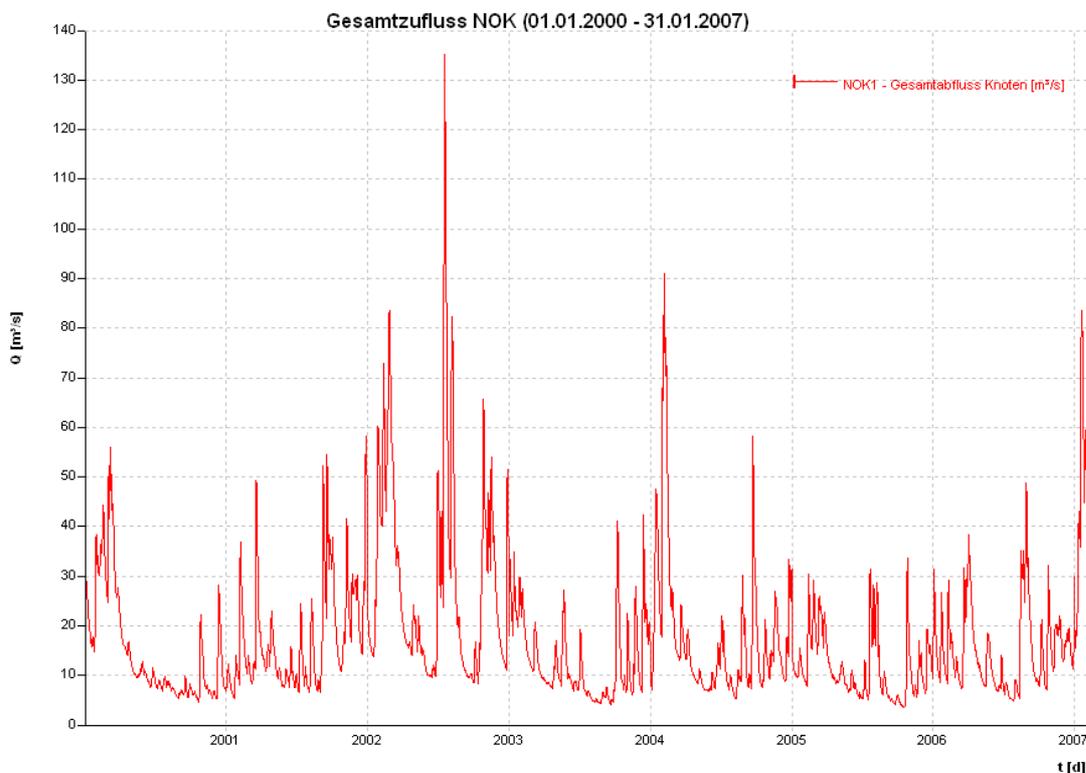


Abbildung 30: Gesamtzufluss in den NOK

## **4 Verfahren zur Abschätzung der Zuflüsse**

Auf Basis verschiedener Bodenvorfeuchtestufen und verschiedener Niederschlagsintensitäten soll im Rahmen dieses Projektes unter Nutzung des kalibrierten Modells eine Datengrundlage für die Ermittlung eines Zuflussprognosediagramms geschaffen werden. Dazu sollen auch Informationen von repräsentativen Abflusspegeln im Einzugsgebiet des NOK genutzt werden.

Zunächst werden in den Abschnitten 4.1 und 4.2 die Datengrundlagen des zur Verfügung stehenden Messnetzes aus Niederschlagstationen und Abflusspegeln auf die Verwendung in einem Vorhersageverfahren hin analysiert. In den anschließenden Abschnitten werden ein Verfahren zur Vorhersage der Zuflüsse entwickelt und die Ergebnisse in Diagrammen dargestellt.

### **4.1 Datengrundlage Niederschlagstationen**

Oft ist die Vorwarnzeit ein kritischer Parameter bei der Vorhersage von Hochwasser an Fließgewässern. Von ihr hängt es ab, welche Katastrophenschutzmaßnahmen vor dem Eintreten der erhöhten Wasserstände umgesetzt werden können. Es werden daher, um Zeit zu gewinnen, oft Niederschlagsvorhersagen des DWD verwendet [16]. Da sich die Reaktionszeit für eine mögliche vorsorgliche Entwässerung des NOK in Brunsbüttel aber sowohl aus der Konzentration der Abflüsse im Einzugsgebiet als auch einem Zeitraum für das Fortschreiten dieses Zuflusses im NOK nach Brunsbüttel (Abschnitt 5.2) zusammensetzt, wird davon ausgegangen, dass mit aktuellen beobachteten Niederschlägen gearbeitet werden kann.

Die Kalibrierung des NA-Modells ist mit allen verfügbaren Niederschlagsdaten, die bis einschließlich Ende Januar 2007 registriert wurden, vorgenommen worden. Die Stationen sind in Abbildung 14 mit der entsprechenden Zuordnung der NA-Modell-Teilgebiete dargestellt. Nicht alle dieser Stationen sind derzeit noch im Einsatz und auch für eine sofortige Verwendung in der Zuflussvorhersage entsprechend kurzfristig abrufbar. Alle aktuell aktiven und online abrufbaren Niederschlagsstationen in der Region des NOK sind mit einer räumlichen Zuordnung der Modellteilgebiete in Abbildung 31 dargestellt.

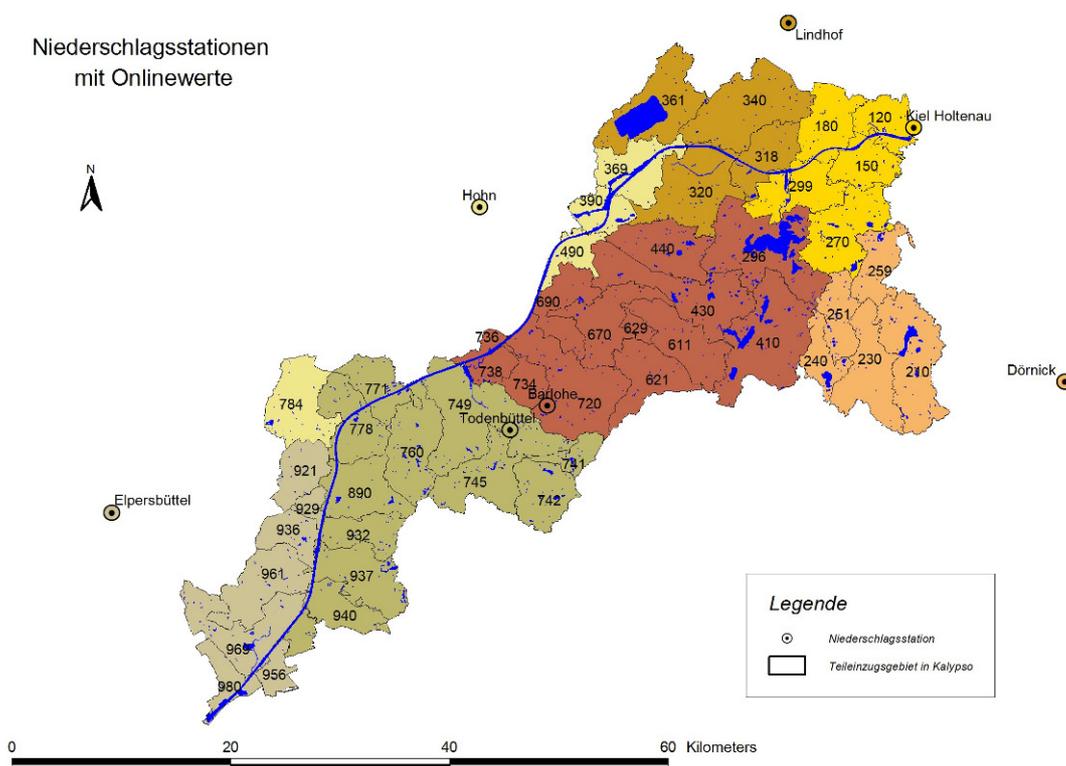


Abbildung 31: Aktive und online verfügbare Niederschlagstationen

Da für die Vorhersage nur die Stationen verwendet werden können, deren Daten kurzfristig online zur Verfügung stehen, wird erneut eine Simulation der Abflüsse mit dem kalibrierten Modell unter Verwendung der gemäß Abbildung 31 zugeordneten Niederschlagstationen durchgeführt. Eine Abschätzung des Einflusses einer entsprechend reduzierten Datengrundlage, ist durch einen Vergleich der so erzeugten Ergebnisse mit den Ergebnissen der Kalibrierung ableitbar. Dazu werden die folgenden Bereiche des NOK betrachtet:

1. O: Der Bereich Ost beinhaltet alle Zuflüsse aus dem Gebiet 369 und östlich davon. Dies sind insbesondere die Zuflüsse der Eider und der Schirnauer Au.
2. MO: Der Bereich Mitte-Ost beinhaltet alle Zuflüsse aus dem Gebiet 690 und östlich davon bis einschließlich des Gebietes 390. Hier sind insbesondere die Zuflüsse der Jenvenau und der Wehrau enthalten.
3. MW: Der Bereich Mitte-West beinhaltet alle Zuflüsse aus dem Gebiet 784 und östlich davon bis einschließlich des Gebietes 720. Hier sind insbesondere die Zuflüsse der Haalerau und der Gieselau enthalten.

4. W: Der Bereich West beinhaltet alle Zuflüsse aus dem Gebiet 890 und westlich davon. Dies sind insbesondere die Zuflüsse des Mühlenbachs und der über Pumpwerke angeschlossenen Gebiete.

Für diese vier Bereiche ist der Zufluss unter Verwendung der „online“-Stationen im Vergleich zu den Abflüssen des kalibrierten Modells in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

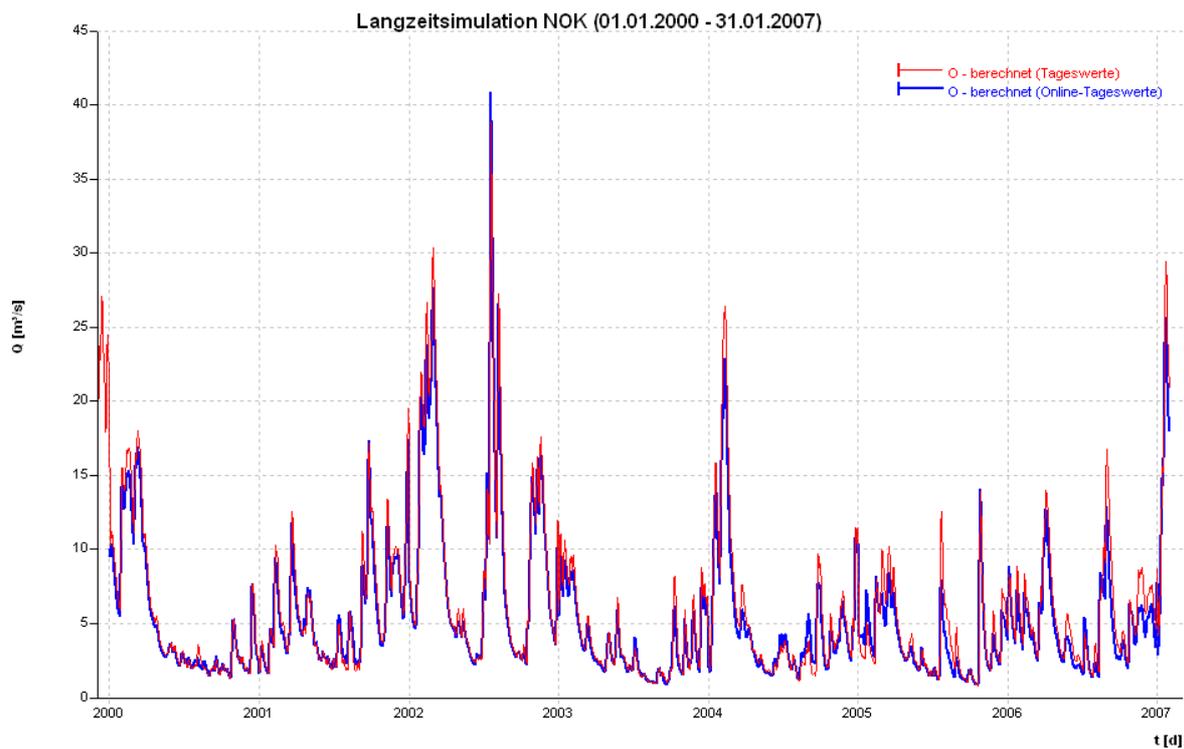


Abbildung 32: Verwendung von online-Stationen – Auswirkungen auf den Abfluss (O)

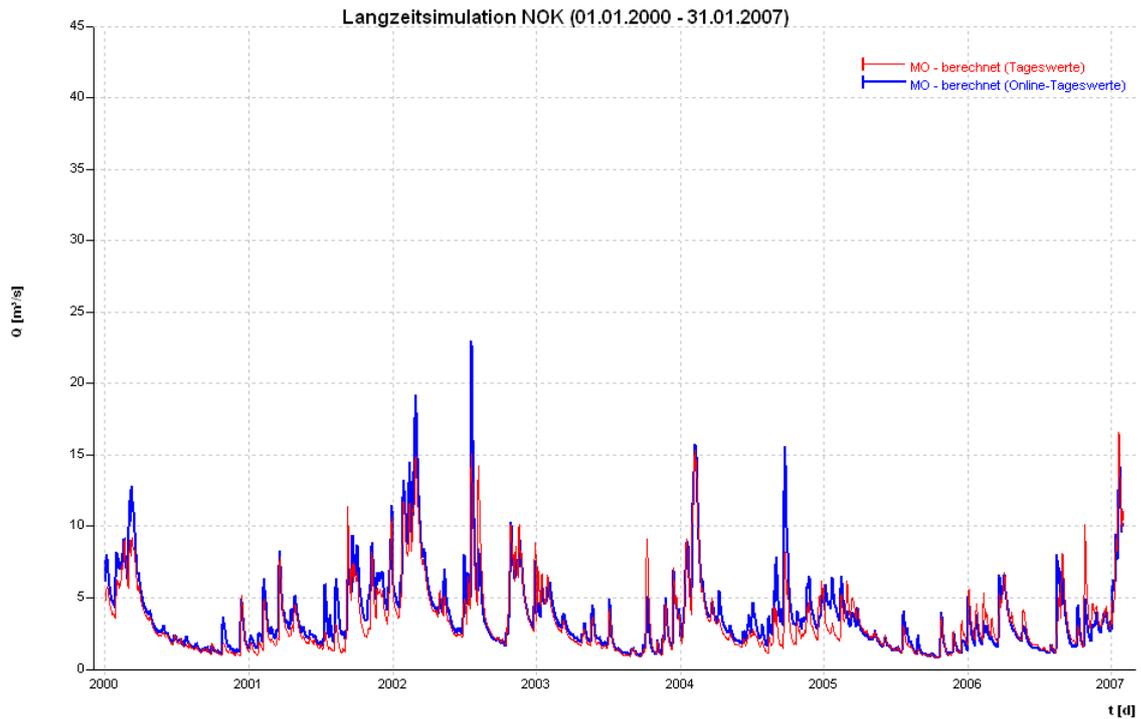


Abbildung 33: Verwendung von online-Stationen – Auswirkungen auf den Abfluss (MO)

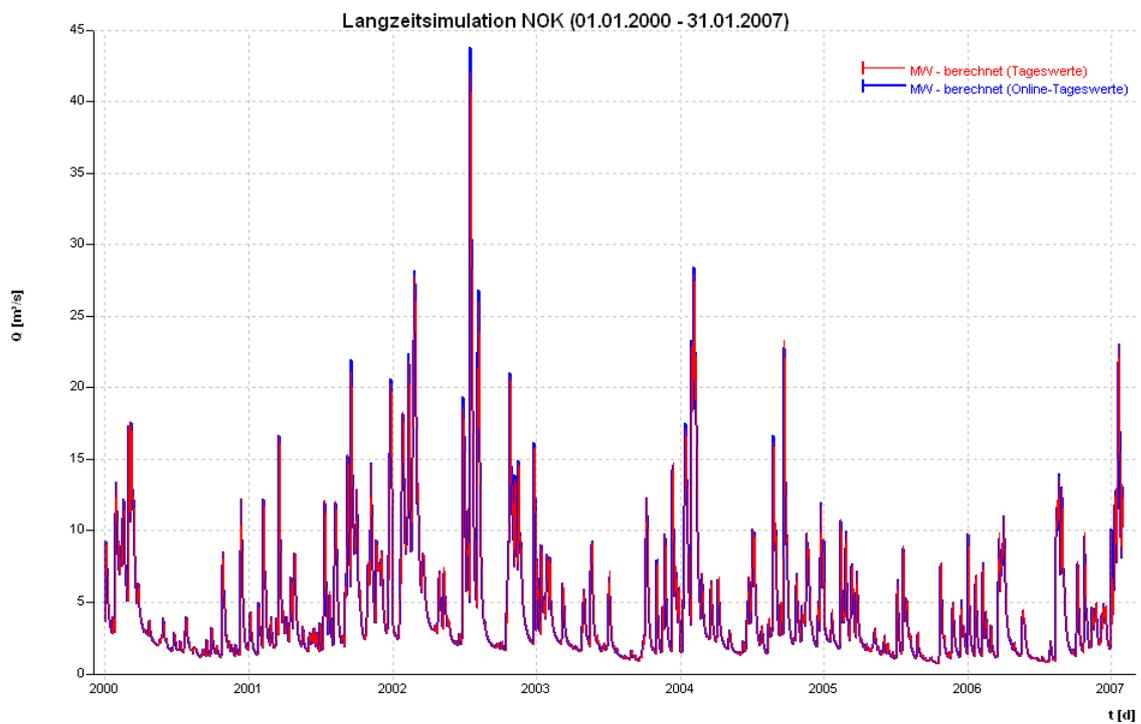


Abbildung 34: Verwendung von online-Stationen – Auswirkungen auf den Abfluss (MW)

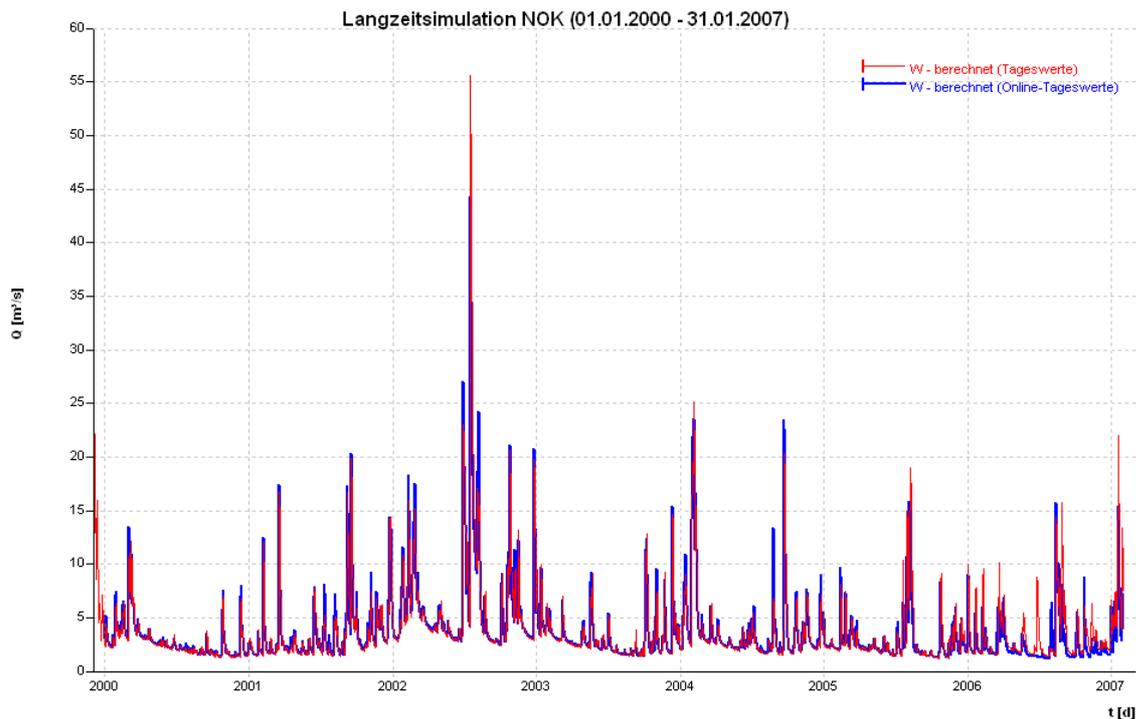


Abbildung 35: Verwendung von online-Stationen – Auswirkungen auf den Abfluss (W)

Es wird deutlich, dass nur geringe Abweichungen bei der Verwendung der veränderten Niederschlags-Datengrundlage auftreten.

## 4.2 Pegelkorrelation

Die Ähnlichkeit im Verlauf zweier Pegel kann mit der Bestimmung eines Korrelationskoeffizienten beschrieben werden. Dieser beschreibt Abhängigkeiten im Verlauf zweier Messvariablen durch den Vergleich jedes von N Objekten der Variable. Im Gegensatz zur Kovarianz wird bei der Berechnung des Korrelationskoeffizienten eine Skalierung der betrachteten Werte durchgeführt, so dass das Ergebnis zwischen minus eins und plus eins liegt. Eine Korrelation von plus eins besagt, dass sich die Pegel gleichförmig zueinander bewegen. Minus eins weist auf einen gegenläufigen Verlauf hin. Liegt der Wert der Korrelation bei Null, so sind die Verläufe der Pegelzeitreihen unabhängig voneinander. Weitergehende statistische Methoden ermöglichen eine unterschiedliche Gewichtung bestimmter Wertebereiche der betrachteten Messvariablen. Da für die vorliegende Fragestellung untersucht werden soll, ob durch einen Pegel die Abflussdynamik mehrerer Bereiche des NOK-Einzugsgebietes wiedergegeben werden kann, wird eine einfache Korrelation zwischen den verschiedenen Zeitreihen durchgeführt. Diese

wurden für den Zeitraum 01.01.2004 bis 31.12.2006 vorgenommen. An den Pegeln Schmalstede wurde an zwei, an dem Pegel Todenbüttel an sieben Tagen Pegelausfälle für die Berechnung des Korrelationskoeffizienten durch sinnvoll angenommene Werte ersetzt. In Tabelle 10 sind die ermittelten Korrelationskoeffizienten für die verschiedenen „Pegelpaare“ dargestellt.

Tabelle 10: Korrelationskoeffizienten für die Paare aller Abflusspegel im Einzugsgebiet des NOK

		Eider				Wehrau	Jevenau			Haalerau		Gieselau	Mühlenbach
		Eiderkaten	Schmalstede	Flintbek	Hammer	Osterrönfeld	Bokel	Brammer	Jevenstedt	Papaenau oben	Todenbüttel	Wennbüttel	Schafstedt
Eider	Eiderkaten		0,93	0,84	0,95	0,9	0,89	0,8	0,93	0,71	0,7	0,66	0,65
	Schmalstede	0,93		0,8	0,91	0,85	0,85	0,73	0,85	0,66	0,62	0,61	0,6
	Flintbek	0,84	0,8		0,84	0,77	0,73	0,67	0,78	0,64	0,61	0,58	0,55
	Hammer	0,95	0,91	0,84		0,87	0,83	0,71	0,87	0,62	0,57	0,55	0,55
Wehrau	Osterrönfeld	0,9	0,85	0,77	0,87		0,89	0,79	0,92	0,63	0,67	0,63	0,59
Jevenau	Bokel	0,89	0,85	0,73	0,83	0,89		0,88	0,95	0,72	0,79	0,75	0,73
	Brammer	0,8	0,73	0,67	0,71	0,79	0,88		0,9	0,85	0,92	0,88	0,82
	Jevenstedt	0,93	0,85	0,78	0,87	0,92	0,95	0,9		0,77	0,79	0,76	0,75
Haalerau	Papaenau oben	0,71	0,66	0,64	0,62	0,63	0,72	0,85	0,77		0,89	0,82	0,7
	Todenbüttel	0,7	0,62	0,61	0,57	0,67	0,79	0,92	0,79	0,89		0,9	0,77
Gieselau	Wennbüttel	0,66	0,61	0,58	0,55	0,63	0,75	0,88	0,76	0,82	0,9		0,8
Mühlenbach	Schafstedt	0,65	0,6	0,55	0,55	0,59	0,73	0,82	0,75	0,7	0,77	0,8	

Ausgehend von Todenbüttel als Bezugspegel, hier besteht derzeit die Möglichkeit der Datenfernübertragung, ist festzustellen, dass insbesondere zu den Pegeln des westlichen Einzugsgebietes des NOK (Schafstedt, Wennbüttel und Papenau oben) eine gute Korrelation besteht. Es werden auch gute Übereinstimmungen zu den Pegeln der Jevenau (Jevenstedt, Brammer, Bokel) deutlich. Diese werden aber noch besser durch den Pegel Jevenstedt im Mündungsbe- reich der Jevenau widergespiegelt, der auch alle anderen Pegel im östlichen Bereich des NOK-Einzugsgebietes gut repräsentiert.

Es scheint daher notwendig, wenigstens auch den Pegel in Jevenstedt mit Fernübertragungstechnologie auszustatten, um das Abflussverhalten des NOK-Einzugsgebietes durch zwei repräsentative Pegel wiedergeben zu können.

#### 4.3 Entwicklung der Vorhersagediagramme

Zur Hochwasserprognose sind in der Literatur zahlreiche Ansätze und Methoden beschrieben, von denen in [16] einige erwähnt werden. Die vorliegende Situation erfordert die Vorhersage einer Summe aus verschiedenen Einzelzuflüssen in den NOK, die im Einzelnen alle Naturräume Schleswig-Holsteins durchfließen. Mit Hilfe der Abflusspegel des Einzugsgebietes kann keine Bestimmung des Gesamtabflusses vorgenommen werden, da die Pegel mitten in den Gebieten liegen und an einigen Zuflüssen in den NOK keine Pegel vorliegen. Insofern liefert das Niederschlag-Abfluss-Modell die Gesamtzufüsse in den NOK.

Für die Abflussentstehung sind als Einflussfaktoren in der Natur neben dem aktuellen Niederschlag die Bodenfeuchte und der Grundwasserstand des oberflächennahen Leiters, von dem die Höhe der Grundwasserabflussanteile des Gesamtabflusses abhängen, wichtig. Um diese Einflüsse in die Prognose mit einfließen zu lassen, müssen Größen herangezogen werden, die einerseits wegen der erforderlichen Handhabbarkeit der Ergebnisdiagramme einfach und schnell zugänglich, dabei aber nicht zu komplex in der Verarbeitung sein sollen. Die Bodenfeuchte kann pauschal und kurzfristig nicht bestimmt werden. Neben der fehlenden Bezugsquelle sind sowohl Speicherkapazität als auch Speicherverlauf über die Zeit von den vorliegenden Bodenarten abhängig. Deshalb wird als repräsentativer Wert für den Einfluss der Bodenvorfeuchte auf den Abfluss die Summe der Niederschläge der letzten drei Tage gewählt. Dieser Zeitraum ist nach Sichtung der Abläufe verschiedener Hochwasserereignisse als geeignet erachtet worden. Mit den Abflusswerten für Referenzpegel im Einzugsgebiet stehen als Eingangsgrößen für die Abflussprognose Werte zur Verfügung, in denen neben anderen Faktoren auch der Einfluss des oberflächennahen Grundwasserstandes berücksichtigt wird.

Somit werden in Anlehnung an das in [16] beschriebene Vorgehen (worin nur zwei Einflussfaktoren gewählt werden) drei Einflussfaktoren gewählt: Der aktuelle Niederschlag, der den zu prognostizierenden Hochwasserzufluss auslöst; der Vorregen als Maß für die Bodenvorfeuchte, die einen hohen Einfluss auf das betrachtete Hochwasserereignis hat, wie bei einer Analyse der im Einzugsgebiet aufgetretenen Hochwässer deutlich wird; und als dritte Größe ein Referenzpegel im Einzugsgebiet, der etwas weiter zurückliegende Ereignisse und Vorbedingungen als die Bodenfeuchte für die Abflussentstehung als Maß für die Abflussbereitschaft des Gebietes wiedergibt.

Um differenzierte Bezugsdaten (Niederschlag und Referenzpegel) zu haben, werden die in Abschnitt 4.1 beschriebenen Abschnitte des NOK auch für die Entwicklung der Prognosediagramme beibehalten. Damit besteht auch die Möglichkeit, unterschiedliche Fließzeiten im NOK in Abhängigkeit der Zuflussposition weitergehend zu betrachten.

In Abbildung 36 ist beispielhaft für den Bereich Ost des NOK und einer starken Bodenvorfeuchte (Vorregen > 20mm) die Entwicklung aus den Datenpunkten dargestellt. In dem Diagramm ist rechts der aktuelle Niederschlag als Tageswert für die Station Bordesholm und hoch der Abfluss für den Bezugspegel Hammer dargestellt. Für diese Eingangsdaten ist die entsprechende Spitze der Zuflüsse in den Bereich NOK-Ost aus den Daten des kalibrierten NA-Modells ausgelesen und in dem Diagramm aufgetragen worden.

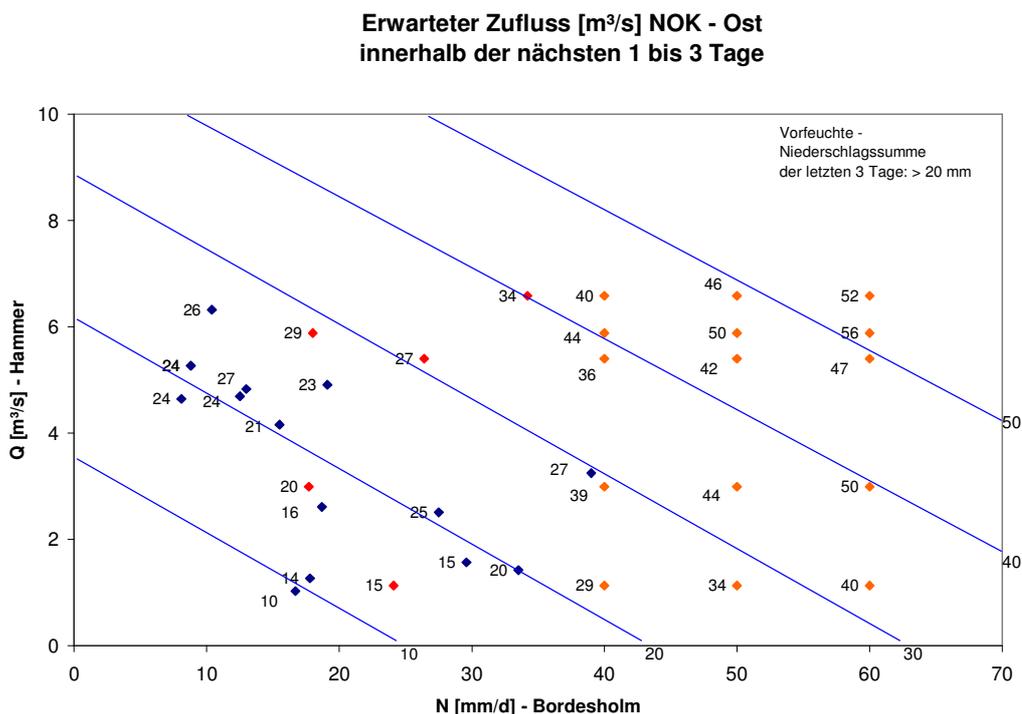


Abbildung 36: Entwicklung des Vorhersagediagramms NOK-Ost, Vorregen > 20mm

Aus den Hochwasserereignissen der letzten 30 Jahre kann zwar eine gute Datengrundlage für die Prognose in den unteren Abflussbereichen abgeleitet werden, für die extremen Ereignisse mit sehr geringer Auftretenswahrscheinlichkeit stehen aber je nach betrachteter Vorregenstufe keine oder zu wenig Ereignisse zur Verfügung. Deshalb wurde für ausgewählte Ereignisse eine Änderung der Niederschlagssumme des Tageswertes in den Eingabedaten des hydrologischen Modells vorgenommen, der die aufgetretene Abflussspitze ausgelöst hat. Mit einer erneuten Berechnung sind so mit dem Modell für die erhöhten Niederschlagswerte die entsprechenden Zuflüsse in den NOK bestimmt worden. So können Datenpunkte in den Bereichen mit sehr geringer Auftretenswahrscheinlichkeit erzeugt und die Prognose sehr hoher Zuflüsse auf der Basis einer guten Datengrundlage abgeleitet werden. Die Ereignisse, die als Basis für die Niederschlagsänderung dienen, sowie die daraus für die Niederschlagstageswerte 40 mm, 50 mm und 60 mm abgeleiteten Ereignisse sind als rote Datenpunkte im Diagramm aufgetragen.

Auf Basis dieser Ereignisse ist der prognostizierte Zuflusswert für jeden der vier NOK-Abschnitte mit den entsprechenden Vorregenstufen ermittelt worden. In [16] ist bei der Ableitung der Vorhersagediagramme eine vergleichbare Streuung der Einzelwerte feststellbar.

Alle weiteren Diagramme, aus denen die Ergebnisdiagramme für die Prognose abgeleitet worden sind, sind im Anhang D dargestellt.

#### **4.4 Ergebnisse**

Auf Basis des in Abschnitt 4.3 gezeigten Vorgehens sind 12 Zuflussprognosediagramme entwickelt worden, die in dem nachfolgenden Abschnitt dargestellt sind. Obwohl dieses Vorgehen die Auswahl von vier aus den 12 vorhandenen Diagrammen mit der entsprechenden Zusammenstellung der Eingangsdaten für die Zuflussbestimmung erfordert, wird von der Erstellung eines einzigen Prognosediagramms für den Gesamtzufluss abgesehen. Die prognostizierten Zuflüsse würden größeren Unsicherheiten unterliegen, da nur ein Bezugspegel und ein Niederschlagswert für das gesamte Einzugsgebiet verwendet werden. Für eine Abschätzung des Gesamtzuflusses auf der Basis der Summe der vier Teilzuflüsse ist zu beachten, dass in den verschiedenen NOK-Abschnitten die Zuflüsse unterschiedlich schnell als Reaktion auf den Regen entstehen. Deshalb ist ein gleichzeitiger Zufluss der prognostizierten Spitzen in den NOK nicht sehr wahrscheinlich. Eine Addition der vier Teilzuflüsse wird daher den tatsächlichen Spitzenzufluss oftmals überschätzen.

Auf der Achse der Niederschlagsdaten sind bei den Diagrammen der NOK-Bereiche Ost und West die Stationen Bordesholm und Brunsbüttel aufgetragen, da diese als repräsentative Stationen für die Entwicklung der Diagramme verwendet worden sind. Diese Stationen stellen derzeit online aber keine Daten zur Verfügung. Folglich müssen für die Verwendung der Diagramme naheliegende und verfügbare Daten genutzt werden.

**Erwarteter Zufluss [m<sup>3</sup>/s] NOK - Ost  
innerhalb der nächsten 1 bis 3 Tage**

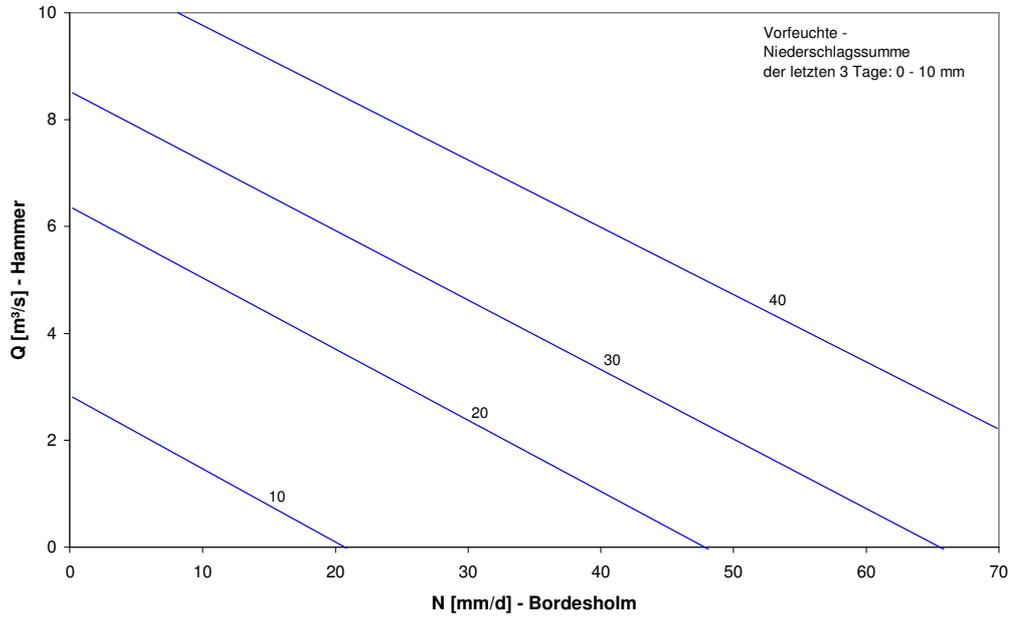


Abbildung 37: Erwarteter Zufluss NOK-Ost; Vorregen 0 - 10 mm

**Erwarteter Zufluss [m<sup>3</sup>/s] NOK - Ost  
innerhalb der nächsten 1 bis 3 Tage**

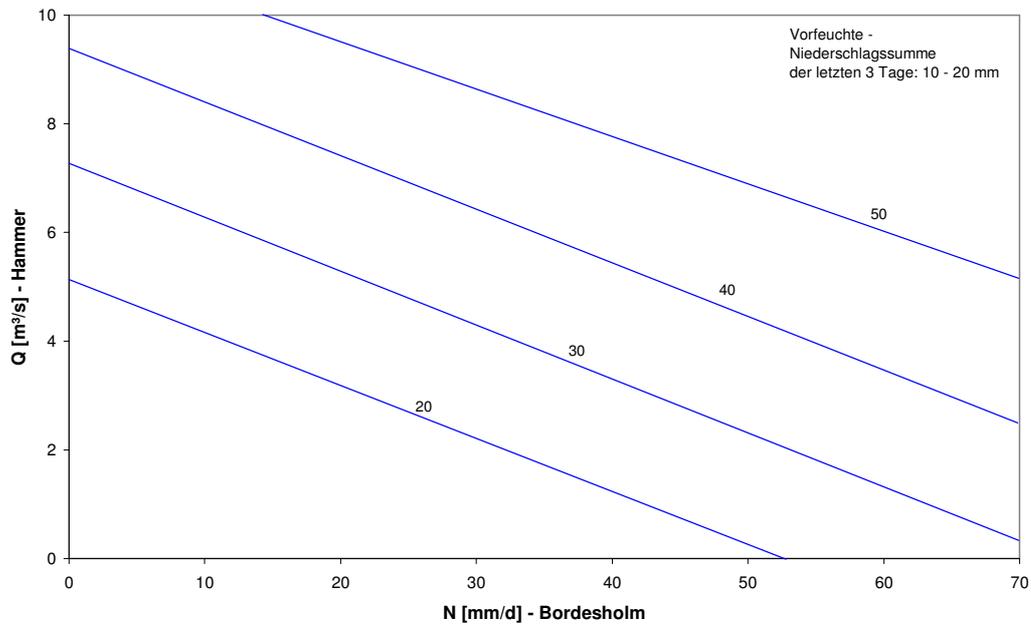


Abbildung 38: Erwarteter Zufluss NOK-Ost; Vorregen 10 - 20 mm

**Erwarteter Zufluss [m³/s] NOK - Ost  
innerhalb der nächsten 1 bis 3 Tage**

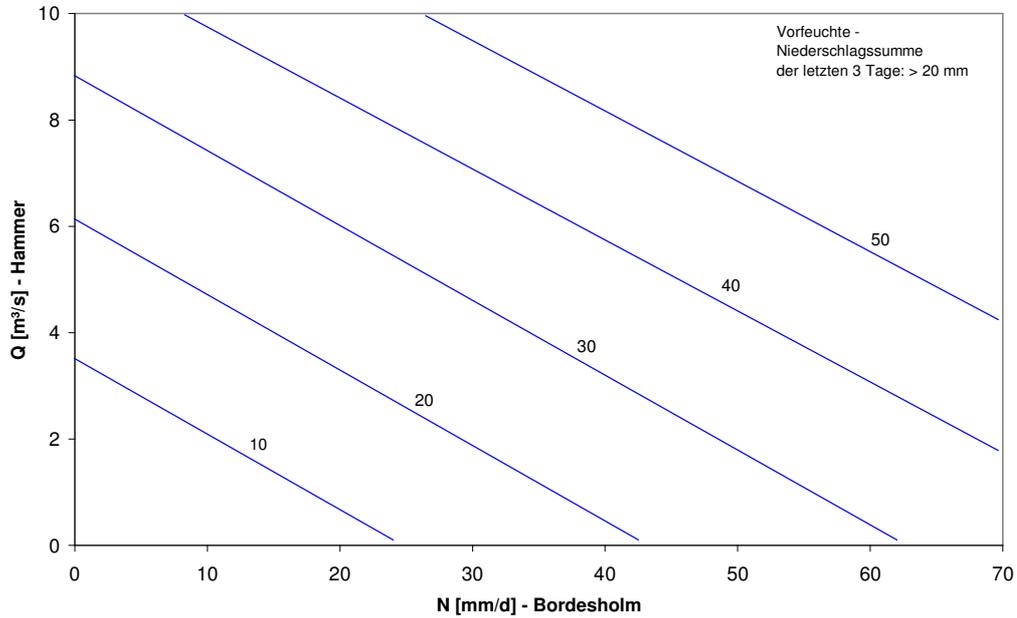


Abbildung 39: Erwarteter Zufluss NOK-Ost; Vorregen > 20 mm

**Erwarteter Zufluss [m³/s] NOK - Mitte-Ost  
innerhalb der nächsten 1 bis 3 Tage**

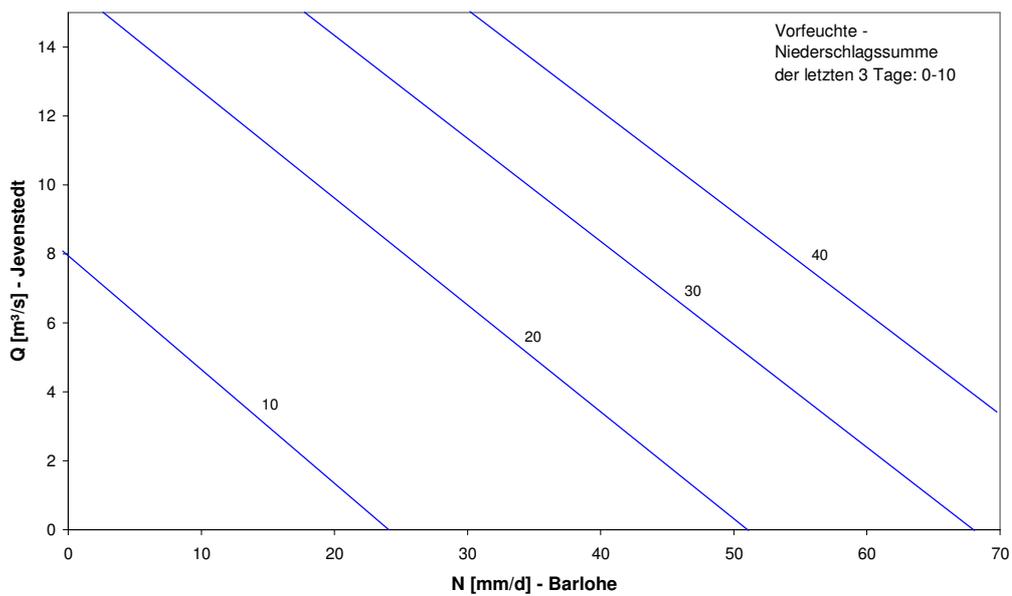


Abbildung 40: Erwarteter Zufluss NOK-Mitte/Ost; Vorregen 0 - 10 mm

**Erwarteter Zufluss [m<sup>3</sup>/s] NOK - Mitte-Ost  
innerhalb der nächsten 1 bis 3 Tage**

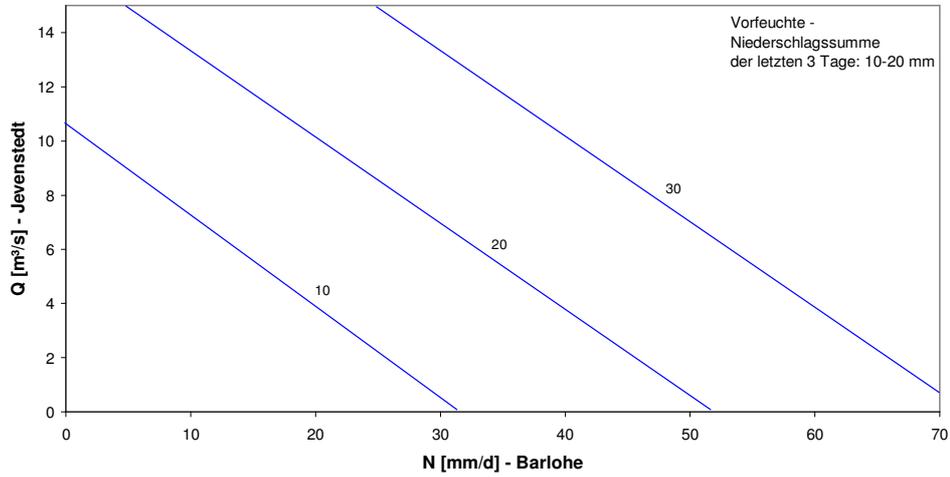


Abbildung 41: Erwarteter Zufluss NOK-Mitte/Ost; Vorregen 10 - 20 mm

**Erwarteter Zufluss [m<sup>3</sup>/s] NOK - Mitte-Ost  
innerhalb der nächsten 1 bis 3 Tage**

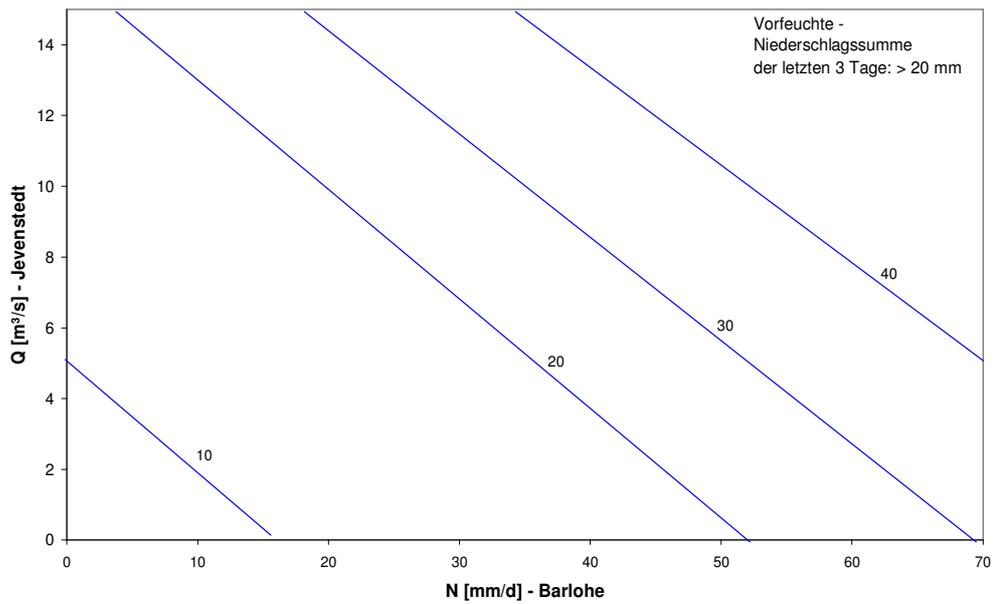


Abbildung 42: Erwarteter Zufluss NOK-Mitte/Ost; Vorregen > 20 mm

**Erwarteter Zufluss [m<sup>3</sup>/s] NOK - Mittewest  
innerhalb der nächsten 1 bis 3 Tage**

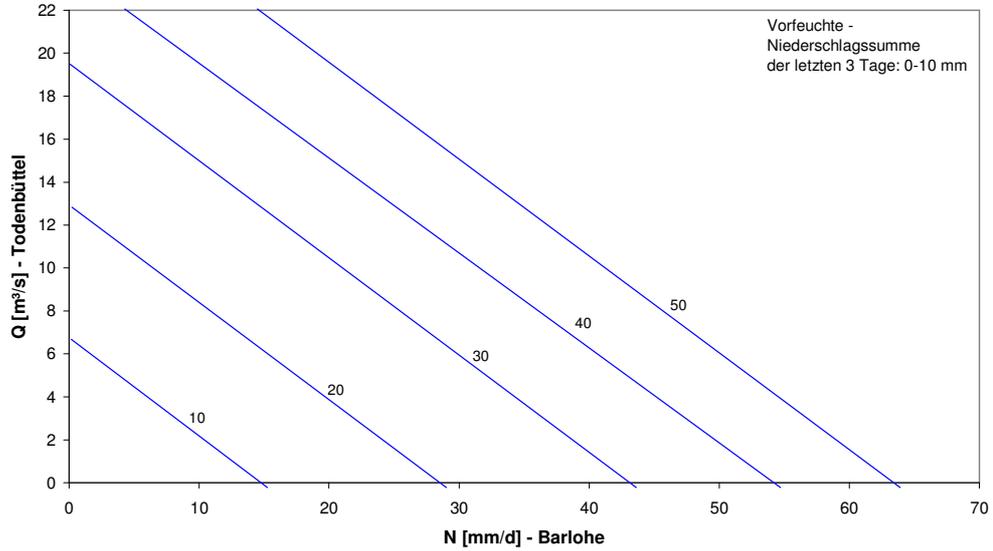


Abbildung 43: Erwarteter Zufluss NOK-Mitte/West; Vorregen 0 - 10 mm

**Erwarteter Zufluss [m<sup>3</sup>/s] NOK - Mittewest  
innerhalb der nächsten 1 bis 3 Tagen**

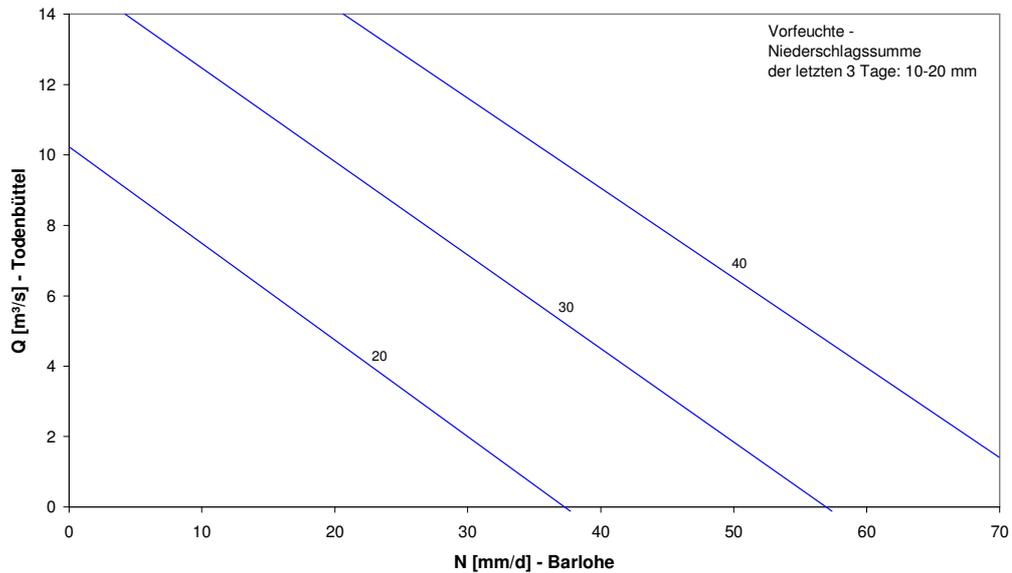


Abbildung 44: Erwarteter Zufluss NOK-Mitte/West; Vorregen 10 - 20 mm

**Erwarteter Zufluss [m<sup>3</sup>/s] NOK - Mittewest  
innerhalb der nächsten 1 bis 3 Tage**

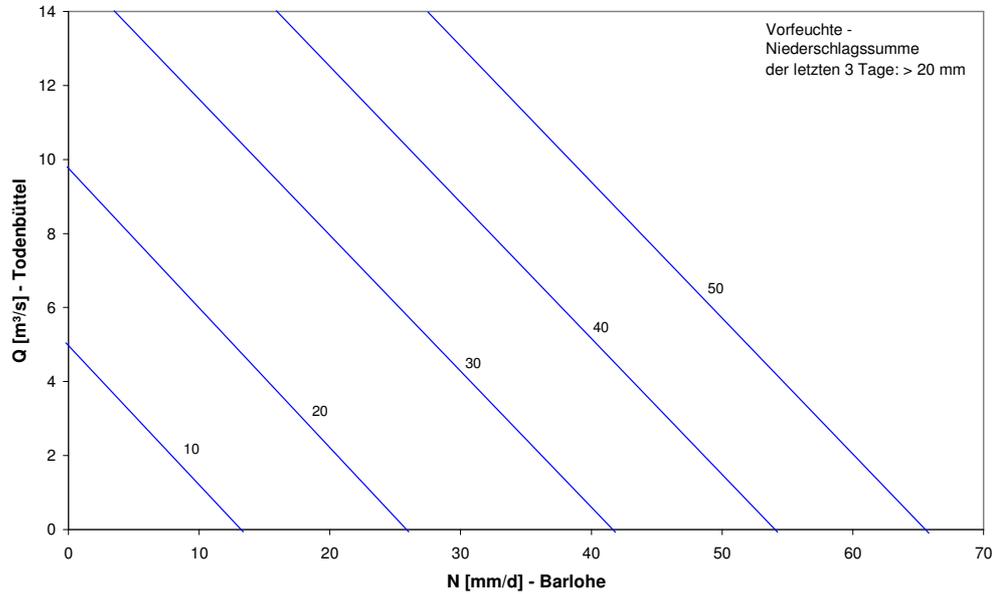


Abbildung 45: Erwarteter Zufluss NOK-Mitte/West; Vorregen > 20 mm

**Erwarteter Zufluss [m<sup>3</sup>/s] NOK - West  
innerhalb der nächsten 1 bis 3 Tage**

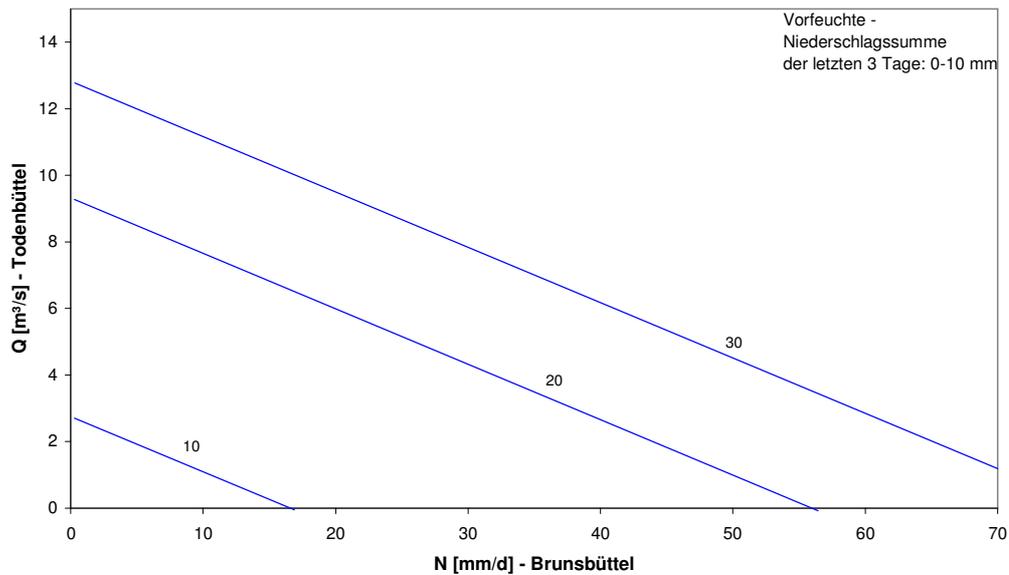


Abbildung 46: Erwarteter Zufluss NOK-West; Vorregen 0 - 10 mm

**Erwarteter Zufluss [m³/s] NOK - West  
innerhalb der nächsten 1 bis 3 Tage**

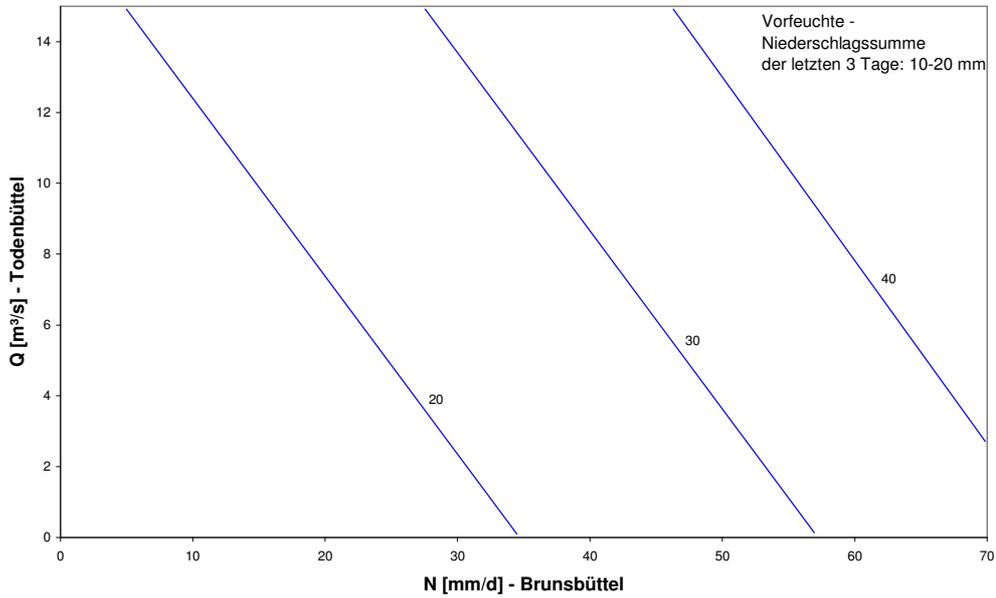


Abbildung 47: Zufluss NOK-West; Vorregen 10 - 20 mm

**Erwarteter Zufluss [m³/s] NOK - West  
innerhalb der nächsten 1 bis 3 Tage**

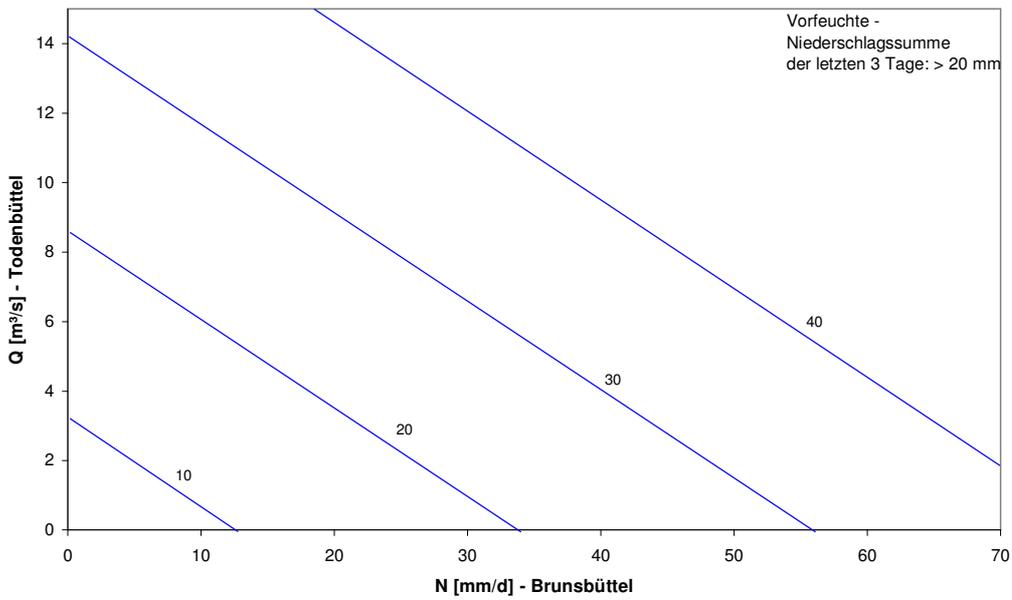


Abbildung 48: Zufluss NOK-West; Vorregen > 20 mm

Eine Anwendung der Diagramme wird beispielhaft für das „Kyrill“-Ereignis im Januar 2007 gezeigt. Dazu werden das Niederschlagsereignis am 18.01.2007 und die dazugehörigen Bezugspegel sowie die Summe der Niederschläge aus den drei vorangegangenen Tagen betrachtet. Für die vier Abschnitte des NOK ergibt sich von Ost nach West:

#### Bereich NOK Ost:

- Niederschlag Bordesholm am 18.01.2008 = 18,7 mm
- Summe Vorregen der 3 letzten Tage = 17,2 mm
- Abfluss Pegel Hammer am 18.01.2008 = 5,1 m<sup>3</sup>/s

Mit einem Vorregen zwischen 10 mm und 20 mm ist das Diagramm der Abbildung 38 zu wählen. Es ergibt sich für den Zufluss ein Tageswert von etwa 28 m<sup>3</sup>/s. Der höchste Zufluss (Tageswert) der nächsten drei Tage wurde mit dem NA-Modell zu 28,8 m<sup>3</sup>/s für diesen Abschnitt des NOK bestimmt.

#### Bereich NOK Mitte/Ost:

- Niederschlag Barlohe am 18.01.2008 = 13,5 mm
- Summe Vorregen der 3 letzten Tage = 8,5 mm
- Abfluss Pegel Jevenstedt am 18.01.2008 = 6,5 m<sup>3</sup>/s

Mit einem Vorregen zwischen 0 mm und 10 mm ist das Diagramm der Abbildung 40 zu wählen. Es ergibt sich für den Zufluss ein Tageswert von etwa 14 m<sup>3</sup>/s. Der höchste Zufluss (Tageswert) der nächsten drei Tage wurde mit dem NA-Modell zu 16,6 m<sup>3</sup>/s für diesen Abschnitt des NOK bestimmt.

#### Bereich NOK Mitte/West:

- Niederschlag Barlohe am 18.01.2008 = 13,5 mm
- Summe Vorregen der 3 letzten Tage = 8,5 mm
- Abfluss Pegel Todenbüttel am 18.01.2008 = 10,1 m<sup>3</sup>/s

Mit einem Vorregen zwischen 0 mm und 10 mm ist das Diagramm der Abbildung 43 zu wählen. Es ergibt sich für den Zufluss ein Tageswert von etwa 25 m<sup>3</sup>/s. Der höchste Zufluss (Tageswert) der nächsten drei Tage wurde mit dem NA-Modell zu 23 m<sup>3</sup>/s für diesen Abschnitt des NOK bestimmt.

Bereich NOK West:

- Niederschlag Brunsbüttel am 18.01.2008 = 29,5 mm
- Summe Vorregen der 3 letzten Tage = 20,8 mm
- Abfluss Pegel Todenbüttel am 18.01.2008 = 10,1 m<sup>3</sup>/s

Mit einem Vorregen größer 20 mm ist das Diagramm der Abbildung 48 zu wählen. Es ergibt sich für den Zufluss ein Tageswert von etwa 36 m<sup>3</sup>/s. Der höchste Zufluss (Tageswert) der nächsten drei Tage wurde mit dem NA-Modell zu 22 m<sup>3</sup>/s für diesen Abschnitt des NOK bestimmt.

Mit Hilfe der Diagramme kann für alle Bereiche des NOK vor einem erhöhten Zufluss gewarnt werden. Dabei werden für das Kyrill-Ereignis auch die prognostizierten Zuflusshöhen sehr gut wiedergegeben. Im Bereich NOK West liegt der prognostizierte Wert mit 36 m<sup>3</sup>/s allerdings deutlich über dem mit Hilfe des NA-Modells ermittelten Wert von 22 m<sup>3</sup>/s. Hier ist die knappe Zuordnung in die Klasse des Vorregens über 20 mm zu berücksichtigen. Betrachtet man für diesen Grenzfall auch das Diagramm für den etwas geringeren Vorregen (Abbildung 47) wird ein Hochwasserzufluss von etwa 27 m<sup>3</sup>/s prognostiziert. Auch dieser ist zwar zu hoch, liegt aber deutlich näher an dem simulierten Wert für dieses Ereignis.

## 5 Handlungsstrategien

Handlungsstrategien für den Betrieb des NOK können sich bei einer Betrachtung der Binnenzuflüsse in den NOK nur auf Maßnahmen zum Rückhalt dieser Zuflüsse beziehen. Hier ist neben der Regulierung dieser Zuflüsse auch die Regulierung von Abflüssen aus Rückhalte-räumen denkbar. Die wegen ihrer Größe im Modell berücksichtigten Seen haben aber alle einen natürlichen Auslauf. Eine Regulierung eines Teils der Zuflüsse ist prinzipiell durch die vorhandenen Schöpfwerke möglich. Nachfolgend wird der Anteil der Abflüsse, die durch Schöpfwerke regulierbar sind, bestimmt. Dadurch besteht eine Beurteilungsgrundlage, welche Zuflussreduzierung im Hochwasserfall bei einer über die derzeitige Verwendung der Schöpfwerke hinausgehende Regulierung der Abflüsse, zu erwarten ist.

Daneben wird auf der Grundlage der vorliegenden Daten eine Abschätzung von zu erwartenden Ausbreitungszeiten verschiedener Wasserstände im NOK vorgenommen. Diese sind wichtig, um Handlungsstrategien für die Abwendung von Gefahren im Hochwasserfall entwickeln und die vorhergesagten Zuflüsse in den NOK in ihrer weiteren Ausbreitung abschätzen zu können.

Über den Rahmen dieser Untersuchung hinausgehende Aussagen über die Veränderung von Wasserständen im NOK mit der Zeit können nur unter Verwendung eines instationären numerischen Modells für verschiedene Randbedingungen getroffen werden.

### 5.1 Einfluss der Schöpfwerke

In Situationen mit kritischen Zuflüssen in den NOK sind die Schöpfwerke eine Möglichkeit, die Abflussspende in den NOK zu regulieren. In Abschnitt 3.4 ist das Vorgehen bei der Berücksichtigung der Schöpfwerke im Modell beschrieben worden. Dabei wurde in Ermangelung genauer Kenntnisse über die Steuerung der Pumpen davon ausgegangen, dass Abflüsse kleiner der Pumpenleistung ohne Verzögerung in den NOK geleitet werden. Bei höheren Abflüssen werden diese in Abhängigkeit der vorliegenden Pumpenleistung verzögert abflusswirksam. Der Anteil am Gesamtzufluss in den NOK, der aus den geschöpften Bereichen stammt, kann über eine Differenz der Zuflüsse in den NOK aus dem kalibrierten Modell des Ist-Zustands und einem Planungsszenario, bei dem alle Pumpen ausgeschaltet sind, ermittelt werden. Im Modell wird dieses Szenario durch ein Deaktivieren der entsprechenden Zuflussanteile erreicht.

In Abbildung 49 sind der Gesamtzufluss in den NOK für den Ist-Zustand und das Szenario der ausgeschalteten Pumpwerke dargestellt.

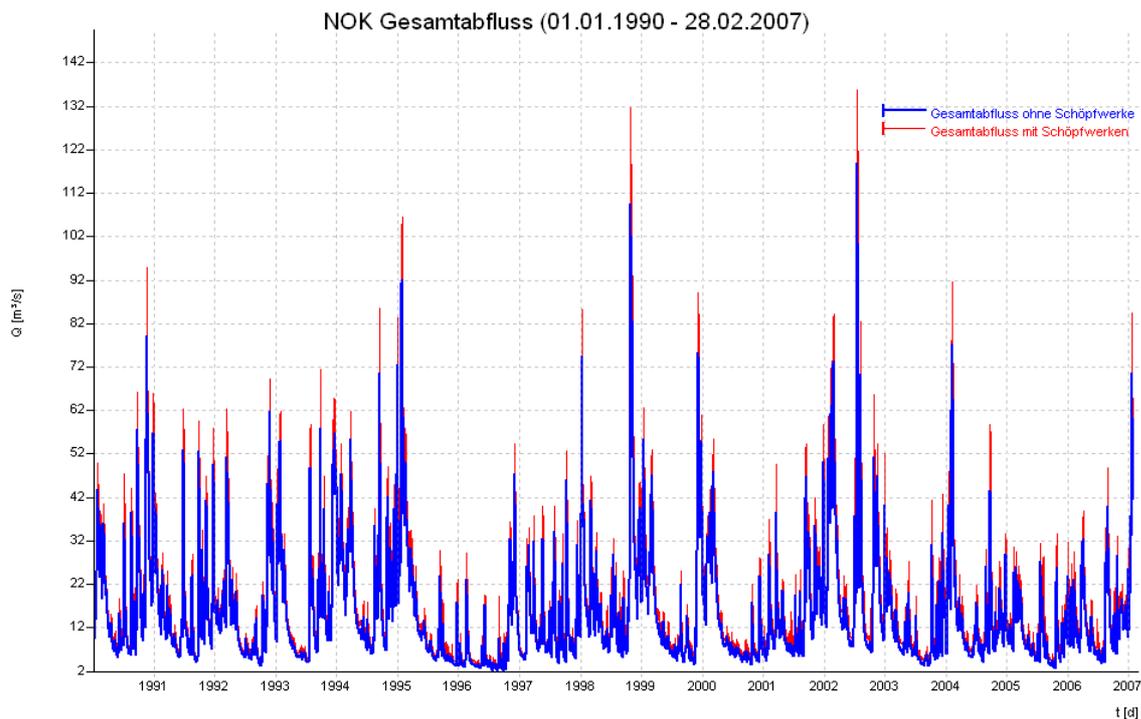


Abbildung 49: Vergleich Gesamtabfluss NOK bei abgeschalteten Schöpfwerken

Bei Betrachtung der Abflussspitzen treten bei ausgeschalteten Pumpen etwa 10% bis 20% geringere Abflüsse auf. Im Falle des Kyrill-Ereignisses, mit höherer zeitlicher Auflösung in Abbildung 50 dargestellt, wären den Simulationsergebnissen folgend in der Spitze  $70,7 \text{ m}^3/\text{s}$  statt  $84,4 \text{ m}^3/\text{s}$  dem NOK zugeflossen.

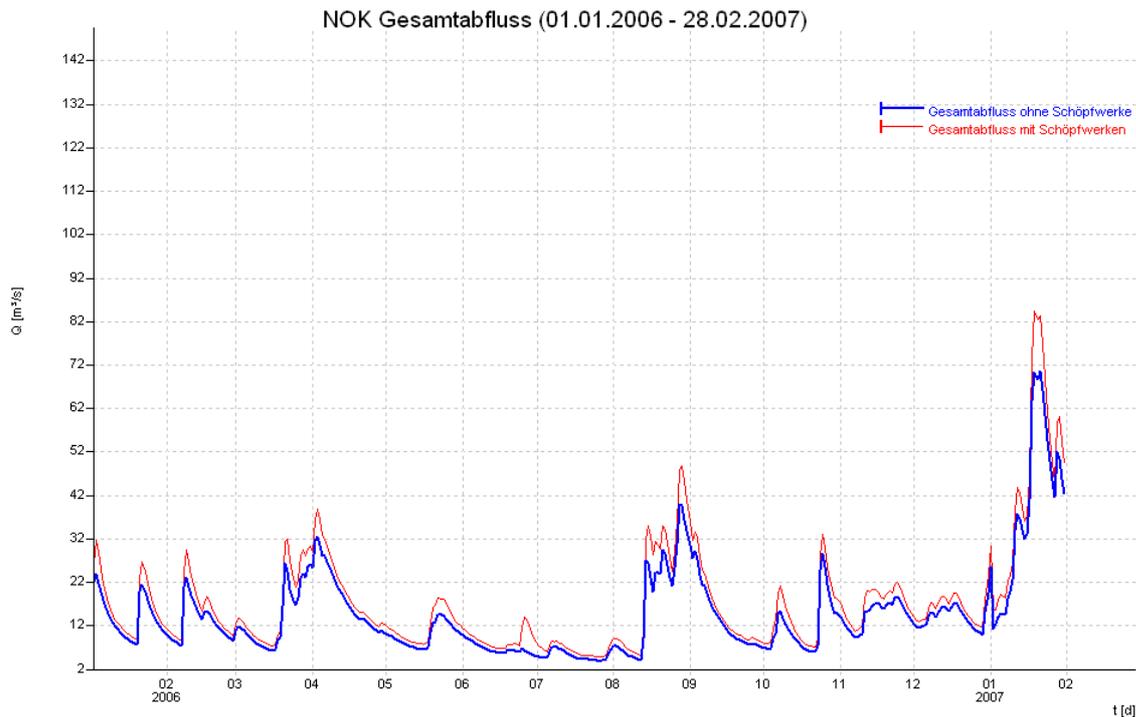


Abbildung 50: Vergleich Gesamtabfluss NOK bei abgeschalteten Schöpfwerken (Kyrill)

Für eine etwaige Ableitung von Handlungsstrategien ist zu bedenken, dass es sich bei den dargestellten Werten um die Summe der Zuflüsse in den NOK handelt; Fließzeiten und mögliche Überlagerungen von Abflussanteilen im NOK wie auch ein mögliches Nacheinanderlaufen im NOK aber nicht berücksichtigt sind.

## 5.2 Fließzeiten im NOK

In den beiden nachfolgenden Abschnitten wird auf der Basis von Wasserstandsdaten des NOK und einer stationären hydraulischen Betrachtung eine Abgrenzung des Zeitraums vorgenommen, innerhalb dem Fließzeiten und die Ausbreitung von Wasserspiegeländerungen zu erwarten sind.

### 5.2.1 Ausbreitung von Wasserspiegeländerungen nach dem Entwässern

Die vorliegenden Wasserstandsdaten der verschiedenen Pegel des NOK wurden ausgewertet, um anhand der zeitlichen Verschiebung der Wasserstandsänderungen zwischen den Pegeln Aussagen über Fließ- bzw. Ausbreitungsgeschwindigkeiten im NOK zu treffen. Die Wasserstandsdaten liegen im Minutenintervall vor und lassen unter normalen Bedingungen wegen

einer starken Streuung der Messwerte unmittelbar keine systematischen Abhängigkeiten in Bezug auf einen Zeitversatz von Wasserstandsänderungen erkennen. Nach einer Mittelung der Wasserstände über 15 Minuten und der Betrachtung extremer Ereignisse werden hingegen Abhängigkeiten deutlich erkennbar. In Abbildung 51 sind die Wasserstandsänderungen der Binnenpegel in Kiel und Brunsbüttel neben dem Außenpegel in Brunsbüttel für das Kyrill-Ereignis dargestellt. Der Nullpunkt der y-Achse für die Binnenpegel wird als NHN=5,00 m PN dargestellt, die Werte für den Außenpegel sind bezogen auf Pegelnull (gleich 1,30 m NHN).

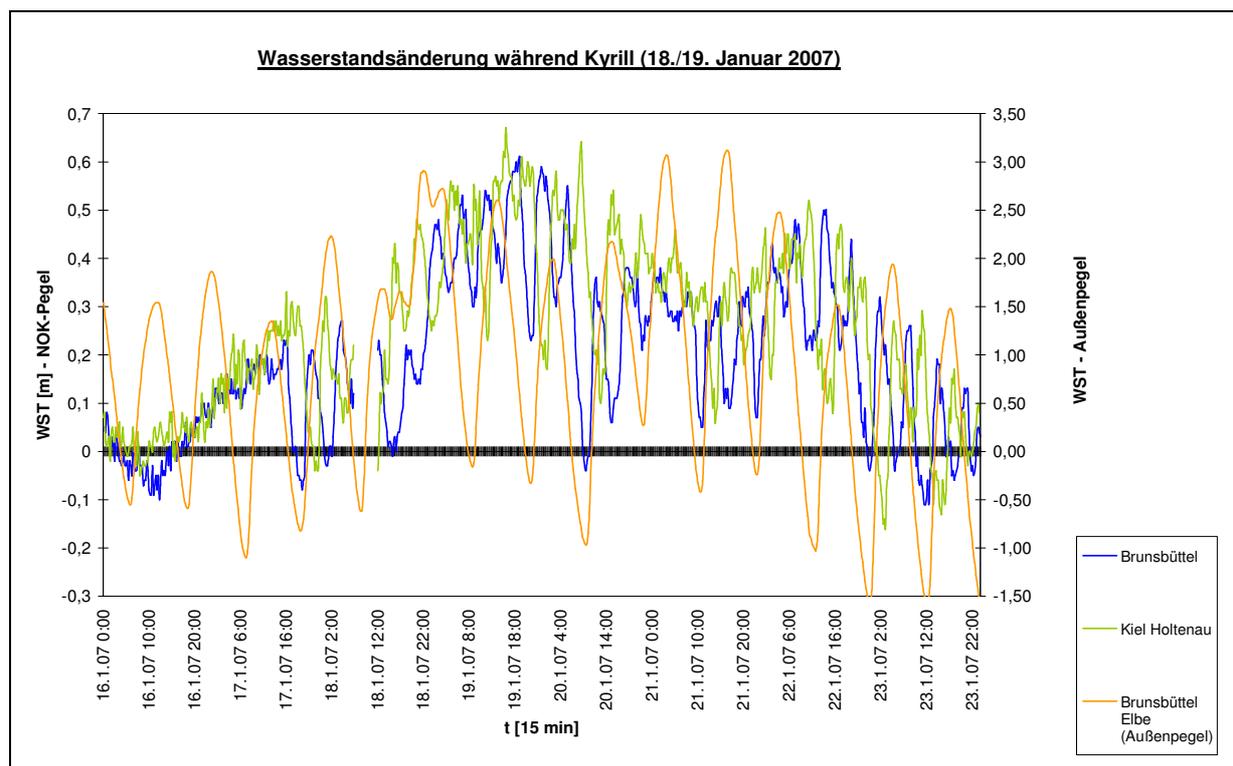


Abbildung 51: Wasserstandsänderungen Pegel Brunsbüttel und Kiel während Kyrill

Mit Beginn am 17.01.2007 16 Uhr sind während ausreichend niedriger Wasserstände in der Elbe Absenkungen des Wasserstandes am Pegel Brunsbüttel (blau) erkennbar. Es ist davon auszugehen, dass diese erkennbaren Absenkungen von Entwässerungsmaßnahmen ausgelöst worden sind. Den Wasserstandsabsenkungen am Pegel Brunsbüttel folgen jeweils die Wasserstände in Kiel in etwa gleichem Zeitabstand. Es kann deshalb daraus geschlossen werden, dass die Wasserstandsabsenkungen in Kiel durch die zuvor vorgenommenen Entwässerungsmaßnahmen ausgelöst worden sind. Unter der Annahme einer direkten Abhängigkeit der beiden Wasserstandsabsenkungen kann aus den Pegeldaten der Zeitraum, der zwischen den Absenkungen in Brunsbüttel und Kiel liegt, ausgelesen werden. Dazu sind in

Abbildung 52 für die Absenkung des Wasserspiegels beginnend in Brunsbüttel am 17.01.2007 16 Uhr die Wasserstände der NOK-Pegel in einer höheren zeitlichen Auflösung gegeneinander aufgetragen.

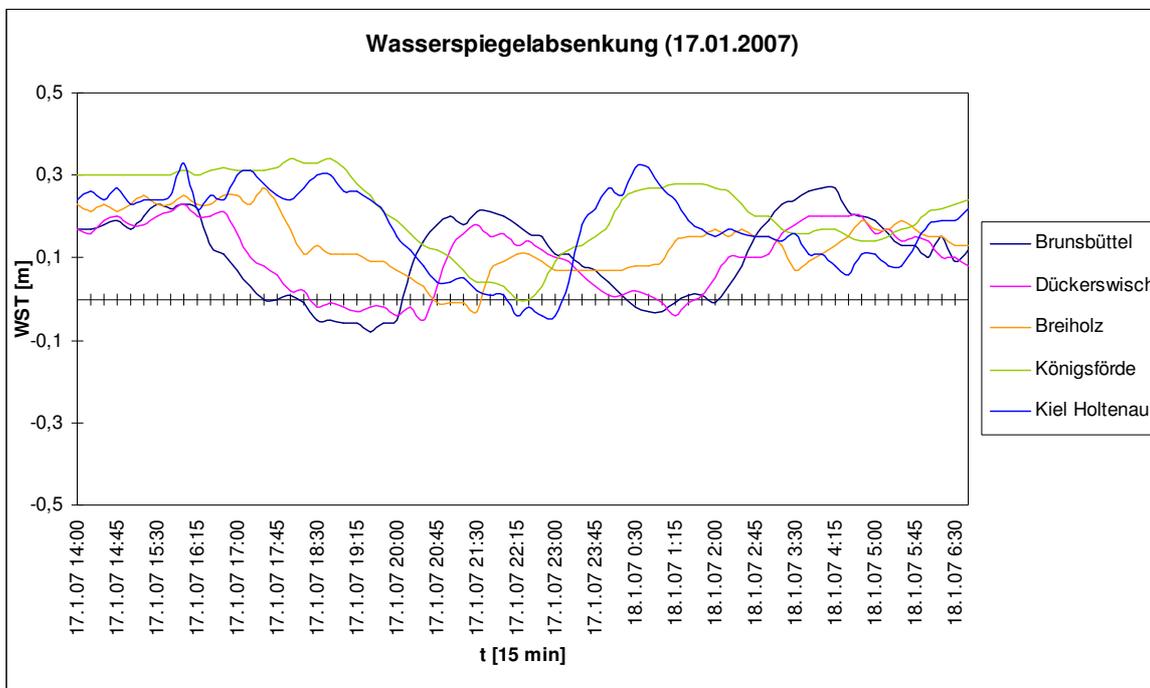


Abbildung 52: Entwässerung NOK am 17.01.2007; NOK-Pegel

Der Beginn der Wasserstandsabsenkung am 17.01.2007 kann in Brunsbüttel mit 16.15 Uhr und in Kiel mit 19.15 Uhr datiert werden. Das Fortschreiten der Wasserstandsabsenkung über die Länge von etwa 100 km dauert in diesem Beispiel 3 Stunden. Es ist davon auszugehen, dass sich bei geänderten Wasserspiegelgradienten, anderen Wassertiefen und Entwässerungsdauern sowie anderen einflussnehmenden Faktoren geringfügig andere Zeiträume ergeben. Dennoch kann die Beobachtung auch an verschiedenen anderen Beispielen, bei denen der Wasserspiegel in Brunsbüttel im Rahmen einer Entwässerungsmaßnahme abgesenkt worden ist, bestätigt werden (vergleiche Abbildung 51). In [10] wird festgestellt, dass auftretende Wellen im NOK „recht hohe Fortschrittsgeschwindigkeiten“ haben.

## 5.2.2 Fließzeiten im NOK unter Annahme stationärer Bedingungen

Im Vergleich zu dem beobachteten Fortschreiten einer Wasserspiegeländerung in Abschnitt 5.2.1 wird vereinfachend das Vorliegen stationärer Verhältnisse für die Bestimmung einer Fließgeschwindigkeit im NOK angenommen. Es wird ebenfalls angenommen, dass die

bei der Entwässerung am 17.01.2007 aufgetretene Wasserspiegeldifferenz von ca. 0,30 m als gleichmäßiges Gefälle im NOK zwischen Brunsbüttel und Kiel vorliegt.

Basierend auf dieser Annahme lässt sich eine Berechnung der Geschwindigkeit  $v$  für das angenommene Gefälle  $I$  durchführen. Mit dem allgemeinen Fließgesetz nach Darcy-Weisbach und dem empirisch ermittelten Colebrook-White'schen Widerstandsgesetz ergibt sich für die Fließgeschwindigkeit  $v$ :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \cdot \sqrt{8 \cdot g \cdot r_{hy} \cdot I} \quad \text{mit}$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2,03 \log \left( \frac{k_s}{14,84 \cdot r_{hy}} \right) \quad \text{und} \quad I = \frac{h}{l}$$

Darin sind:

$v$  = Geschwindigkeit [m/s]

$\lambda$  = Fließwiderstandsbeiwert [-]

$g$  = Erdbeschleunigung = 9,81 [m/s<sup>2</sup>]

$h$  = Wasserstandshöhe [m]

$I$  = Gefälle [--]

$\lambda_{so}$  = Fließwiderstandsbeiwert [--]

$k_s$  = äquivalente Sandrauheit [m] (0,1 m angenommen)

$r_{hy}$  = hydraulischer Radius [m]

$h$  = Wasserstandsdifferenz [m] = 0,30 m

$l_{NOK}$  = Länge NOK = 98.700 m [15]

Für die Wasserstandshöhe  $h$  wurde aus dem Regelprofilschnitt an Kkm 8.500 Kudensee Niederung 11 m entnommen [12]. Der hydraulische Radius  $r_{hy}$  ist für breite Fließgewässer (Wassertiefe klein gegenüber der Gewässerbreite) etwa gleich der Wassertiefe und wird deshalb ebenfalls zu 11 m angenommen. Die Grundrauheit wird mit  $k_s = 0,1$  m abgeschätzt. Die Länge des NOK wird mit  $l_{NOK} = 98.700$  m angesetzt [15].

$$I = \frac{0,3}{98700} = 3,0 \cdot 10^{-6}$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2,03 \cdot \log\left(\frac{0,1}{14,84 \cdot 11}\right) = 6,52$$

$$v = 6,52 \cdot \sqrt{8 \cdot 9,81 \cdot 11 \cdot (3,0 \cdot 10^{-6})} = 0,33 \text{ m/s}$$

In [10] wird über die Abflussleistungen der Schütze bei Brunsbüttel und des Siel bei Kiel eine Fließgeschwindigkeit von ca. 0,30 m/s abgeleitet.

Ein Durchfließen des NOK unter den hier getroffenen Annahmen dauert somit etwa 83 Stunden (knapp 3,5 Tage).

Ist die Wasserspiegeldifferenz geringer als die im Rahmen des hier durchgeführten Vergleichs angenommenen 0,30 m, ergibt sich eine entsprechend geringere Fließgeschwindigkeit bzw. eine größere Zeitspanne für das Durchfließen des Kanals.

### 5.2.3 Beurteilung der Ergebnisse

Die vereinfacht unter Annahme stationärer Fließverhältnisse berechnete Fließgeschwindigkeit kann durch eine Betrachtung der Abflussleistung über Schütze bei Brunsbüttel und das Siel in Kiel nach [10] bestätigt werden.

Dennoch treten im NOK Wasserspiegelangleichungen über die Länge von ca. 100 km innerhalb von ca. 3h auf (Abschnitt 5.2.1). Dies entspricht einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von

$$I = \frac{l_{NOK}}{t} = \frac{100.000m}{16.800s} = 9,3 \frac{m}{s}.$$

Im Flachwasser wird der Strömungszustand eines Gewässers unter anderem durch die dimensionslose Froude-Zahl beschrieben.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}}$$

Eine Froude-Zahl von 1 entspricht genau der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit. Diese ergibt sich für den NOK unter Annahme einer mittleren Wassertiefe von 11 m zu

$$v = \sqrt{g \cdot h} = \sqrt{9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 11m} = 10,4 \frac{m}{s}.$$

Aufgrund dieser fast identischen Werte kann davon ausgegangen werden, dass eine Wasser-spiegelangleichung über die Länge des NOK in dem betrachteten und vergleichbaren Fällen auch maßgeblich durch Oberflächenwellen erfolgt.

Es wird empfohlen, die ablaufenden instationären Fließvorgänge durch ein numerisches Modell realitätsnah nachzubilden. Mit Hilfe eines solchen Modells können die Wellenausbreitung, die Fließgeschwindigkeit und die sich zeitlich ändernden Wasserstände für verschiedene Schleusensteuerungen simuliert werden. Für den Hochwasserfall können so optimale Steuerstrategien für die Schleusen aufgestellt werden.

## 6 Literatur

[1] LANU - „Leitbilder für Fließgewässer in Schleswig-Holstein“, Landesamt für Umwelt und Natur, 2001.

[2] MUNF - „Gesamtplan Grundwasserschutz in Schleswig-Holstein“, Ministerium für Umwelt, Natur und Forsten des Landes SH, 1998.

[3] LANU - „Hydrologischer Jahresbericht 2004“, Landesamt für Umwelt und Natur, 2005.

[4] LANU - „Nutzbares Grundwasserdargebot in Südost-Holstein“, Landesamt für Umwelt und Natur, 2002.

[5] WSA - „Anweisung für die Entwässerung des Nord-Ostsee-Kanals“, Wasser- und Schifffahrtsamt Brunsbüttel, 2004.

[6] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Bodenkundliche Kartieranleitung, Hannover 2005.

[7] <http://www.umweltdaten.landsh.de>

[8] Kräbig, Stephan: Entwicklung eines integrativen Verfahrens zur Bestimmung und kartographischen Abgrenzung des Hochwasserrisikos in fluvialen Überschwemmungsgebieten, Hamburg 2007.

[9] WSD - Bericht zur Hochwassersituation am Nord-Ostsee-Kanal infolge des Sturmtiefs „Kyrrill“. Betrachtungszeitraum ca. vom 14.01. - 24.01.2007, Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes 2007.

[10] BfG - Umweltrisikoeinschätzung und FFH-Verträglichkeitseinschätzung für Projekte an Bundeswasserstraßen - Anpassung der Oststrecke des Nord-Ostsee-Kanals zwischen Kkm 93,5. Bericht 1423, Bundesanstalt für Gewässerkunde 2005.

[11] [www.kiel-canal.org](http://www.kiel-canal.org); letzter Zugriff am 10.10.2008.

[12] WSA - „Krisensitzung anlässlich der aktuellen Wasserstände am 19.01.2007; 12:30 Uhr - 17:30 Uhr“, Wasser- und Schifffahrtsamt Brunsbüttel, 2007.

[13] <http://www.schleswig-holstein.de>, naturräumliche Gliederung; letzter Zugriff am 10.10.2008.

[14] Wagner, Michael: Schleswig-Holstein - Klima und Wetter-. In: Schleswig-Holsteinischer Zeitungsverlag (Hg.): Schleswig-Holstein Topographie, Band 2. Flensburg 2002.

[15] <http://www.wsv.de/wsa-bb/nok/index.htm>; letzter Zugriff am 10.10.2008.

[16] Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz – Abschätzung der Hochwasserentwicklung in Abhängigkeit von Abfluss und prognostiziertem Niederschlag in Rheinland-Pfalz, Mainz, Oktober 1995.

[17] Maniak, Ulrich: Hydrologie und Wasserwirtschaft; Berlin 2005.

Hamburg, 28. November 2008  
GOLDER ASSOCIATES GmbH



Dr. Johannes Bruns  
Geschäftsführer



Dipl.-Ing. Thorsten Evertz  
Projektleiter

## Anhang

### Anhang A Modellgrundlagen

#### A1 Retentionskonstanten nach Riek

Tabelle 11: Ermittlung der Basiswerte für die Retentionskonstanten

Lauf. NR	TGB NR	Fläche [m²]	Fläche [ha]	Durchlässigkeit Boden kf [m/s]	Länge Fließweg GW [m]	Delta h GW [m]	Gefälle GW [-]	Fließzeit RetGW [h]	nach RIECK			
									RetBAS [h]	RetINT [h]	RetOB [h]	
1	120	20364813,57	2036	0,00050	3700	3,0	0,0008	2535185	2277	34,2	11,4	
2	150	23393858,87	2339	0,00050	3600	3,0	0,0008	2400000	2390	35,8	11,9	
3	180	29420722,93	2942	0,00050	6000	4,0	0,0007	5000000	2589	38,8	12,9	
4	210	51842600,35	5184	0,00050	11700	12,0	0,0010	6337500	3155	47,3	15,8	
5	230	39079190,79	3908	0,00050	12000	12,0	0,0010	6666667	2858	42,9	14,3	
6	240	16584879,77	1658	0,00050	8500	7,0	0,0008	5734127	2119	31,8	10,6	
7	251	21336923,38	2134	0,00050	8000	7,0	0,0009	5079365	2314	34,7	11,6	
8	259	22924366,06	2292	0,00050	6500	6,0	0,0009	3912037	2373	35,6	11,9	
9	270	42137714,98	4214	0,00050	7000	4,0	0,0006	6805556	2934	44,0	14,7	
10	296	62452970,26	6245	0,00050	6600	9,0	0,0014	2688889	3366	50,5	16,8	
11	299	32281552,97	3228	0,00050	4100	6,0	0,0015	1556481	2674	40,1	13,4	
12	318	26631510,43	2663	0,00050	4200	4,0	0,0010	2450000	2500	37,5	12,5	
13	320	49047169,55	4905	0,00050	6900	8,0	0,0012	3306250	3094	46,4	15,5	
14	340	55450140,25	5545	0,00050	6100	7,0	0,0011	2953175	3229	48,4	16,1	
15	361	48016318,65	4802	0,00050	6100	7,0	0,0011	2953175	3071	46,1	15,4	
16	369	31785705,77	3179	0,00050	2500	8,0	0,0032	434028	2659	39,9	13,3	
17	390	17745117,59	1775	0,00050	3200	6,0	0,0019	948148	2170	32,5	10,8	
18	410	62334442,87	6233	0,00050	10200	12,0	0,0012	4816667	3364	50,5	16,8	
19	430	51333911,18	5133	0,00050	6000	10,0	0,0017	2000000	3144	47,2	15,7	
20	440	34934037,77	3493	0,00050	5600	7,0	0,0013	2488889	2749	41,2	13,7	
21	490	15086741,93	1509	0,00050	3000	3,0	0,0010	1666667	2050	30,8	10,3	
22	611	35015455,92	3502	0,00050	10600	15,0	0,0014	4161481	2751	41,3	13,8	
23	621	31063176,32	3106	0,00050	6900	11,0	0,0016	2404545	2638	39,6	13,2	
24	629	5102779,30	510	0,00050	3600	4,0	0,0011	1800000	1405	21,1	7,0	
25	670	33257374,28	3326	0,00050	5900	6,0	0,0010	3223148	2702	40,5	13,5	
26	690	27296335,51	2730	0,00050	3900	5,0	0,0013	1690000	2522	37,8	12,6	
27	720	60081749,08	6008	0,00050	11900	10,0	0,0008	7867222	3321	49,8	16,6	
28	734	14093025,64	1409	0,00050	4100	4,0	0,0010	2334722	2002	30,0	10,0	
29	736	5602296,33	560	0,00050	1800	0,1	0,0001	18000000	1451	21,8	7,3	
30	738	10522904,63	1052	0,00050	2800	2,0	0,0007	2177778	1808	27,1	9,0	
31	741	11385820,75	1139	0,00050	2600	3,0	0,0012	1251852	1859	27,9	9,3	
32	742	41501243,21	4150	0,00050	9000	8,0	0,0009	5625000	2919	43,8	14,6	
33	745	35539104,45	3554	0,00050	5900	6,0	0,0010	3223148	2765	41,5	13,8	
34	749	56442083,78	5644	0,00050	8400	7,0	0,0008	5600000	3250	48,7	16,2	
35	760	39498449,63	3950	0,00050	8400	6,0	0,0007	6533333	2869	43,0	14,3	
36	771	23532152,48	2353	0,00050	4200	1,0	0,0002	9800000	2395	35,9	12,0	
37	778	32833043,39	3283	0,00050	4400	2,0	0,0005	5377778	2690	40,3	13,4	
38	784	37088143,72	3709	0,00050	7300	8,0	0,0011	3700694	2807	42,1	14,0	
39	890	33990789,59	3399	0,00050	7500	8,0	0,0011	3906250	2722	40,8	13,6	
40	921	21708938,06	2171	0,00050	4100	13,0	0,0032	718376	2328	34,9	11,6	
41	929	6726090,21	673	0,00050	2700	9,0	0,0033	450000	1547	23,2	7,7	
42	932	22477654,65	2248	0,00050	7000	12,0	0,0017	2268519	2357	35,3	11,8	
43	936	17876785,77	1788	0,00050	5500	13,0	0,0024	1292735	2175	32,6	10,9	
44	937	36832705,89	3683	0,00050	8600	14,0	0,0016	2934921	2800	42,0	14,0	
45	940	29665250,07	2967	0,00050	7400	8,0	0,0011	3802778	2596	38,9	13,0	
46	956	10490374,58	1049	0,00050	3700	5,0	0,0014	1521111	1806	27,1	9,0	
47	961	37569645,07	3757	0,00050	6100	10,9	0,0018	1905274	2819	42,3	14,1	
48	969	42328907,20	4233	0,00050	5700	9,0	0,0016	2005556	2939	44,1	14,7	
49	980	15690889,17	1569	0,00050	5500	6,0	0,0011	2800926	2079	31,2	10,4	

## A2 Grundwasserzuflüsse und -abflüsse zwischen den Teilgebieten

Tabelle 12: Definition der Grundwasserfließrichtung im Modell

NR	TGB	GW Zufluss			GW Abfluss extern %	GW Abfluss 1		GW Abfluss 2		GW Abfluss 3	
		von TGB 1	von TGB 2	von TGB 3		nach	%	nach	%	nach	%
1	120										
2	150	270									
3	180										
4	210				20	230	80				
5	230	210				251	100				
6	240					251	100				
7	251	230	240			259	100				
8	259	251			30	270	70				
9	270	259				150	35	299	50	296	15
10	296	270	410			320	40	299	60		
11	299	270	296								
12	318										
13	320	296									
14	340										
15	361					369	100				
16	369	361									
17	390	440									
18	410					430	60	296	10	611	30
19	430	410				490	100				
20	440					390	100				
21	490	430									
22	611	410				670	100				
23	621					670	100				
24	629					670	100				
25	670	611	621	629		690	100				
26	690	670									
27	720	734									
28	734					720	20	738	200		
29	736										
30	738	734	749								
31	741					742					
32	742	741				745	60	749	40		
33	745	742				749	100				
34	749	742	745			738	25				
35	760					778	35	771	30		
36	771	760									
37	778	760									
38	784										
39	890	921									
40	921					929	60	890	40		
41	929	921									
42	932										
43	936										
44	937										
45	940										
46	956										
47	961					969					
48	969	961									
49	980										

## Anhang B Kalibrierung

Tabelle 13: Korrekturfaktoren der Retentionskonstanten und der Infiltrationskapazität

Gewässersystem	Teilgebiet	Faktor OF vers.	Faktor OF nat.	Faktor Interflow	Faktor Basisabf.	Faktor GW Abf.	Infiltration 1. Schicht	Infiltration 2. Schicht
Alter Eiderkanal	120	3,0	8,0	6,0	0,200	4,000	0,040	0,020
Ottendorfer Au	150	3,0	8,0	6,0	0,200	4,000	0,040	0,010
Felmer Au	180	3,0	8,0	6,0	0,200	4,000	0,080	0,010
Eider	210	1,0	1,0	1,0	0,010	0,025	1,000	1,000
Eider	230	1,0	1,0	1,0	0,020	0,025	1,000	1,000
Eider	240	1,0	1,0	1,0	0,020	0,025	1,000	1,000
Eider	251	1,0	1,0	1,0	0,020	0,025	1,000	1,000
Eider	259	1,0	1,0	1,0	0,020	0,025	1,000	1,000
Eider	270	3,0	8,0	6,0	0,200	0,035	0,020	0,005
Eider	296	3,0	8,0	6,0	0,200	0,035	0,040	0,010
Eider	299	3,0	8,0	6,0	0,200	4,000	0,040	0,020
Schinkeler Au	318	3,0	8,0	6,0	0,200	4,000	0,040	0,020
Alte Eider (Süd)	320	3,0	8,0	6,0	0,200	1,000	0,040	0,010
Alte Eider (Nord)	340	3,0	8,0	6,0	0,200	1,000	0,040	0,010
Schirnauer Au	361	1,0	1,0	1,0	0,010	0,025	1,000	1,000
Schirnauer Au	369	3,0	8,0	6,0	0,200	0,035	0,010	0,005
Obereider	390	3,0	8,0	6,0	0,200	0,035	0,020	0,020
Wehrau	410	1,0	1,0	1,0	0,002	0,030	1,000	1,000
Wehrau	430	1,0	1,0	1,0	0,002	0,030	0,400	0,040
Linnbek	440	3,0	8,0	6,0	0,200	0,035	0,010	0,005
Wehrau	490	3,0	8,0	6,0	0,200	0,035	0,010	0,005
Bokeler Au	611	3,0	8,0	6,0	0,200	0,035	0,010	0,005
Jevenau	621	1,0	3,0	4,0	0,200	0,180	0,080	0,007
Jevenau	629	3,0	8,0	6,0	0,200	0,050	0,010	0,005
Jevenau	670	3,0	8,0	6,0	0,200	0,002	0,010	0,005
Jevenau	690	3,0	8,0	6,0	0,040	0,020	0,010	0,005
Luhnau	720	3,0	20,0	6,0	0,200	0,035	0,010	0,005
Haarbek (ost)	734	3,0	8,0	6,0	0,200	0,035	0,010	0,005
597636	736	0,1	6,0	0,1	4,000	0,170	0,004	0,010
Haarbek (west)	738	0,1	6,0	0,1	4,000	0,170	0,004	0,010
Papenau	741	0,1	7,0	10,0	1,000	0,350	0,100	0,500
Haalerau	742	1,0	1,0	1,0	0,050	0,120	0,100	0,010
Haalerau	745	1,0	0,1	0,2	0,005	0,070	0,100	0,010
Haalerau	749	0,1	6,0	0,1	4,000	0,170	0,004	0,010
Hanerau	760	1,0	5,0	2,0	0,800	0,008	0,180	0,100
Querenbek	771	0,1	6,0	0,1	1,000	2,000	0,012	0,003
Broksbek	778	1,0	5,0	2,0	0,800	0,008	0,180	0,100
Gieselau/Westenau	784	1,0	5,0	2,0	0,800	0,008	0,180	0,010
Iselbek	890	0,1	6,0	0,1	0,500	0,010	0,008	0,005
Muehienbach	921	0,1	6,0	0,1	4,000	0,170	0,004	0,010
Muehlenbach	929	0,1	6,0	0,1	0,300	0,050	0,008	0,015
Besdorfer Bach	932	0,1	6,0	0,1	1,000	0,170	0,012	0,005
Holstenau	936	0,1	6,0	0,1	1,000	0,170	0,008	0,005
Otternkrugsbach	937	0,1	6,0	0,1	1,000	0,170	0,012	0,005
Moorkanal	940	0,1	6,0	0,1	1,000	0,400	0,035	0,010
Graben(1)	956	0,1	6,0	0,1	1,000	5,000	0,050	0,030
Buettler Kanal	961	0,1	6,0	0,1	2,000	0,060	0,012	0,010
Buettler Kanal	969	0,1	30,0	0,5	0,500	0,050	0,120	0,030
Josenburger Fleet	980	0,1	6,0	0,1	0,800	0,400	0,018	0,010

## Anhang C Ergebnisse der Kalibrierung

### C1 Bothkamper See (Eider)

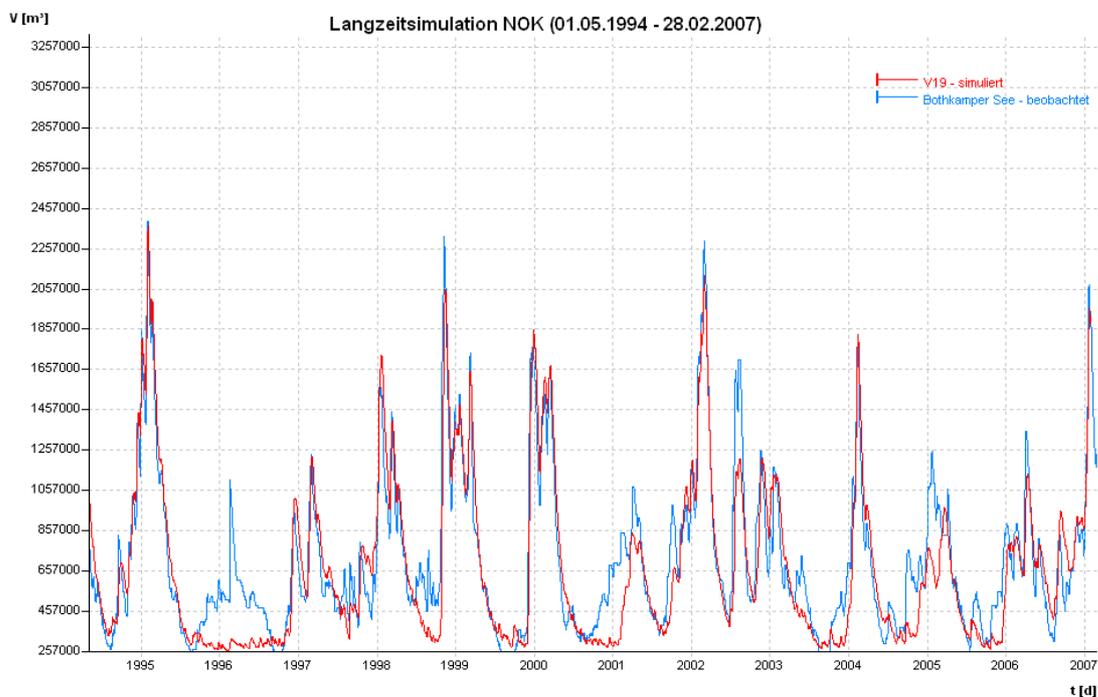


Abbildung 53: Kalibrierung Füllvolumen Bothkamper See – Übersicht

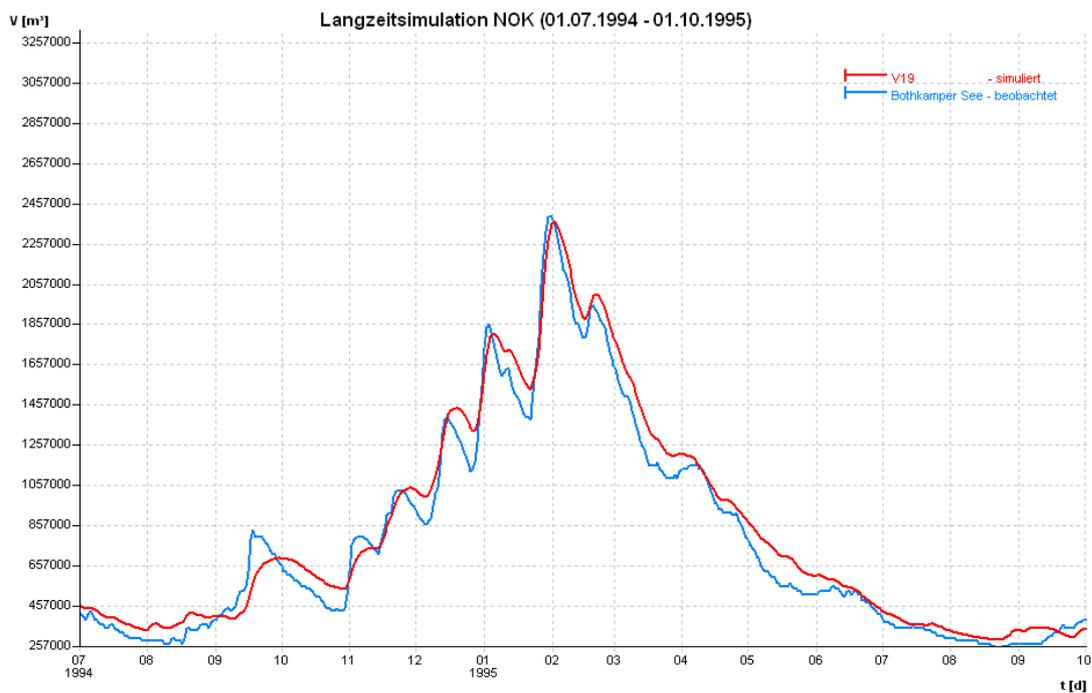


Abbildung 54: Kalibrierung Füllvolumen Bothkamper See – Hochwasser 1995

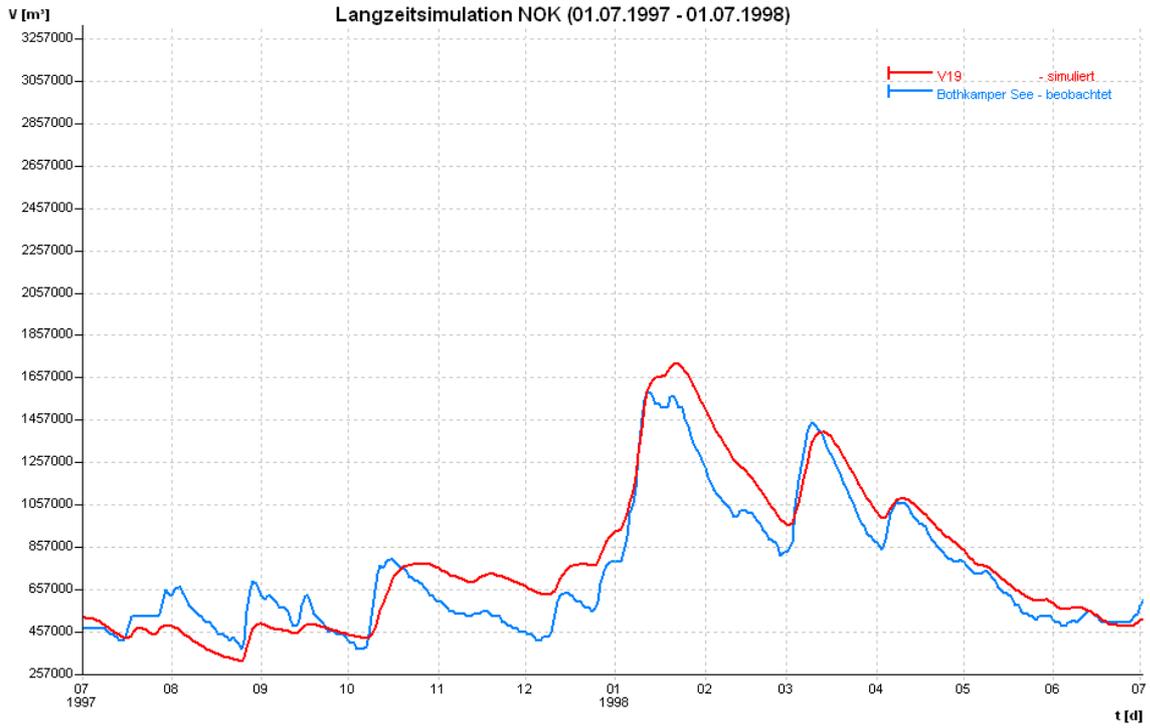


Abbildung 55: Kalibrierung Füllvolumen Bothkamper See – Hochwasser 1998

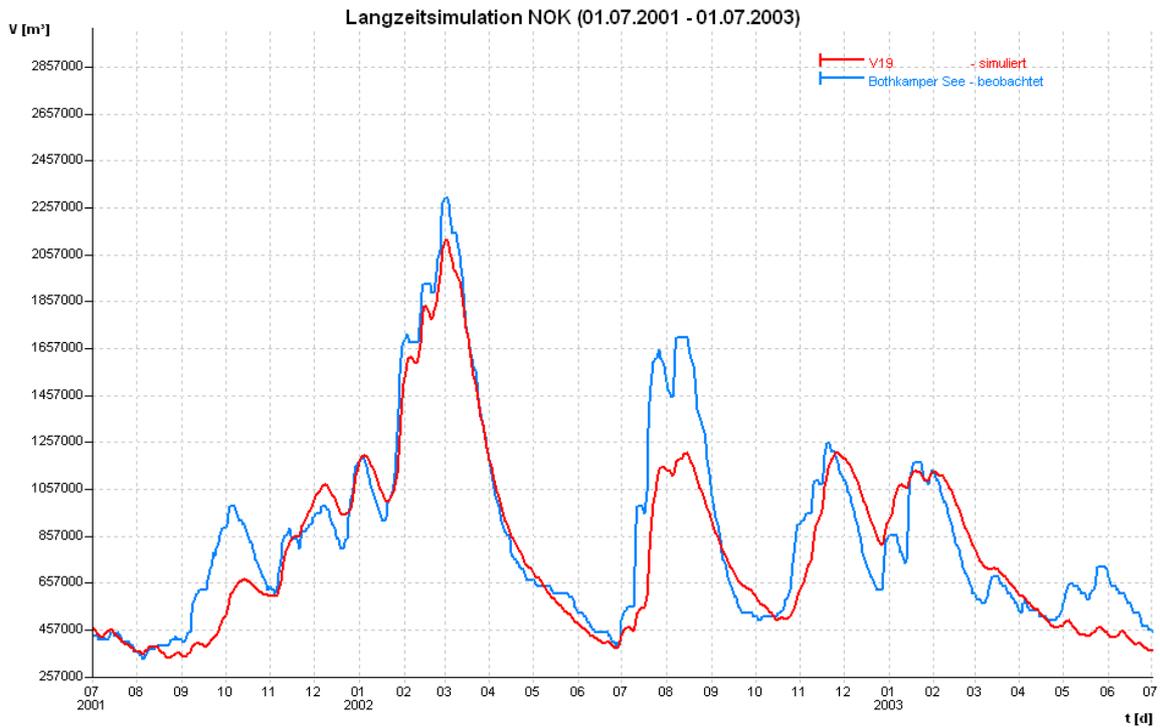


Abbildung 56: Kalibrierung Füllvolumen Bothkamper See – Hochwasser 2002

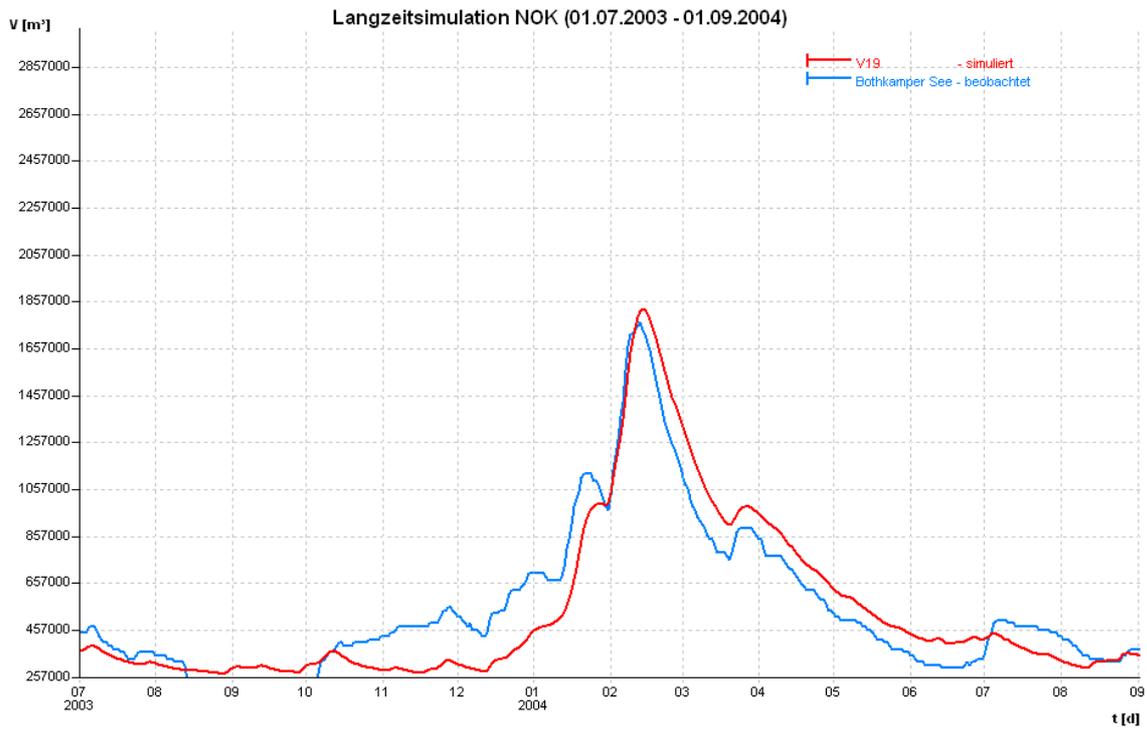


Abbildung 57: Kalibrierung Füllvolumen Bothkamper See – Hochwasser 2004

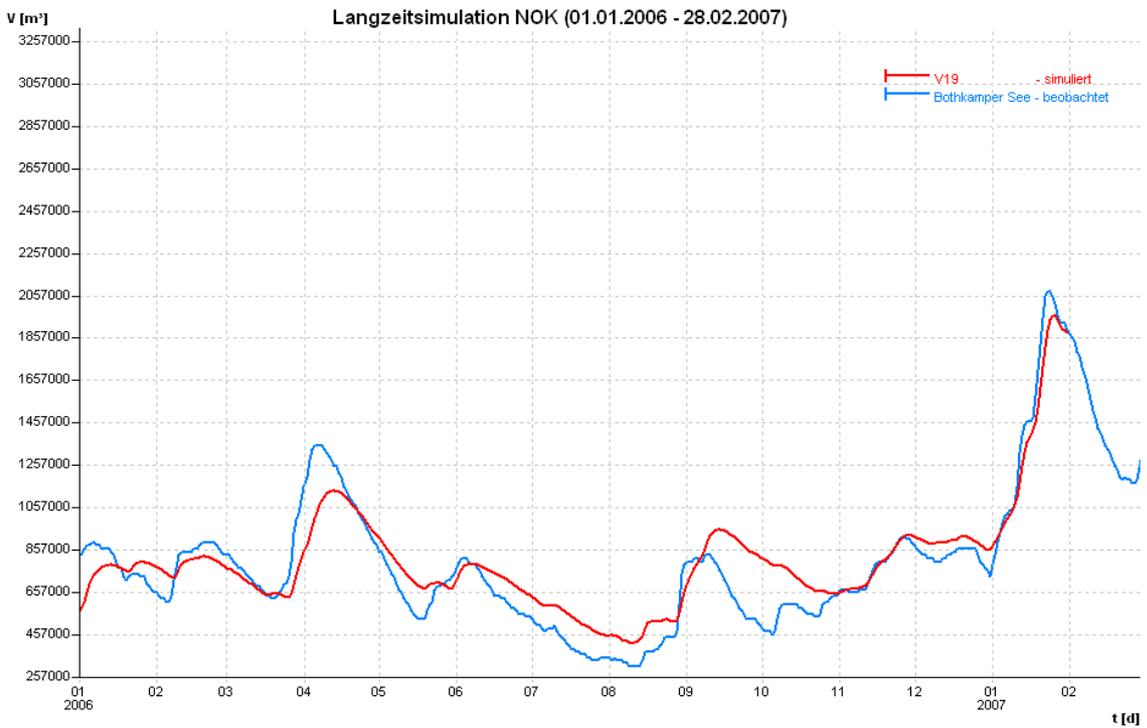


Abbildung 58: Kalibrierung Füllvolumen Bothkamper See – Hochwasser 2007 (Kyrill)

### C2 Pegel Eiderkaten (Eider)

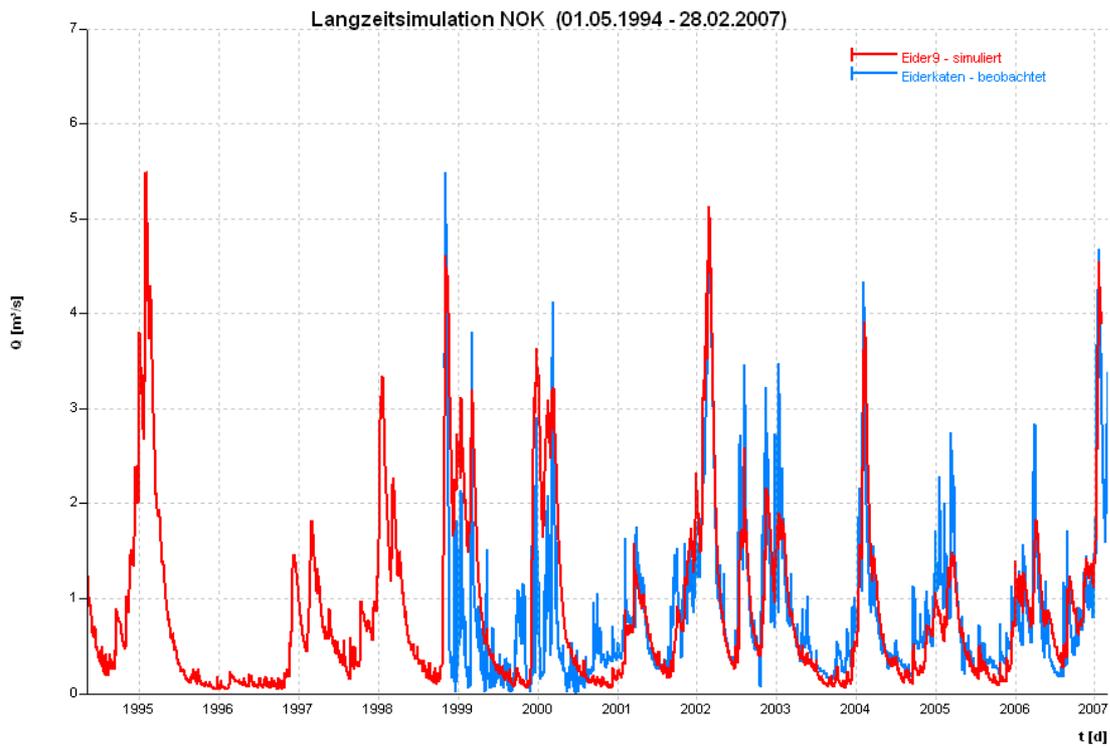


Abbildung 59: Kalibrierung Abflusspegel Eiderkaten – Übersicht

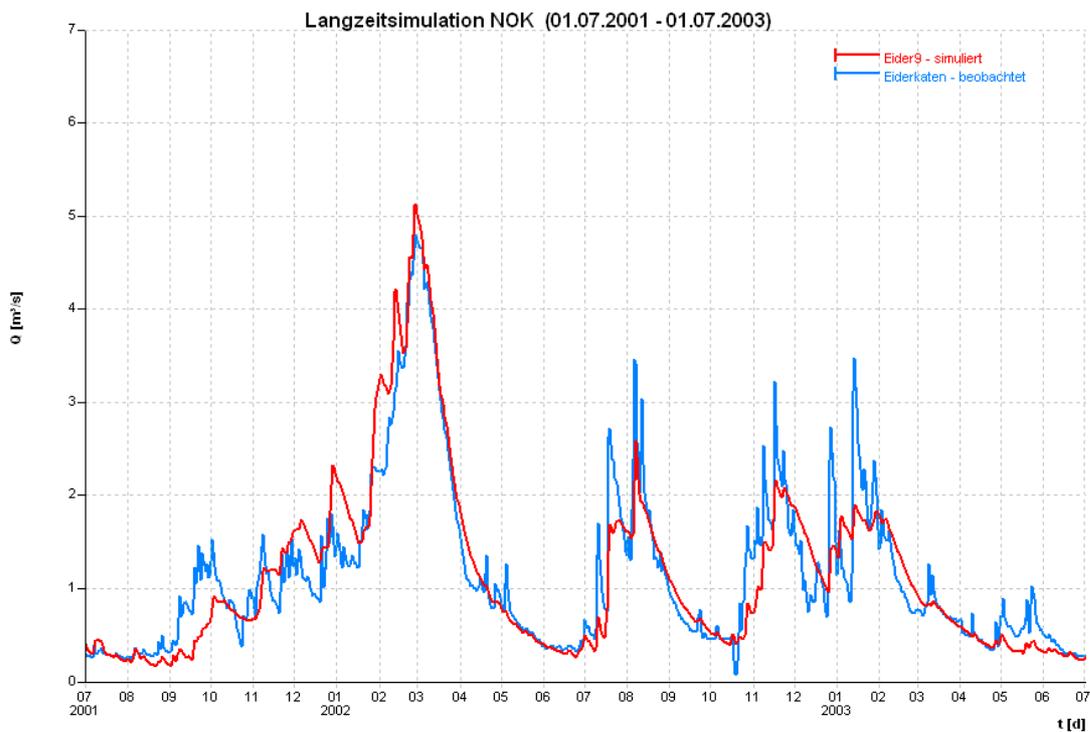


Abbildung 60: Kalibrierung Abflusspegel Eiderkaten – Hochwasser 2002

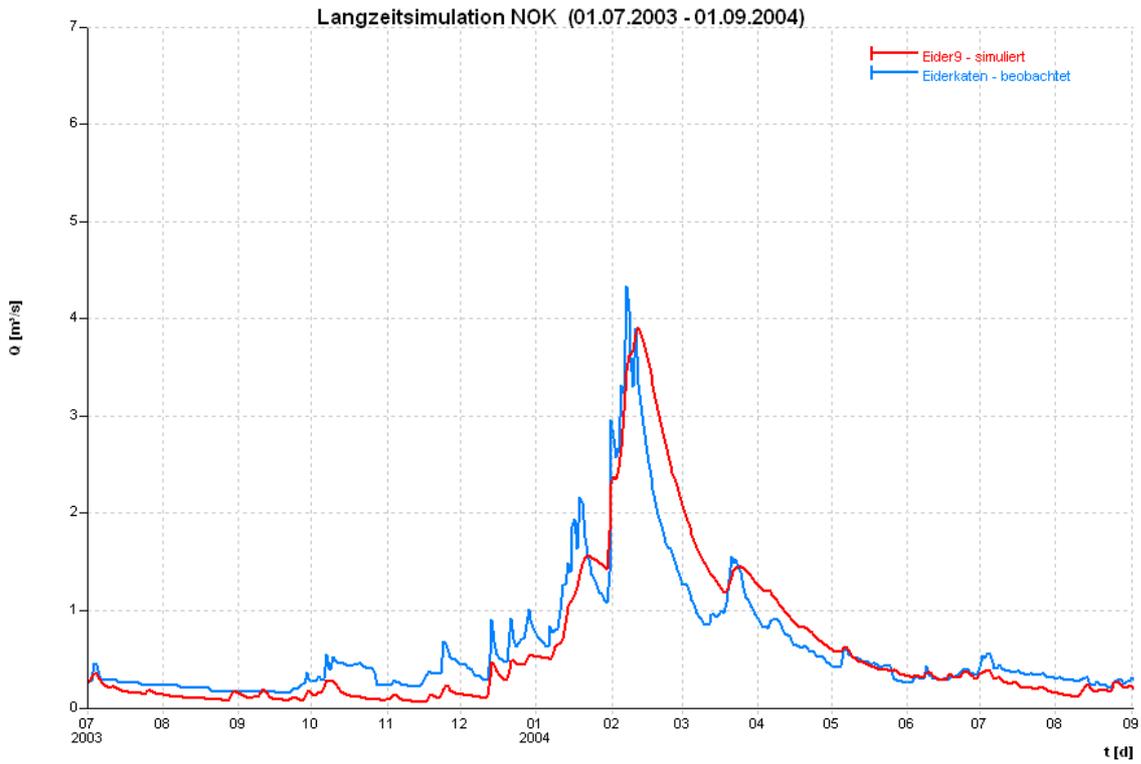


Abbildung 61: Kalibrierung Abflusspegel Eiderkatzen – Hochwasser 2004

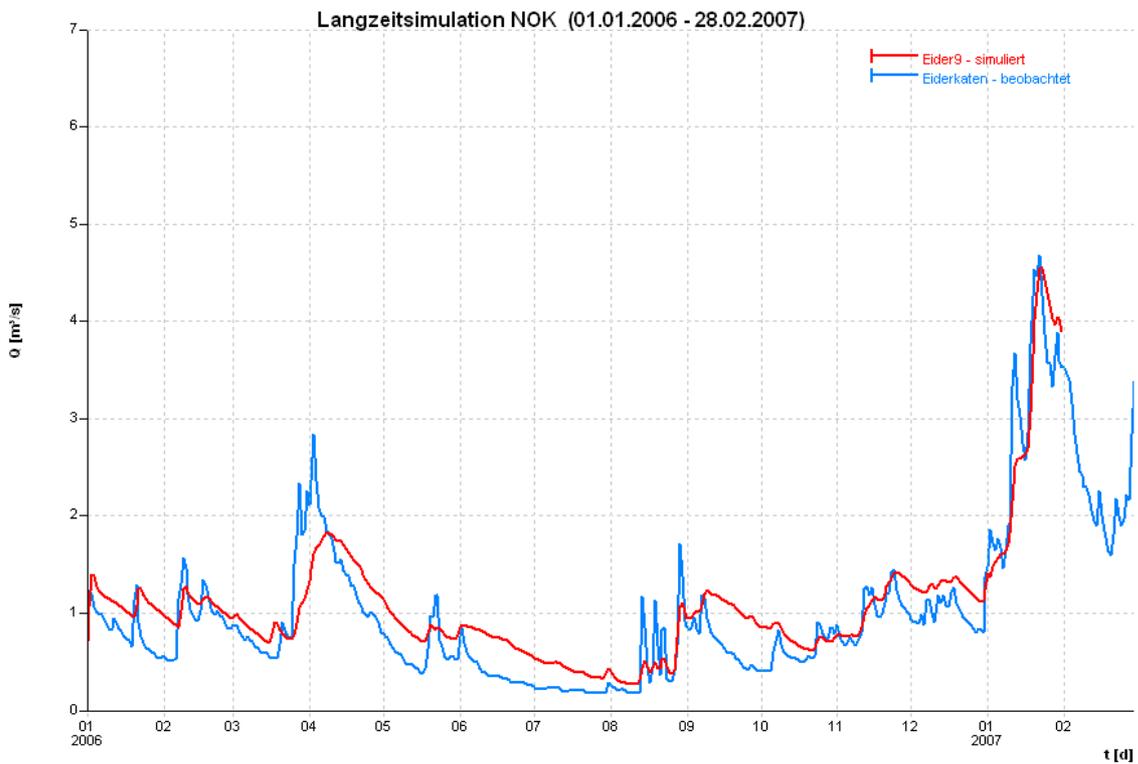


Abbildung 62: Kalibrierung Abflusspegel Eiderkatzen – Hochwasser 2007 (Kyrill)

**C3 Pegel Schmalstede (Eider)**

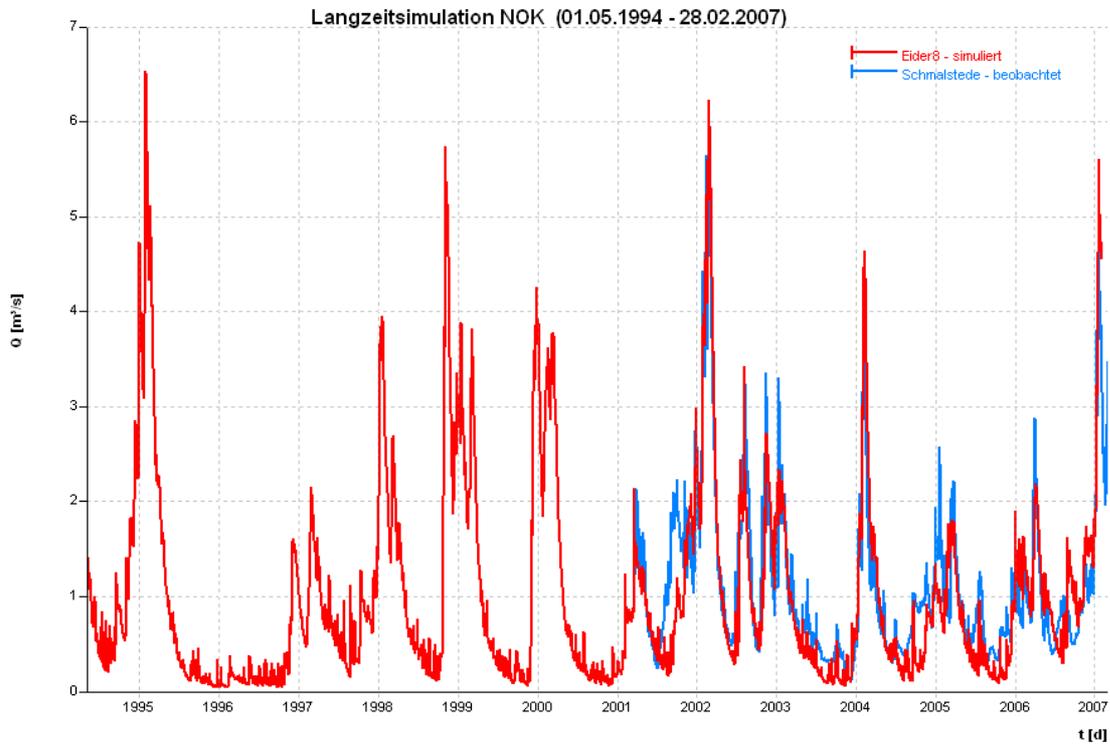


Abbildung 63: Kalibrierung Abflusspegel Schmalstede – Übersicht

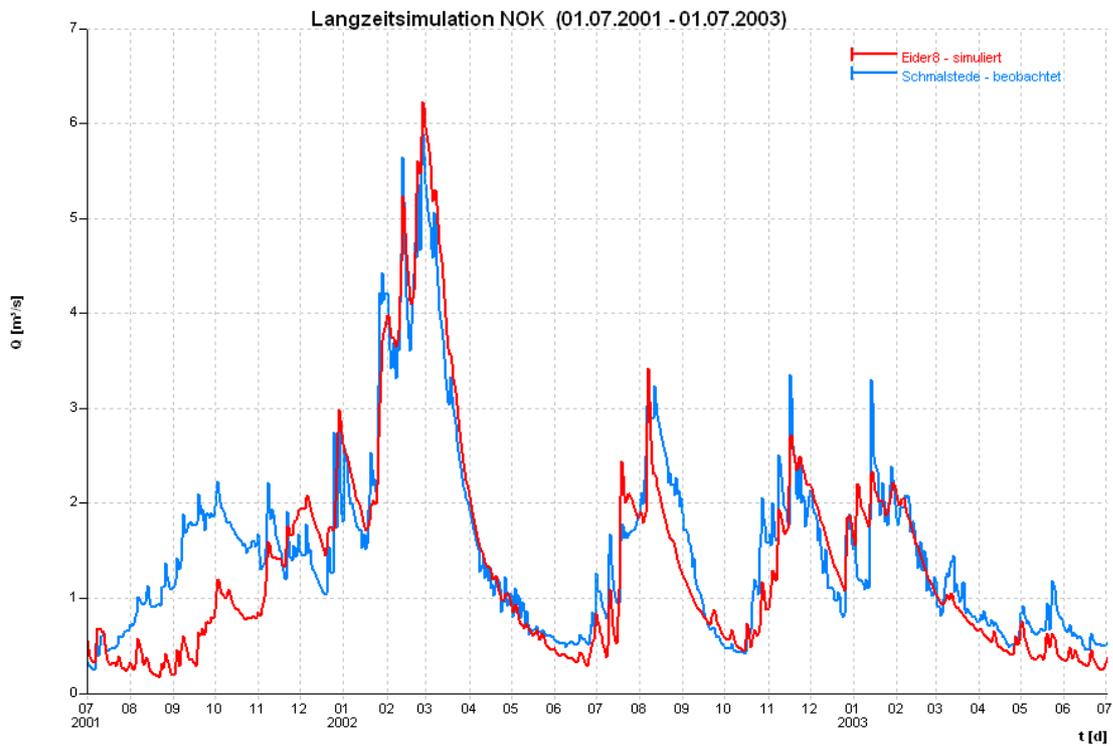


Abbildung 64: Kalibrierung Abflusspegel Schmalstede – Hochwasser 2002

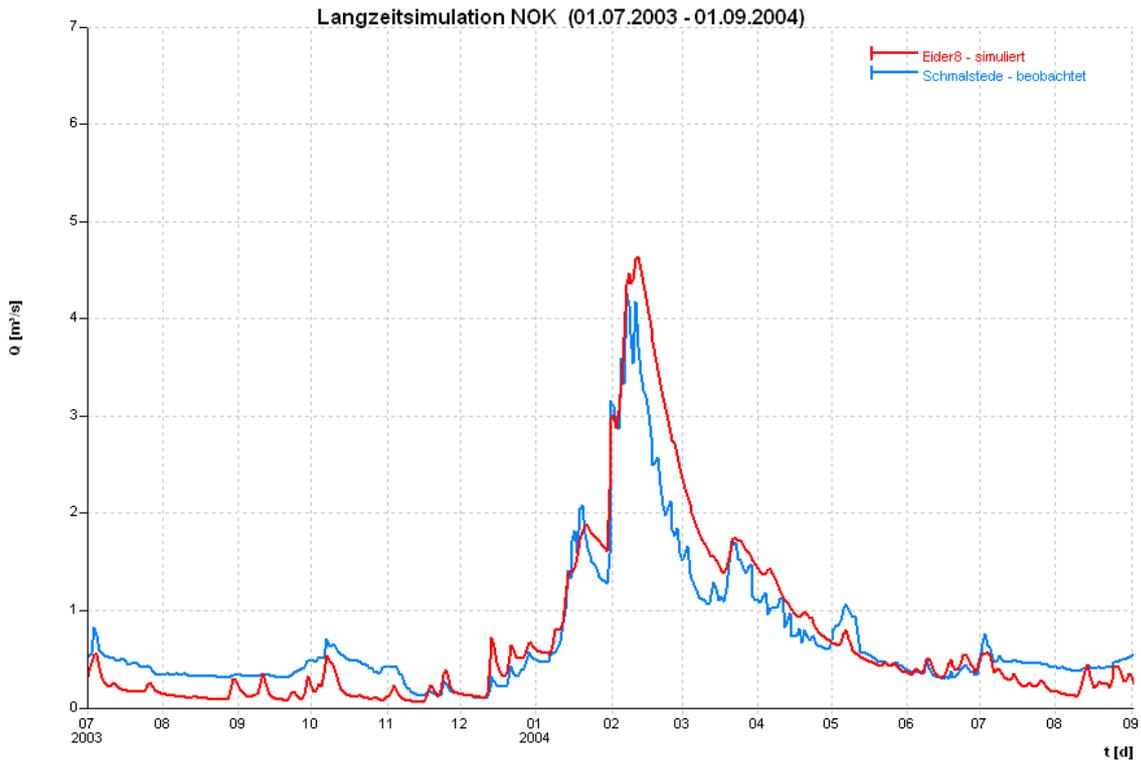


Abbildung 65: Kalibrierung Abflusspegel Schmalstede – Hochwasser 2004

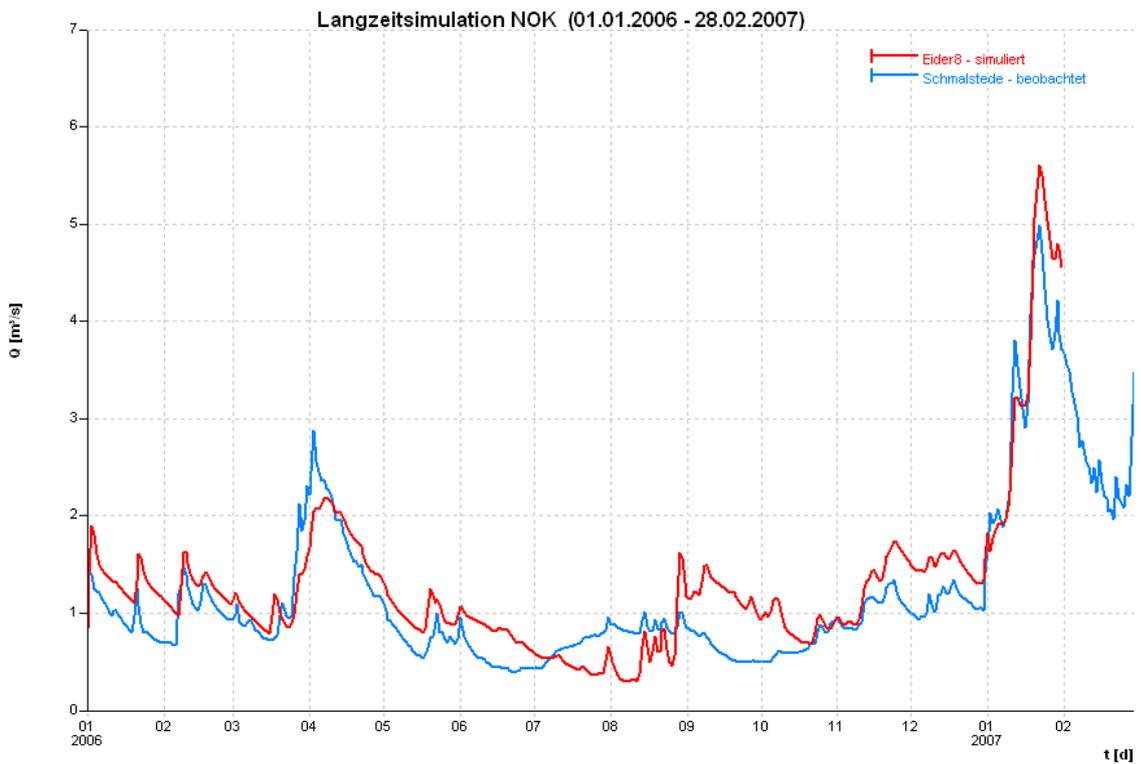


Abbildung 66: Kalibrierung Abflusspegel Schmalstede – Hochwasser 2007 (Kyrill)

**C4 Pegel Flintbek (Eider)**

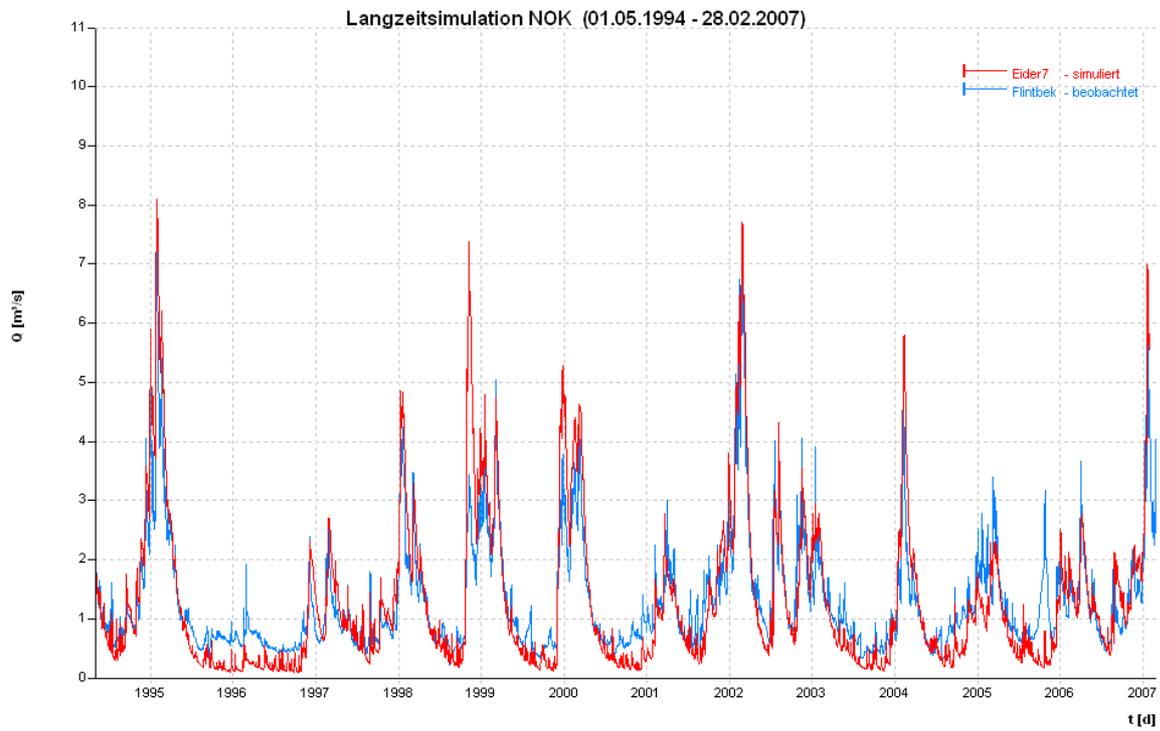


Abbildung 67: Kalibrierung Abflusspegel Flintbek – Übersicht

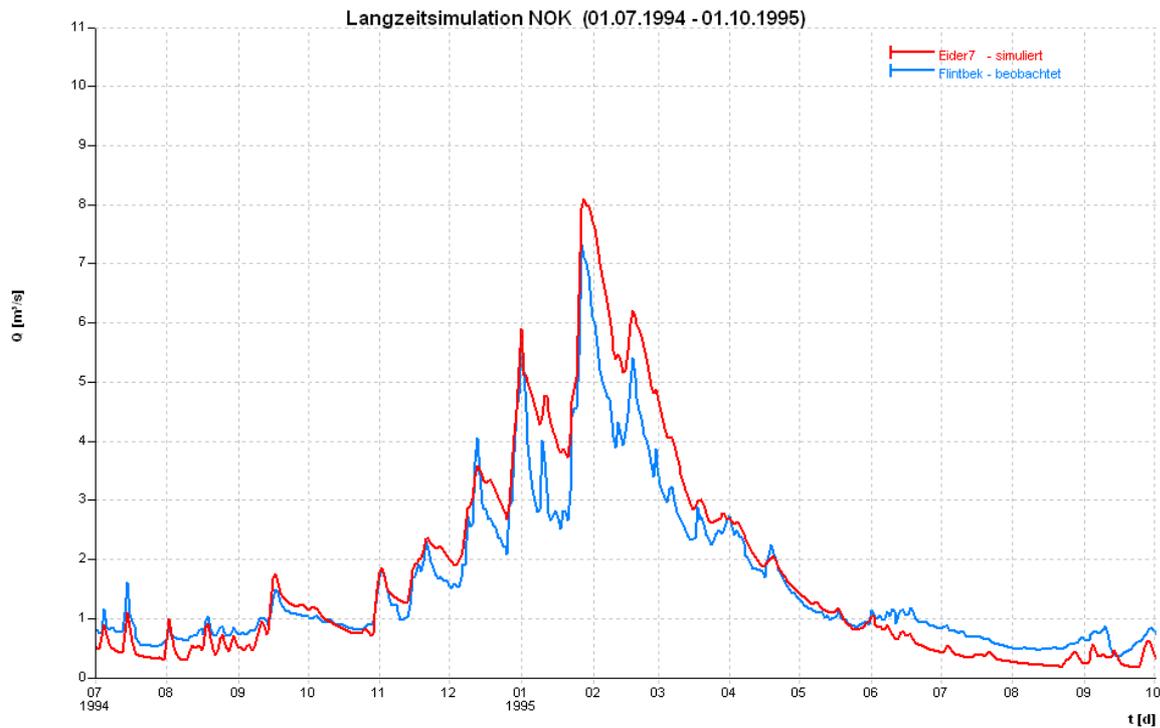


Abbildung 68: Kalibrierung Abflusspegel Flintbek – Hochwasser 1995

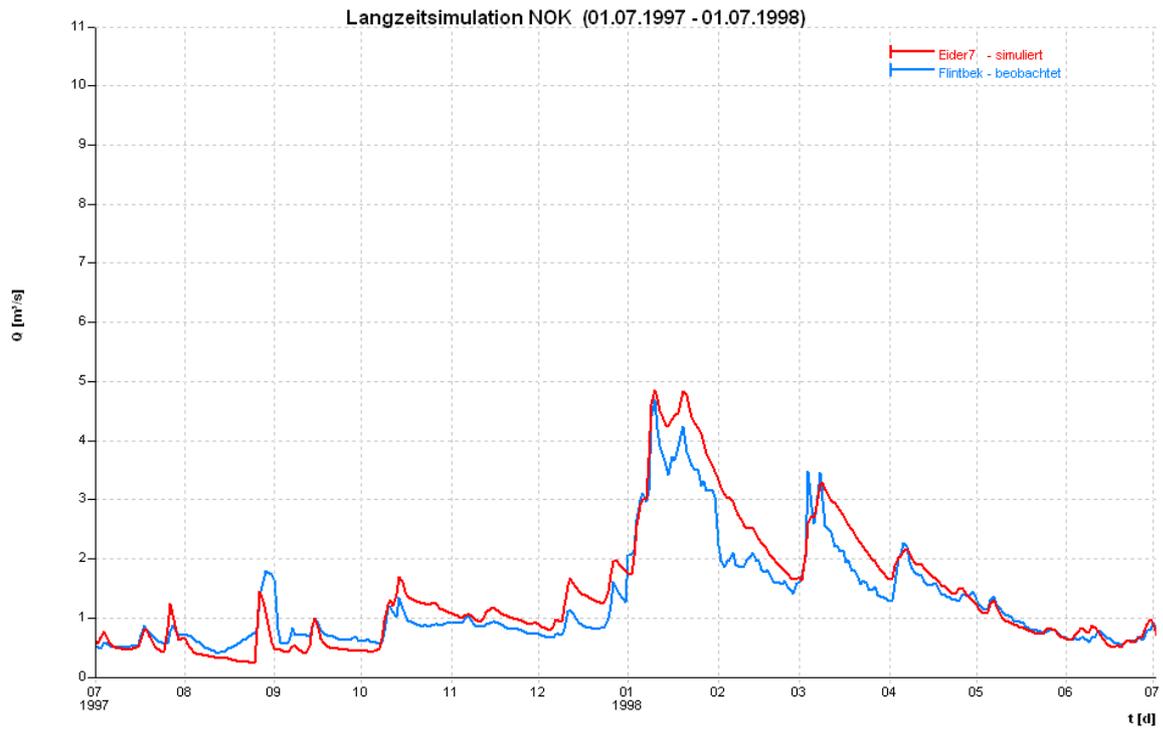


Abbildung 69: Kalibrierung Abflusspegel Flintbek – Hochwasser 1998

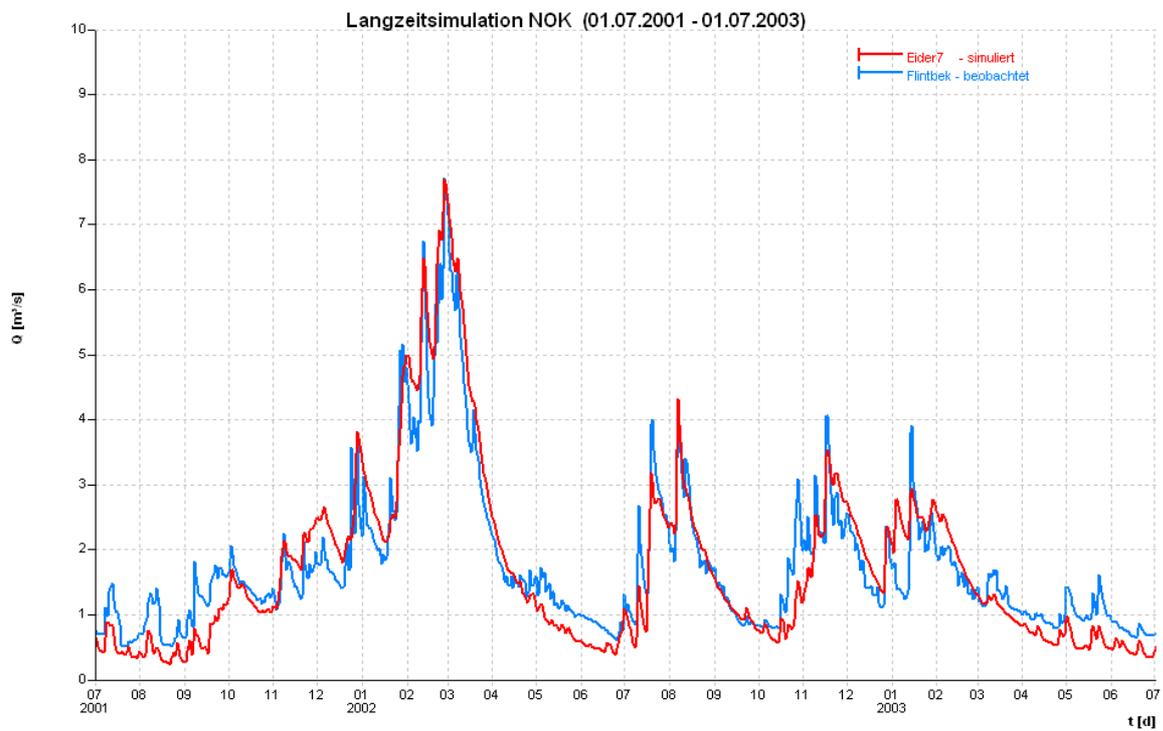


Abbildung 70: Kalibrierung Abflusspegel Flintbek – Hochwasser 2002

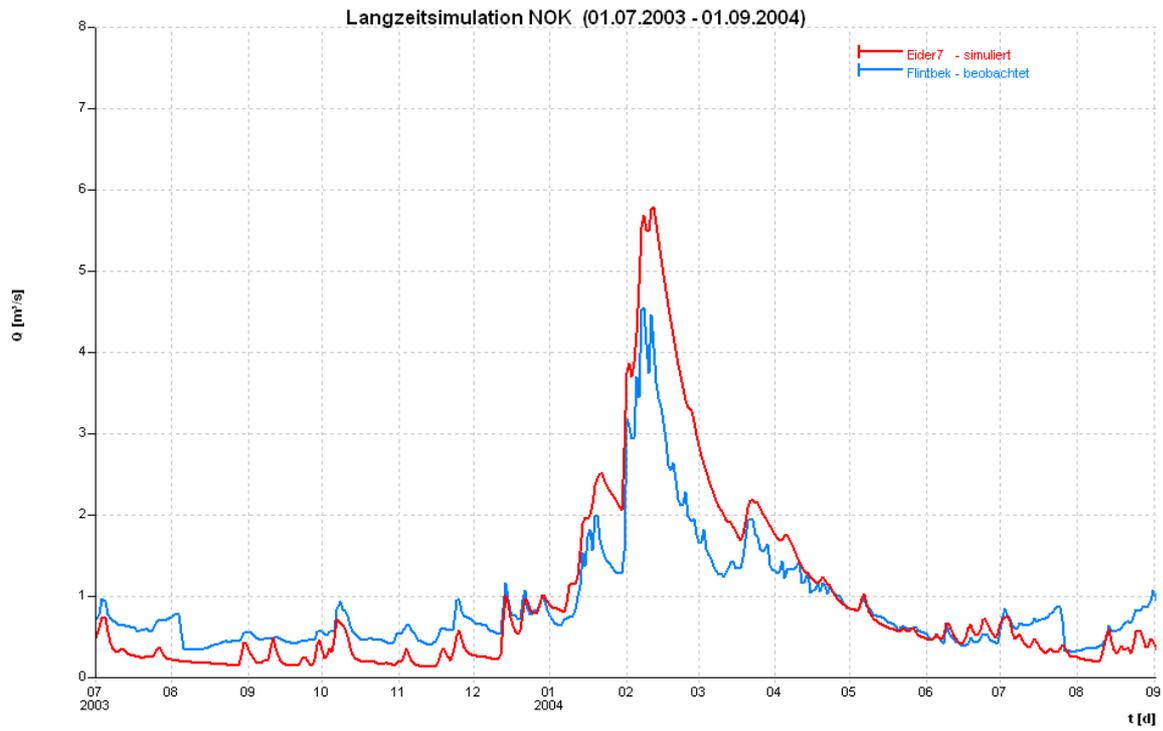


Abbildung 71: Kalibrierung Abflusspegel Flintbek – Hochwasser 2004

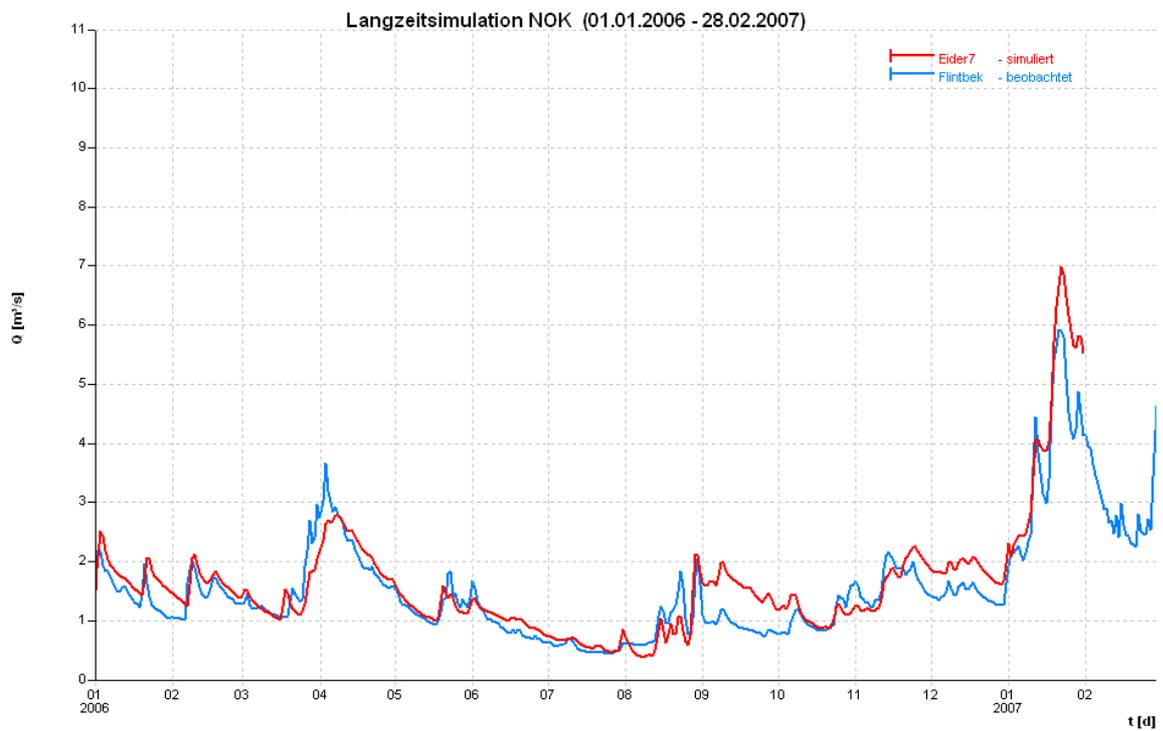


Abbildung 72: Kalibrierung Abflusspegel Flintbek – Hochwasser 2007 (Kyrill)

### C5 Pegel Hammer (Eider)

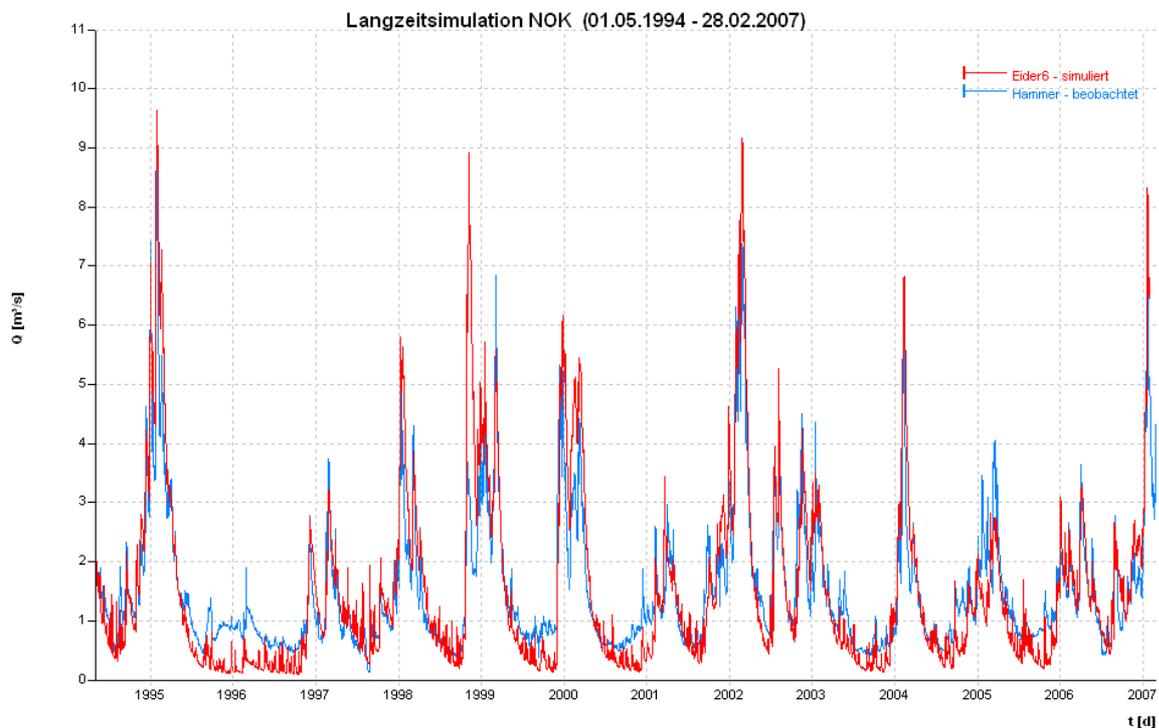


Abbildung 73: Kalibrierung Abflusspegel Hammer – Übersicht

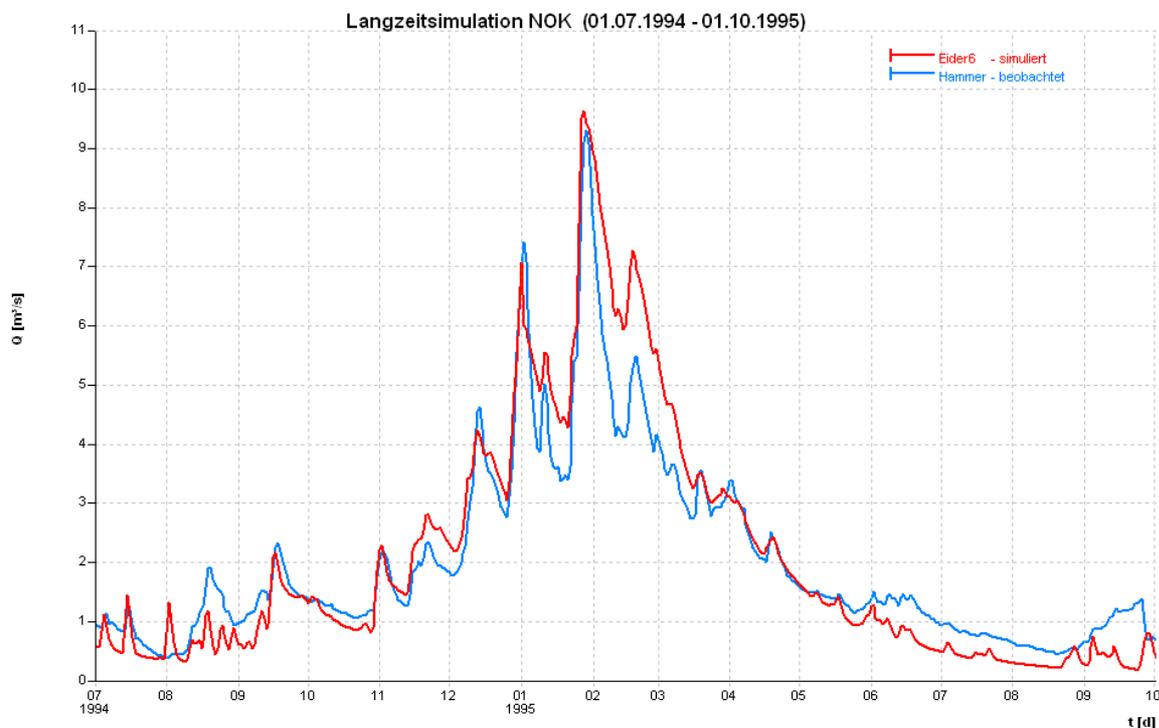


Abbildung 74: Kalibrierung Abflusspegel Hammer – Hochwasser 1995

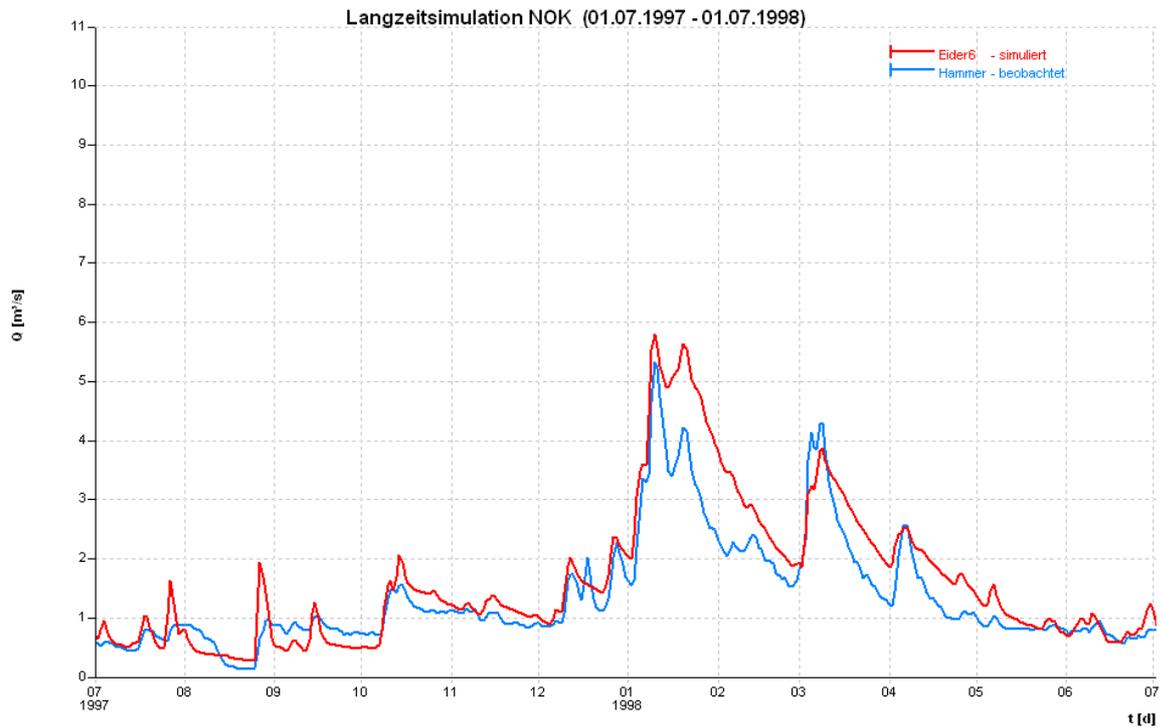


Abbildung 75: Kalibrierung Abflusspegel Hammer – Hochwasser 1998

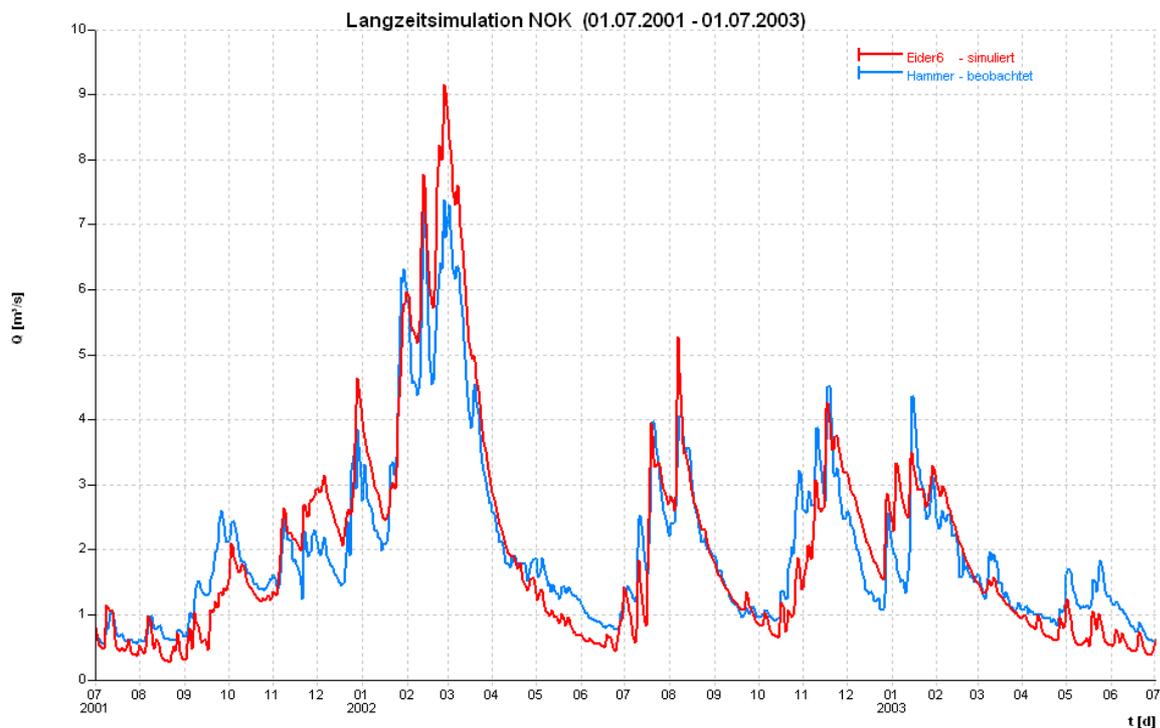


Abbildung 76: Kalibrierung Abflusspegel Hammer – Hochwasser 2002

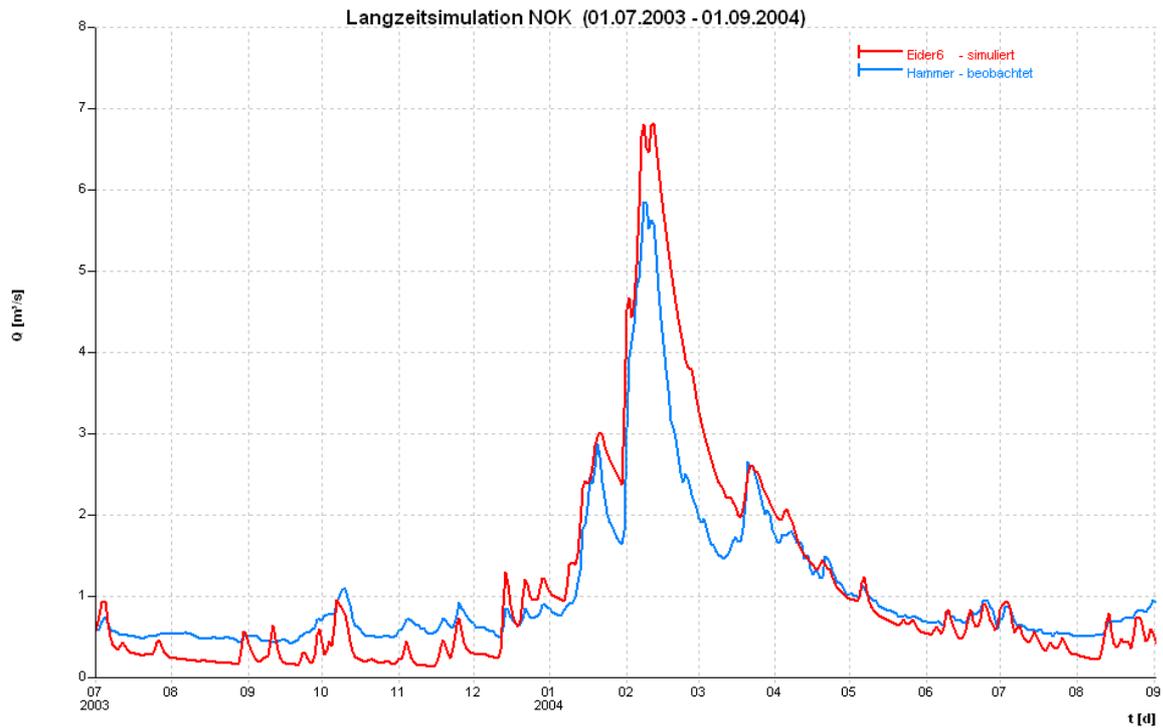


Abbildung 77: Kalibrierung Abflusspegel Hammer – Hochwasser 2004

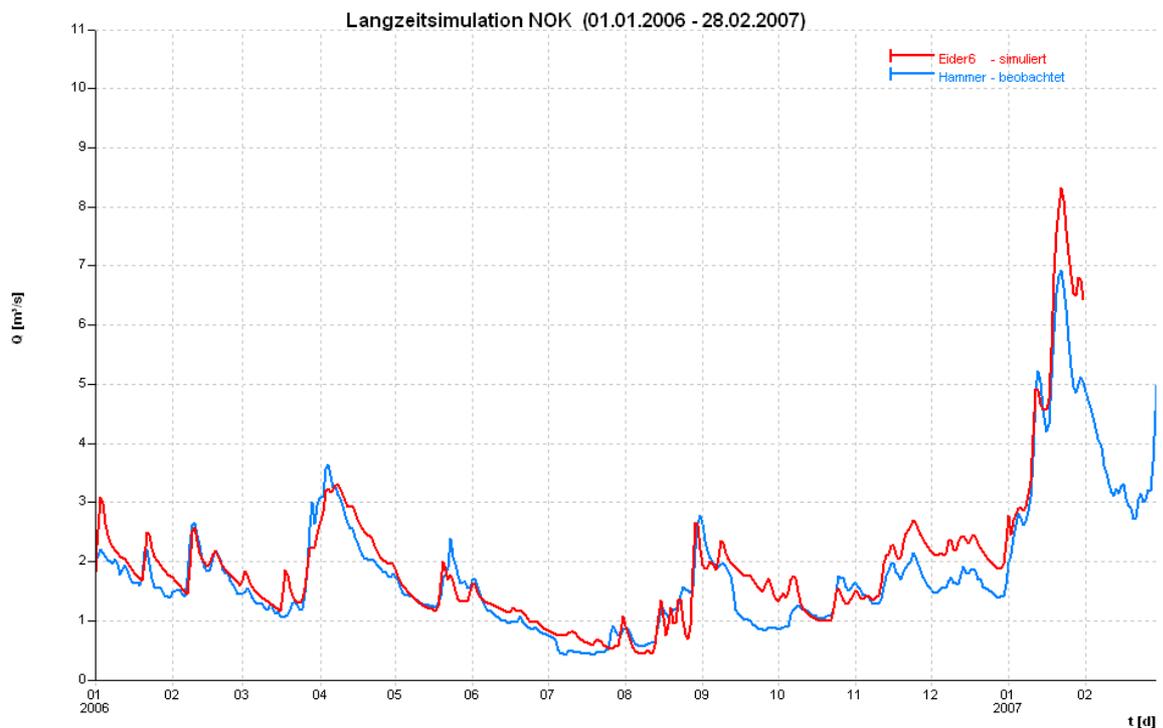


Abbildung 78: Kalibrierung Abflusspegel Hammer – Hochwasser 2007 (Kyrill)

### C6 Westensee (Eider)

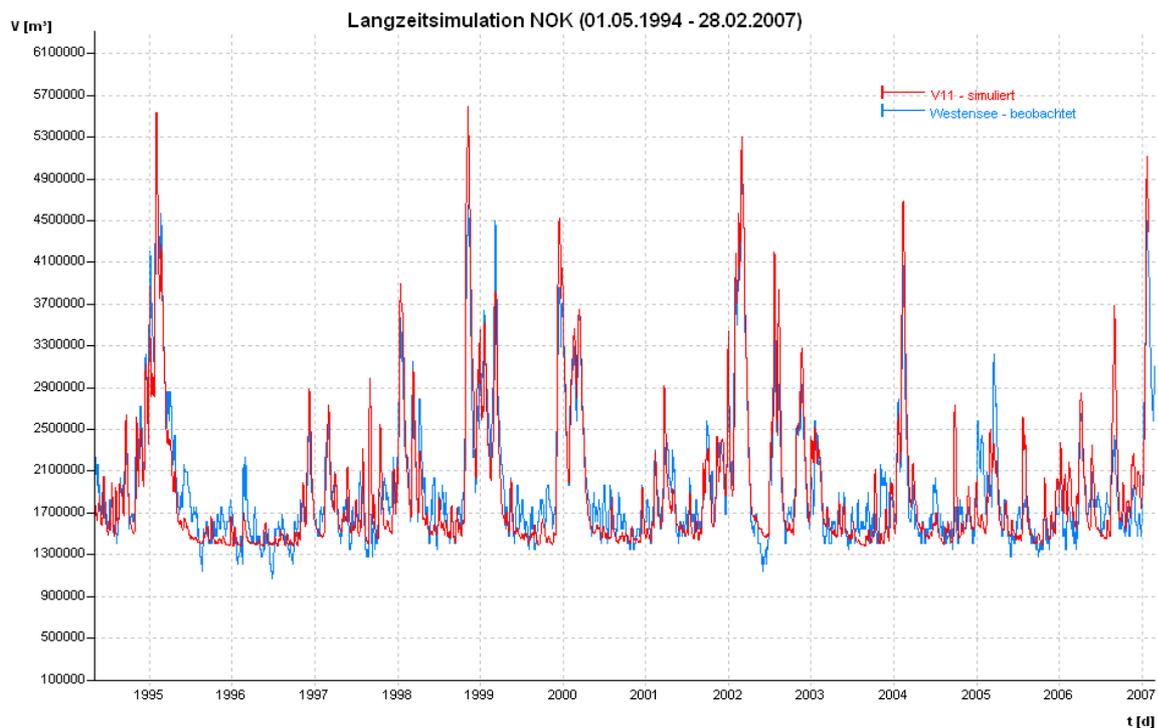


Abbildung 79: Kalibrierung Füllvolumen Westensee – Übersicht

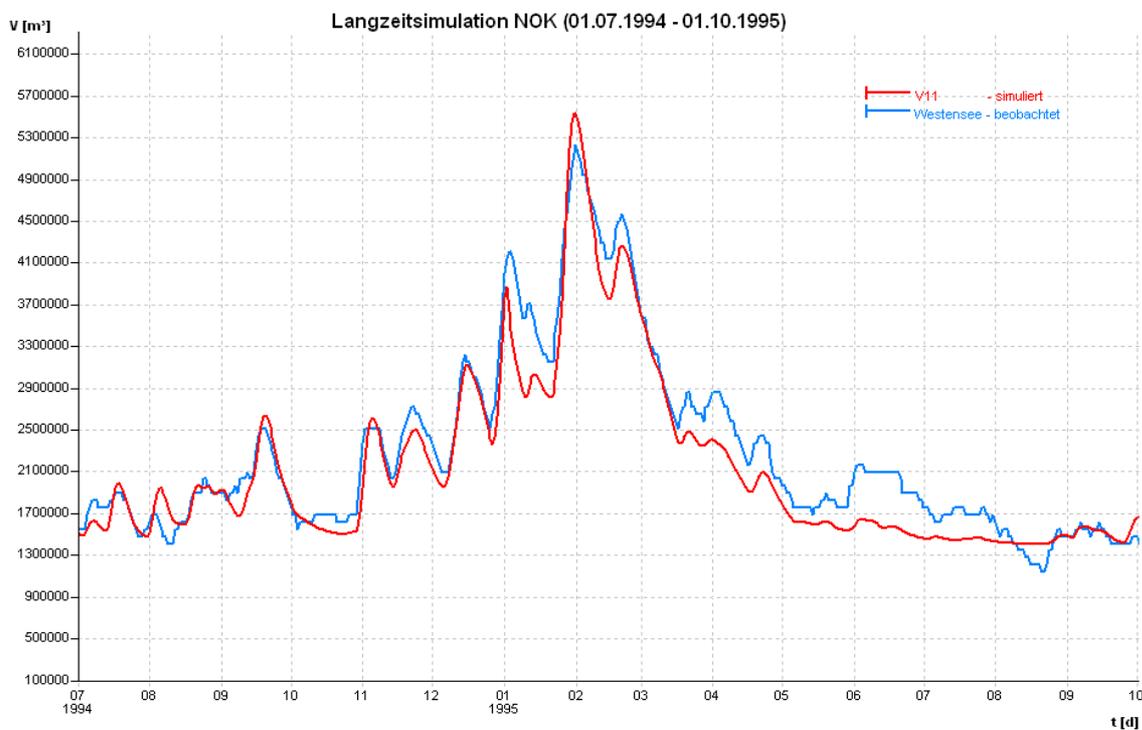


Abbildung 80: Kalibrierung Füllvolumen Westensee – Hochwasser 1995

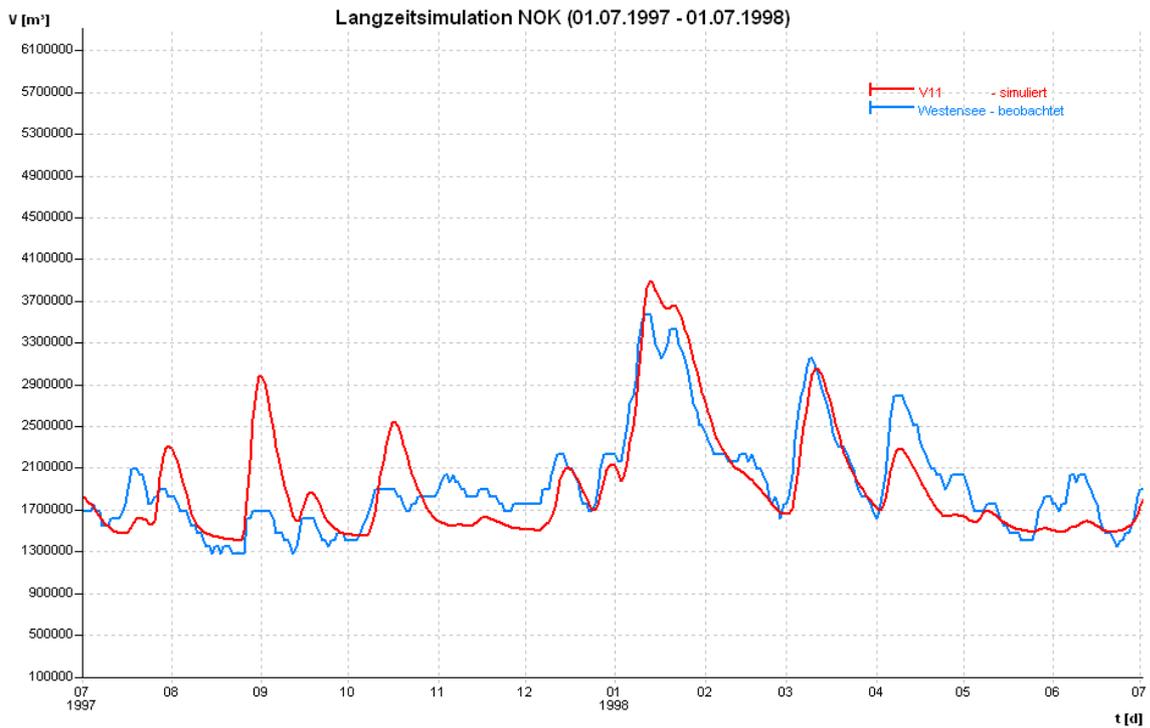


Abbildung 81: Kalibrierung Füllvolumen Westensee – Hochwasser 1998

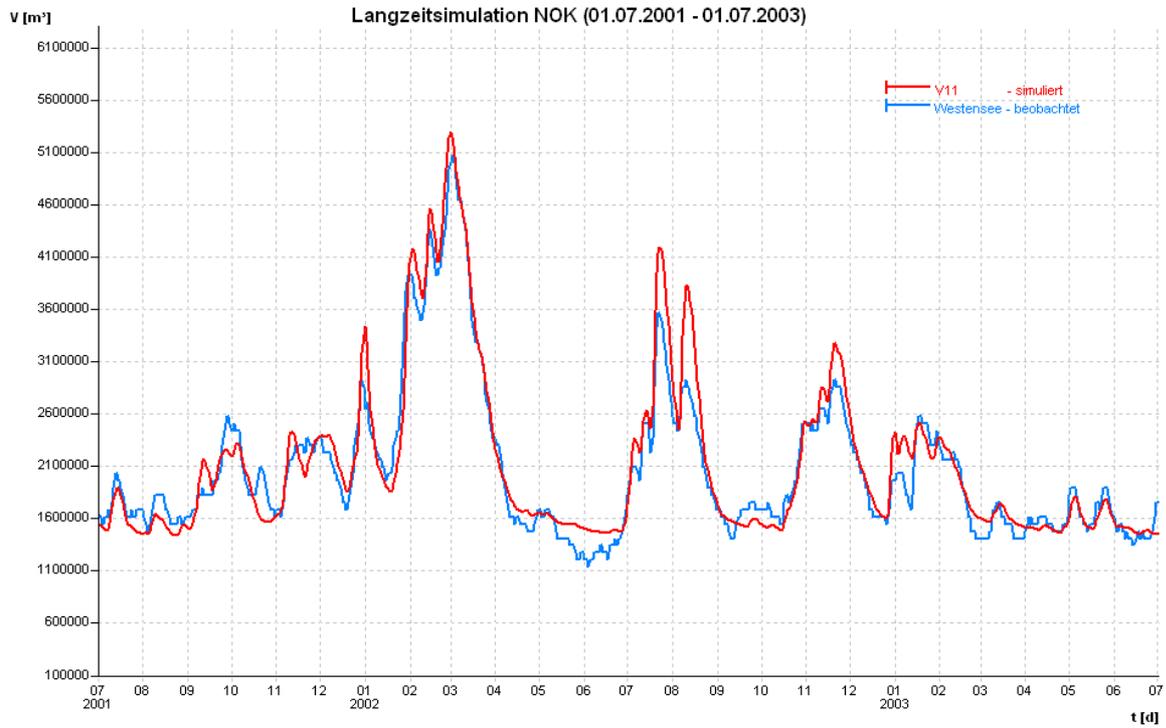


Abbildung 82: Kalibrierung Füllvolumen Westensee – Hochwasser 2002

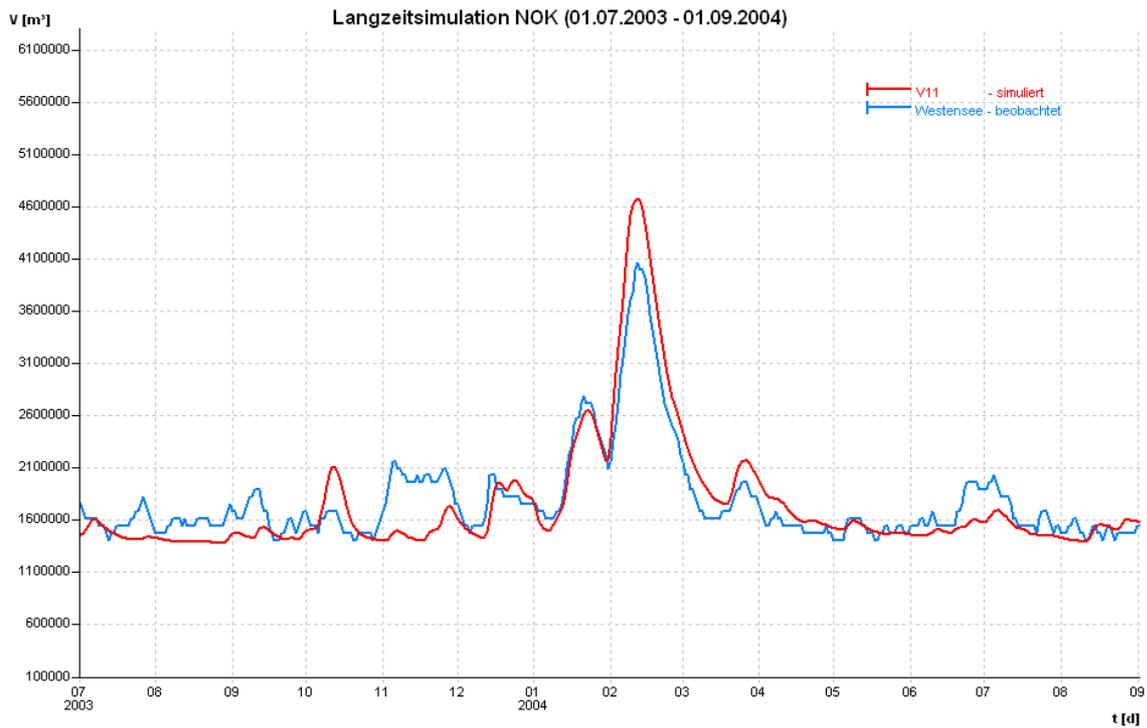


Abbildung 83: Kalibrierung Füllvolumen Westensee – Hochwasser 2004

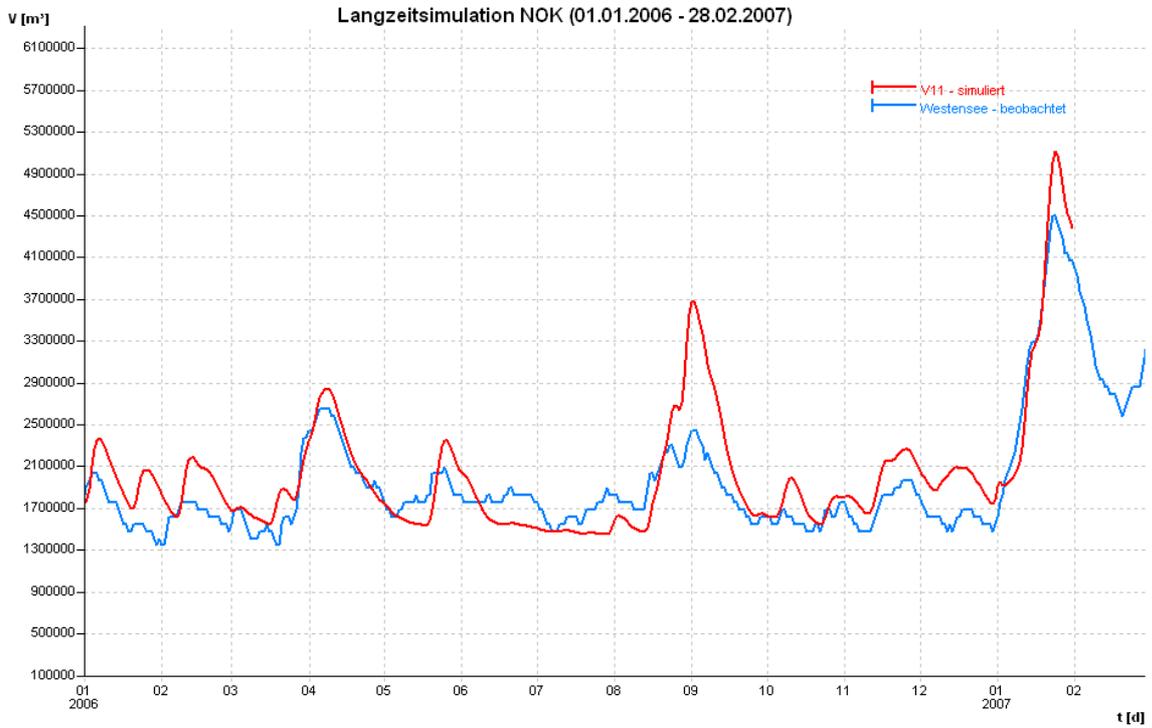


Abbildung 84: Kalibrierung Füllvolumen Westensee – Hochwasser 2007 (Kyrill)

### C7 Wittensee

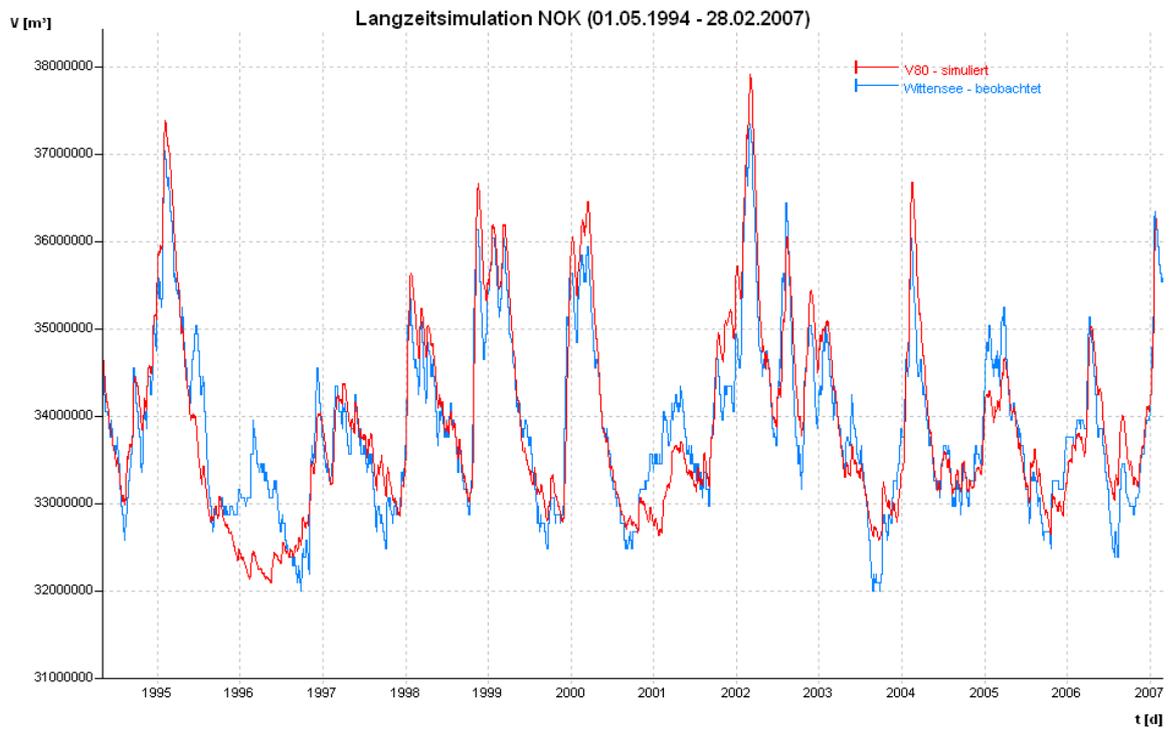


Abbildung 85: Kalibrierung Füllvolumen Wittensee – Übersicht

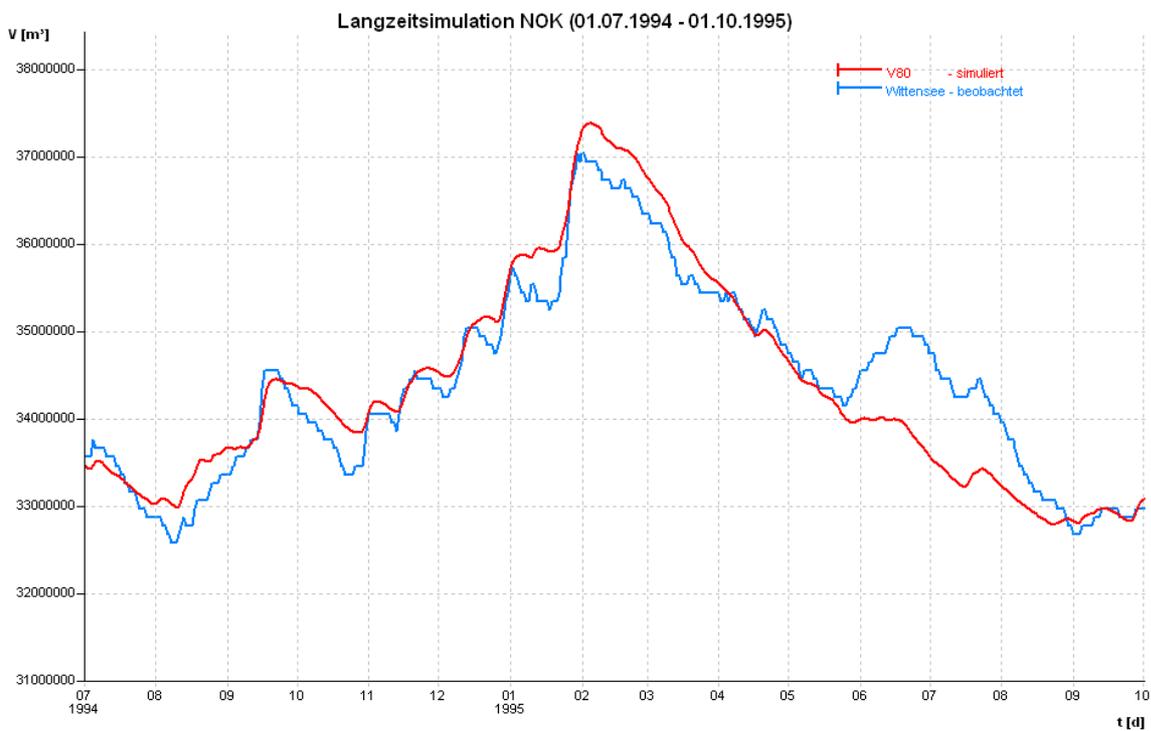


Abbildung 86: Kalibrierung Füllvolumen Wittensee – Hochwasser 1995

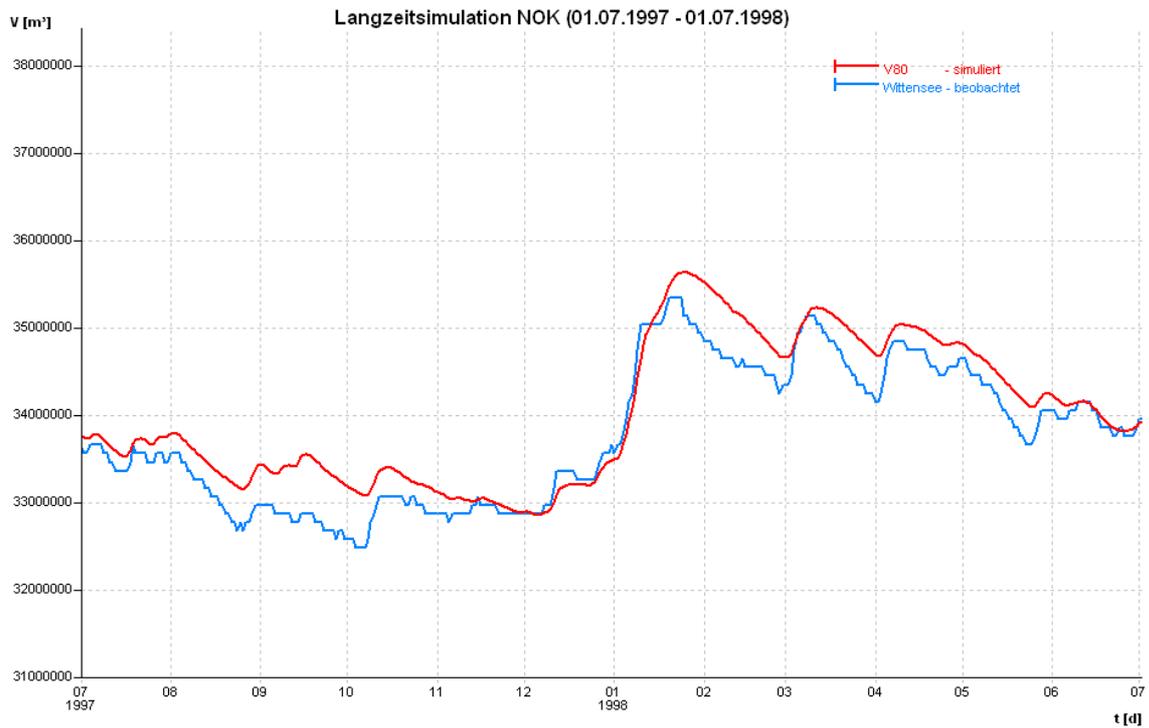


Abbildung 87: Kalibrierung Füllvolumen Wittensee – Hochwasser 1998

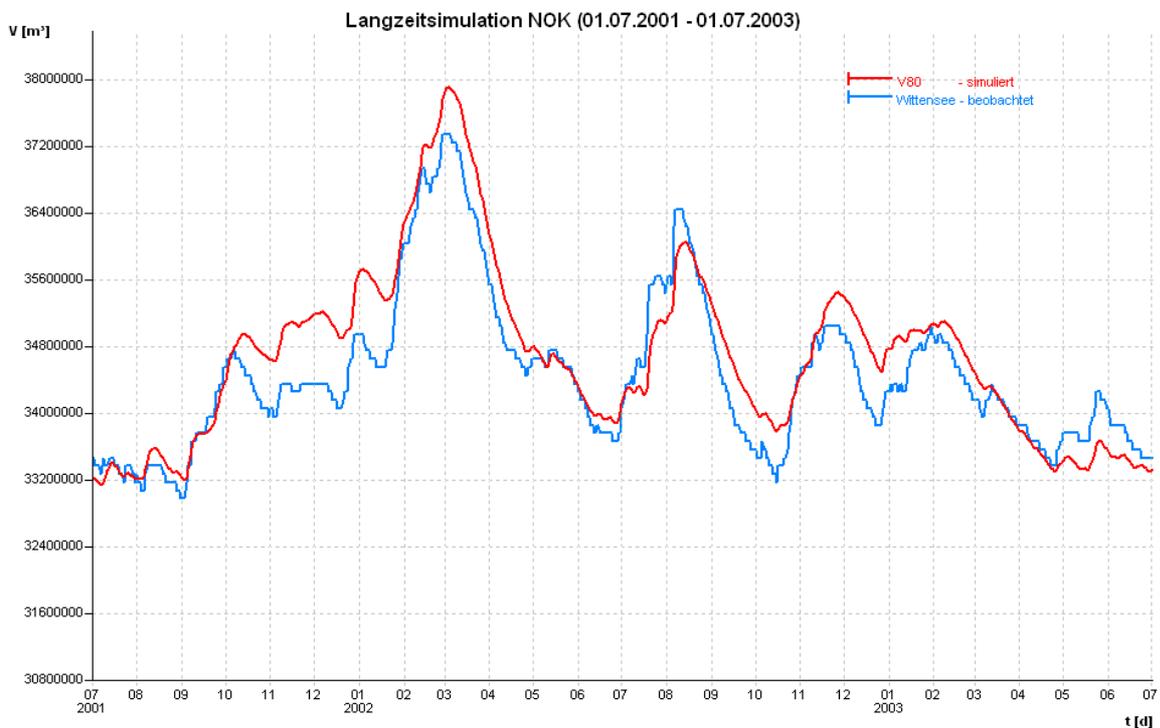


Abbildung 88: Kalibrierung Füllvolumen Wittensee – Hochwasser 2002

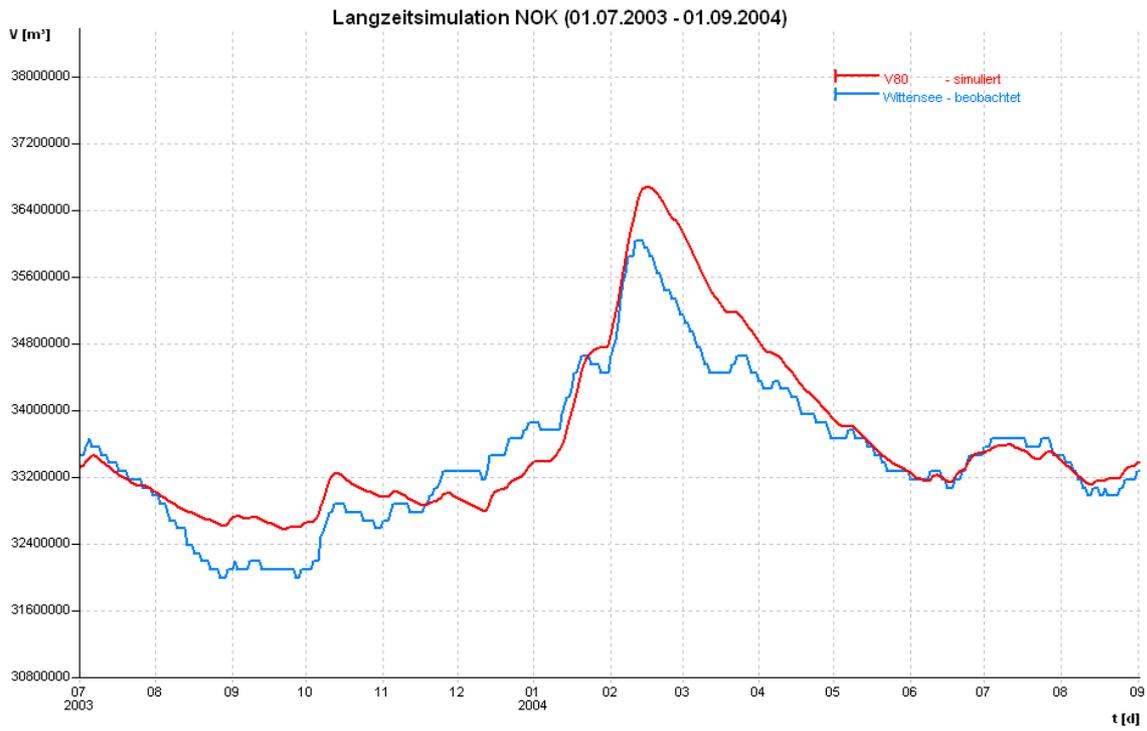


Abbildung 89: Kalibrierung Füllvolumen Wittensee – Hochwasser 2004

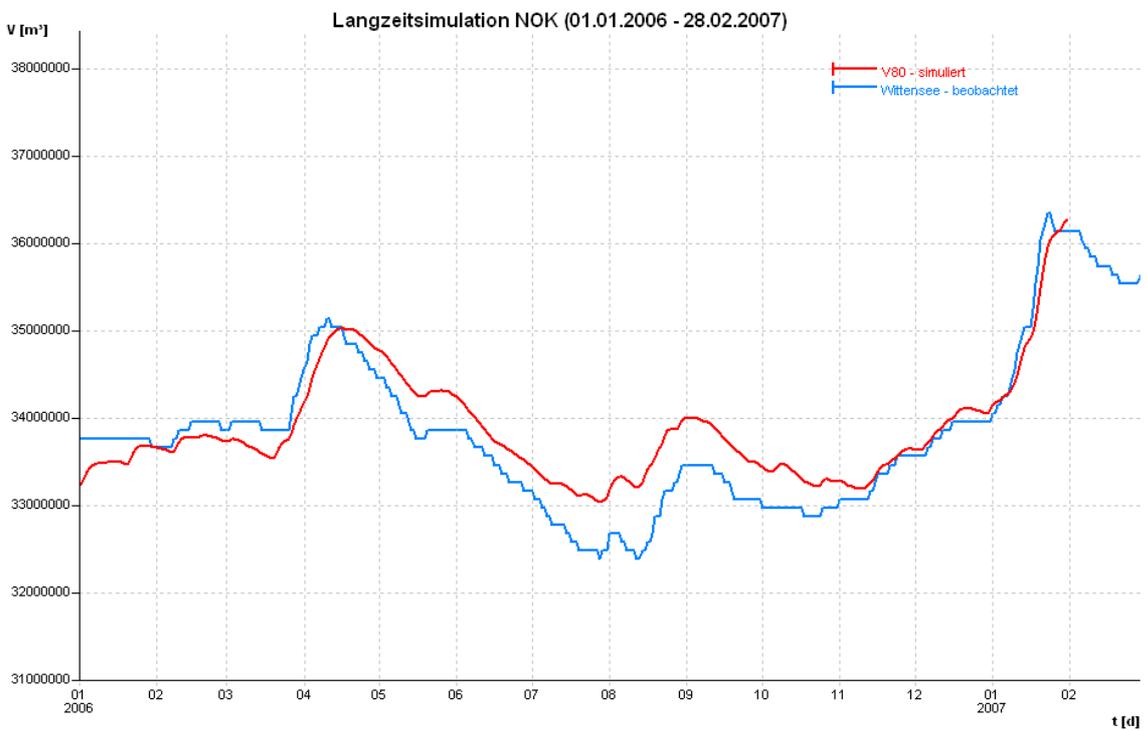


Abbildung 90: Kalibrierung Füllvolumen Wittensee – Hochwasser 2007 (Kyrill)

### C8 Pegel Osterröfeld (Wehrau)

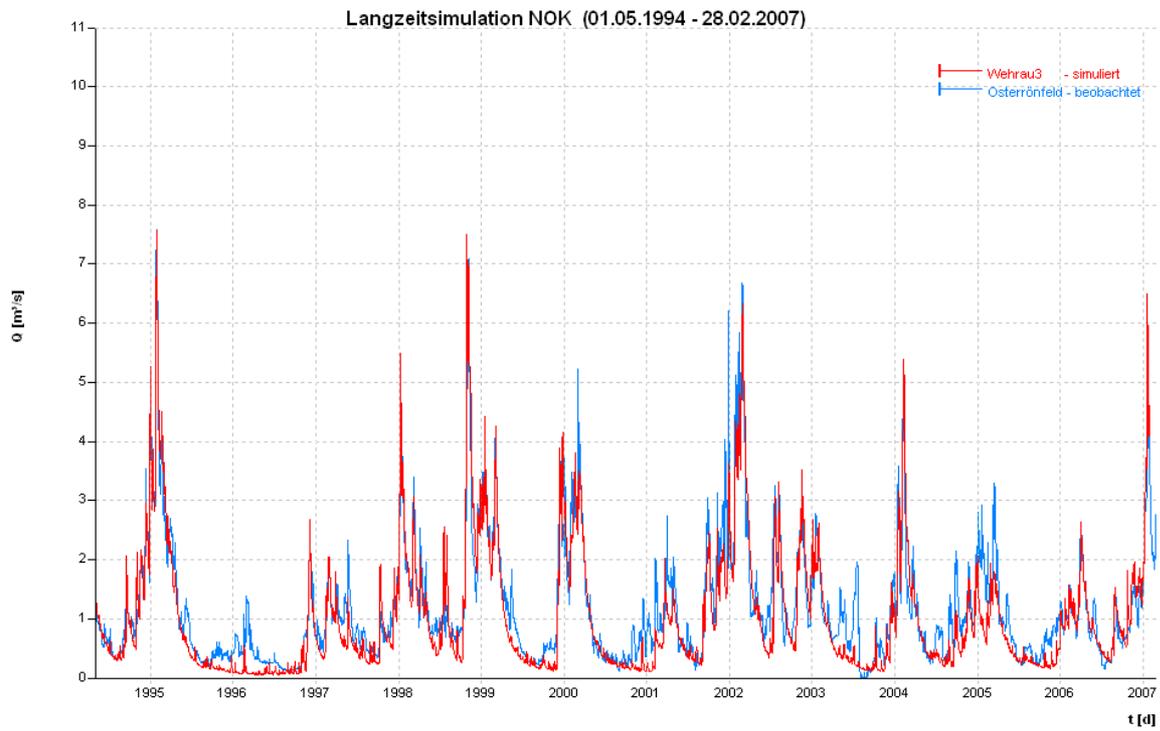


Abbildung 91: Kalibrierung Abflusspegel Osterröfeld – Übersicht

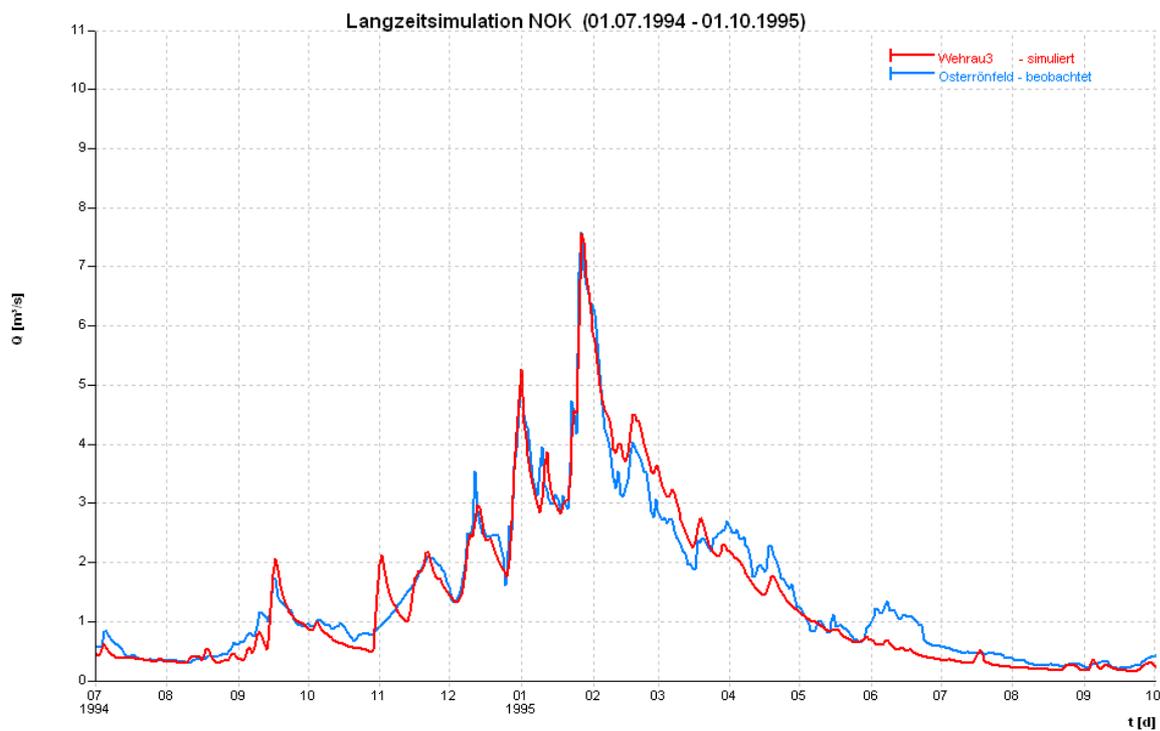


Abbildung 92: Kalibrierung Abflusspegel Osterröfeld – Hochwasser 1995

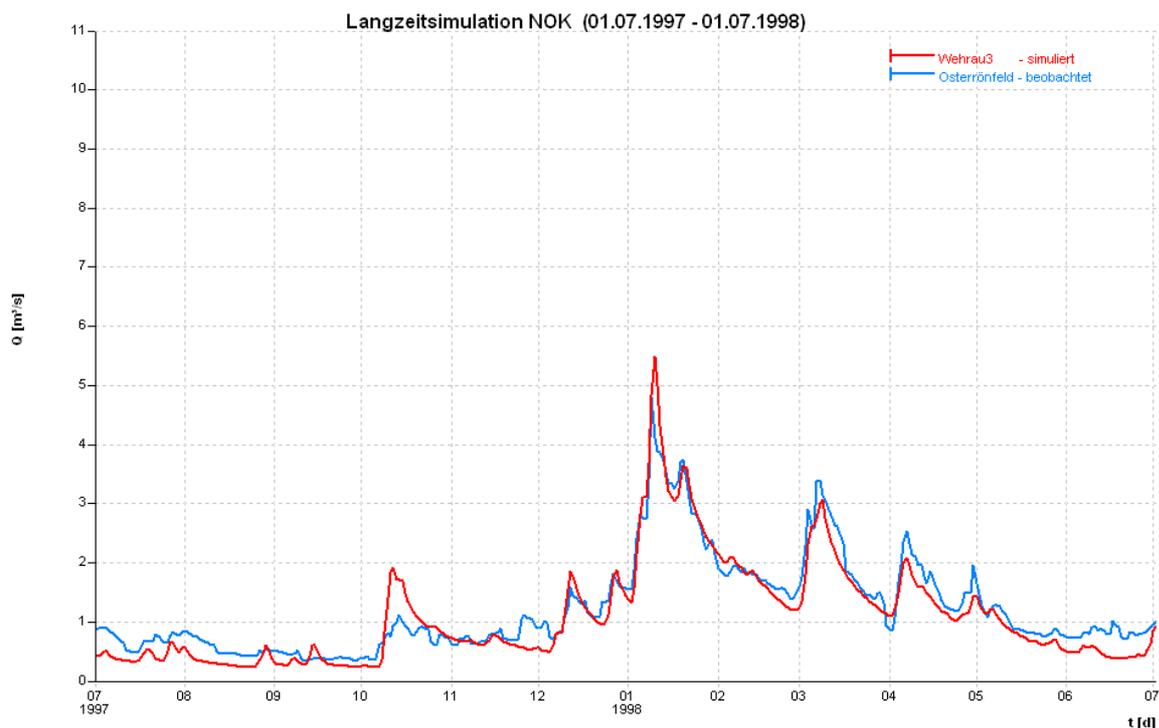


Abbildung 93: Kalibrierung Abflusspegel Osterrönfeld – Hochwasser 1998

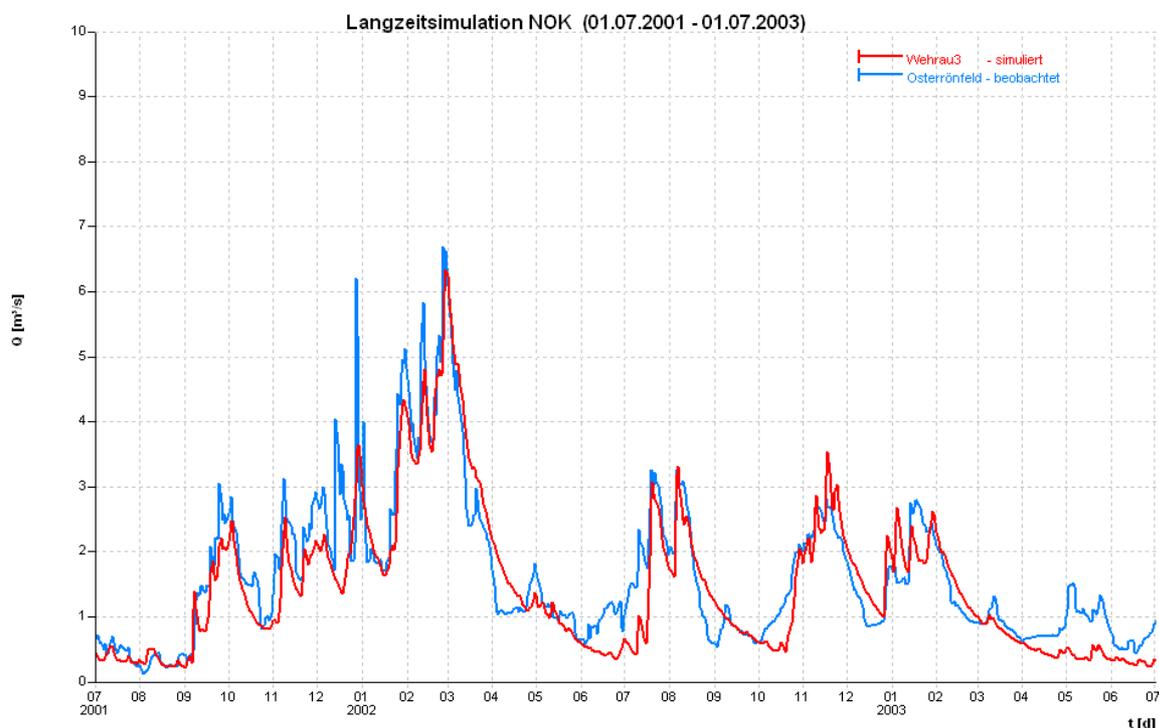


Abbildung 94: Kalibrierung Abflusspegel Osterrönfeld – Hochwasser 2002

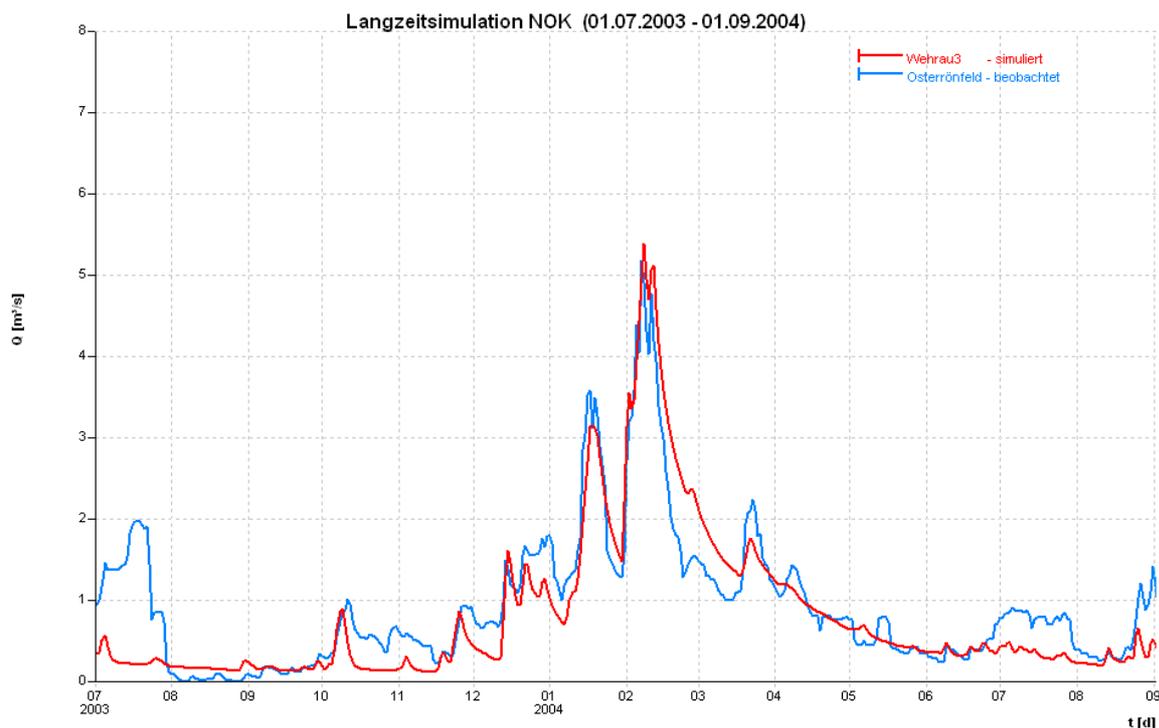


Abbildung 95: Kalibrierung Abflusspegel Osterrönfeld – Hochwasser 2004

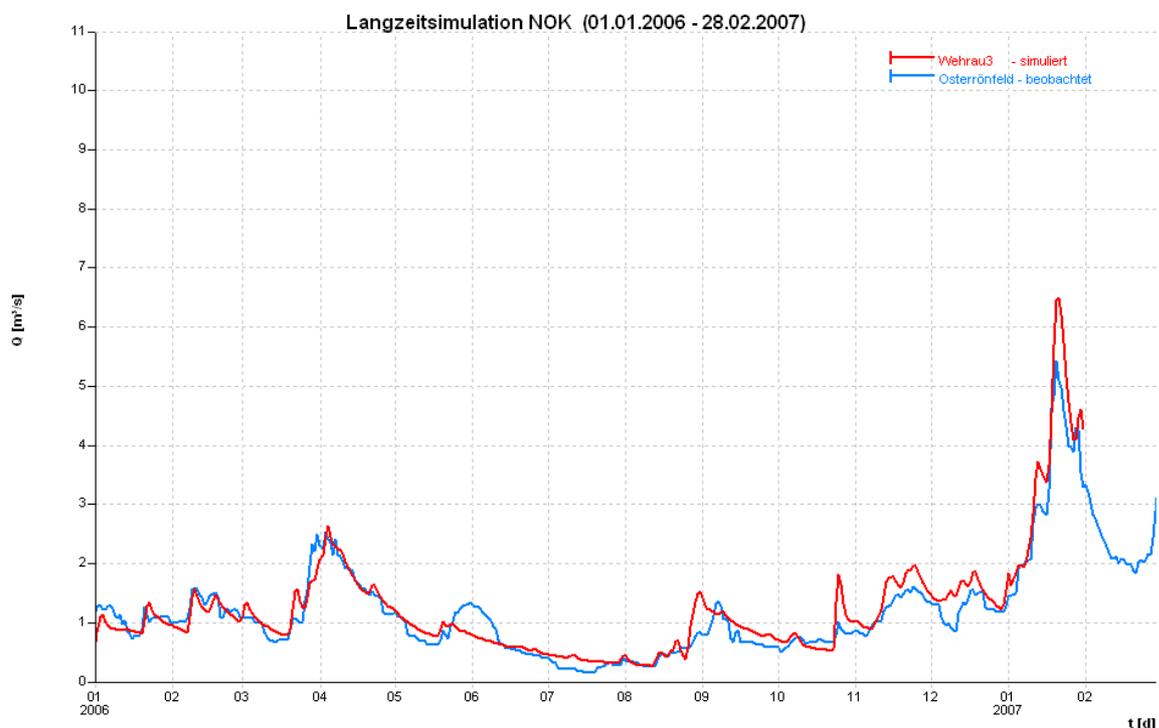


Abbildung 96: Kalibrierung Abflusspegel Osterrönfeld – Hochwasser 2007 (Kyrill)

### C9 Pegel Bokel (Jevenau)

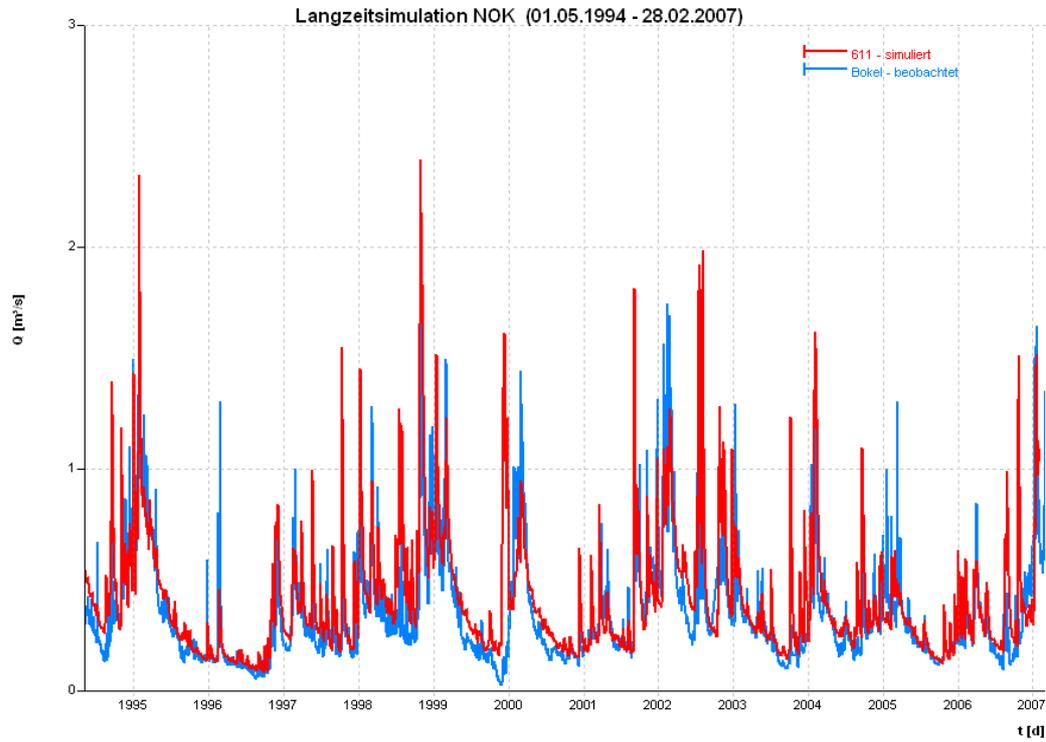


Abbildung 97: Kalibrierung Abflusspegel Bokel – Übersicht

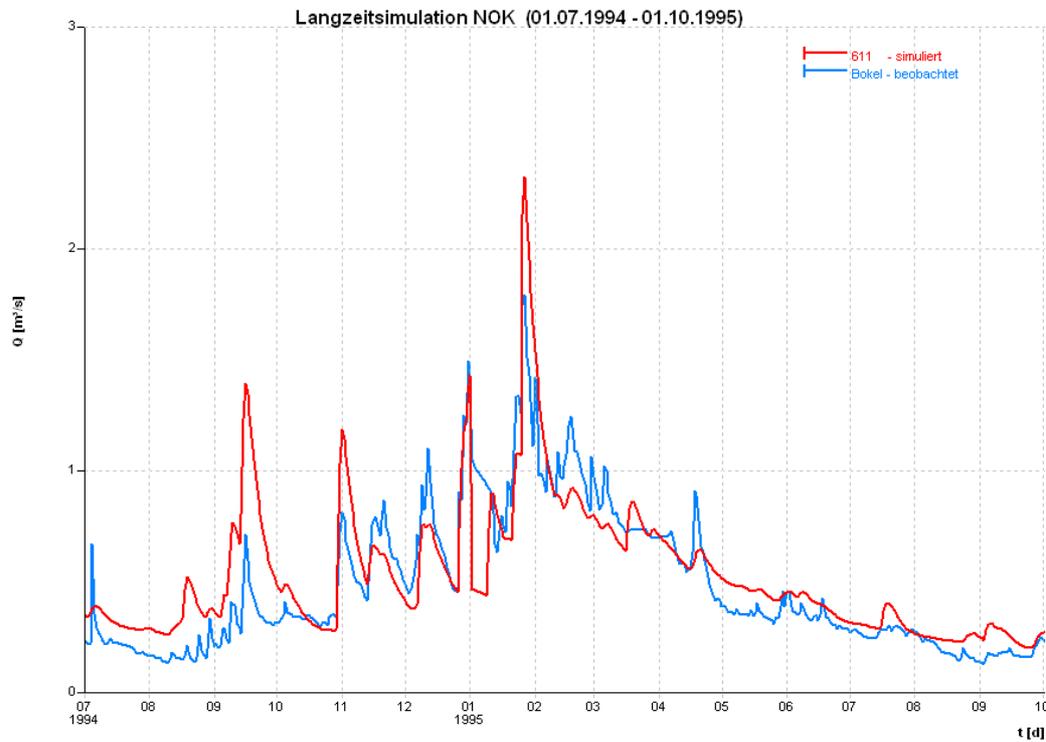


Abbildung 98: Kalibrierung Abflusspegel Bokel – Hochwasser 1995

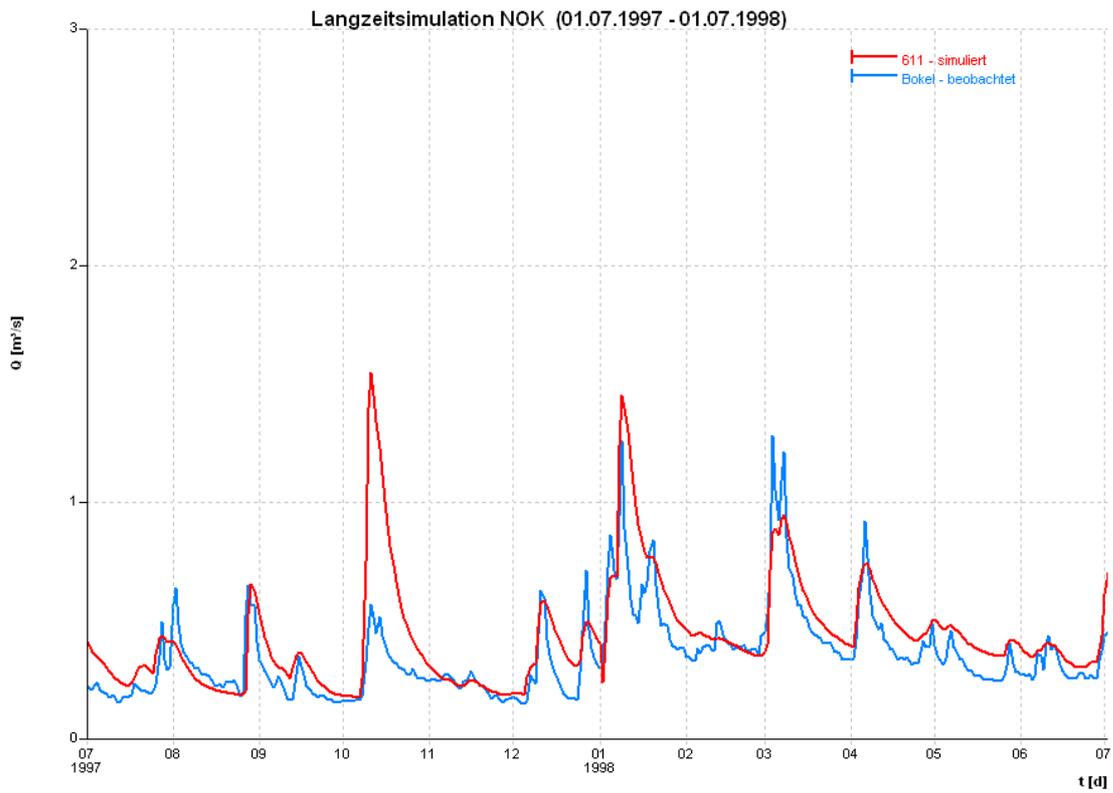


Abbildung 99: Kalibrierung Abflusspegel Bokel – Hochwasser 1998

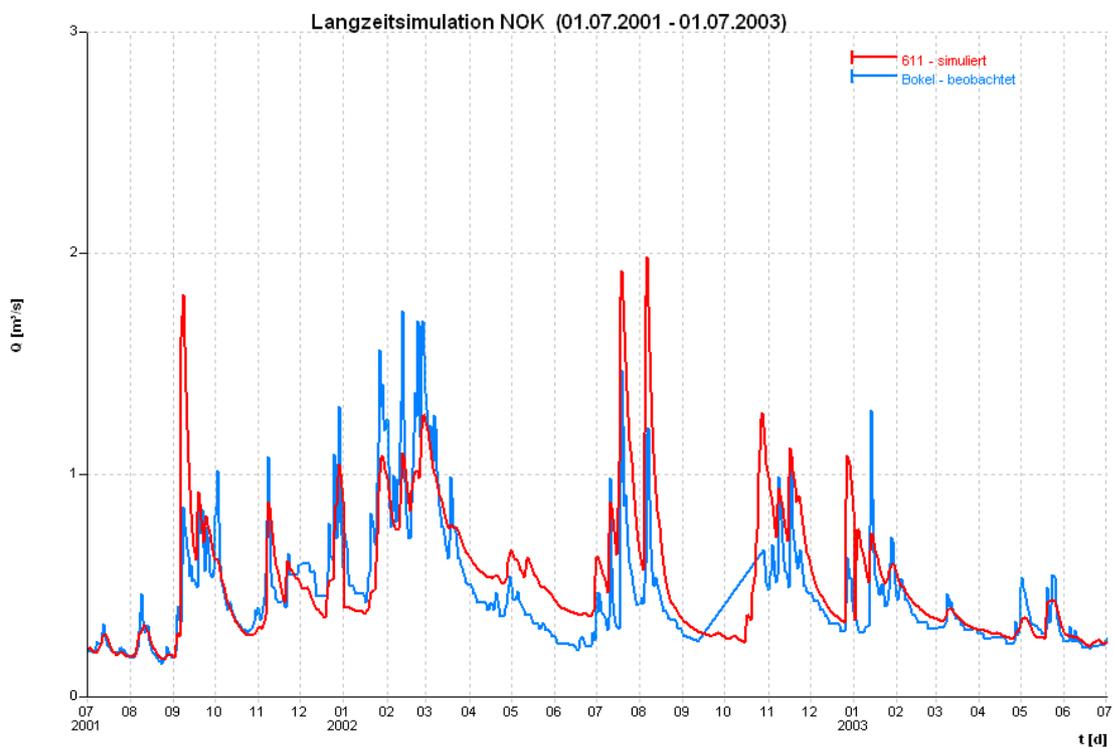


Abbildung 100: Kalibrierung Abflusspegel Bokel – Hochwasser 2002

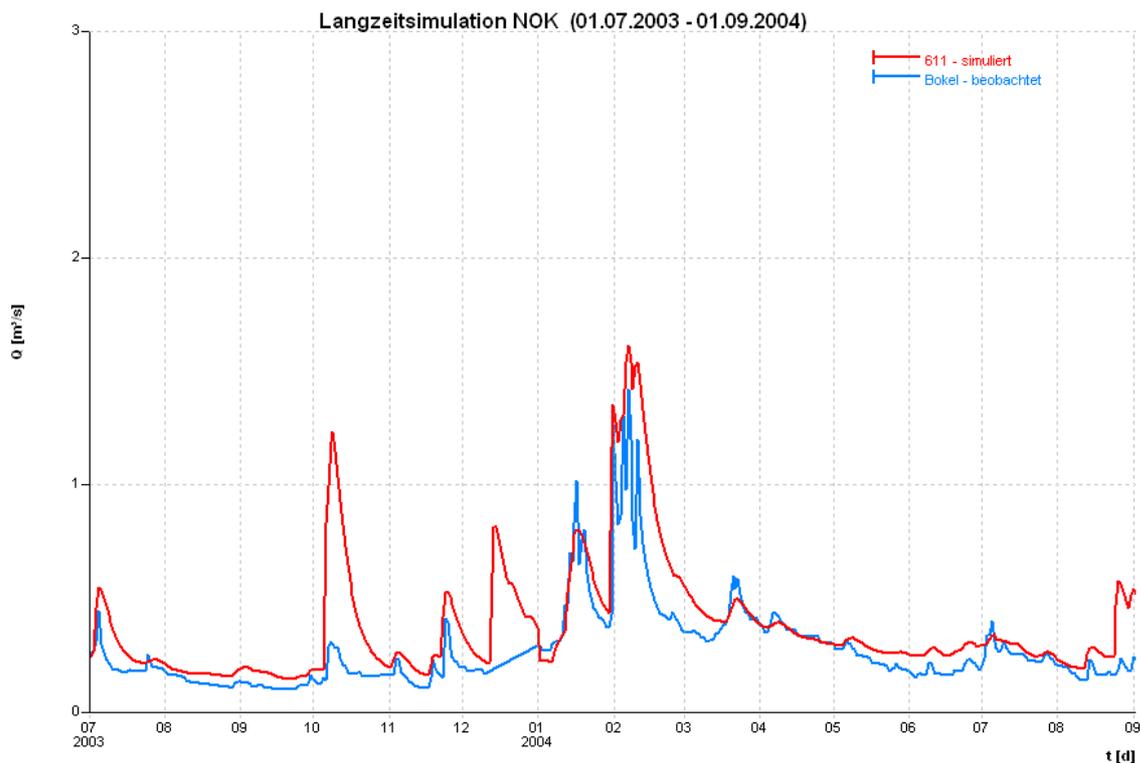


Abbildung 101: Kalibrierung Abflusspegel Bokel – Hochwasser 2004

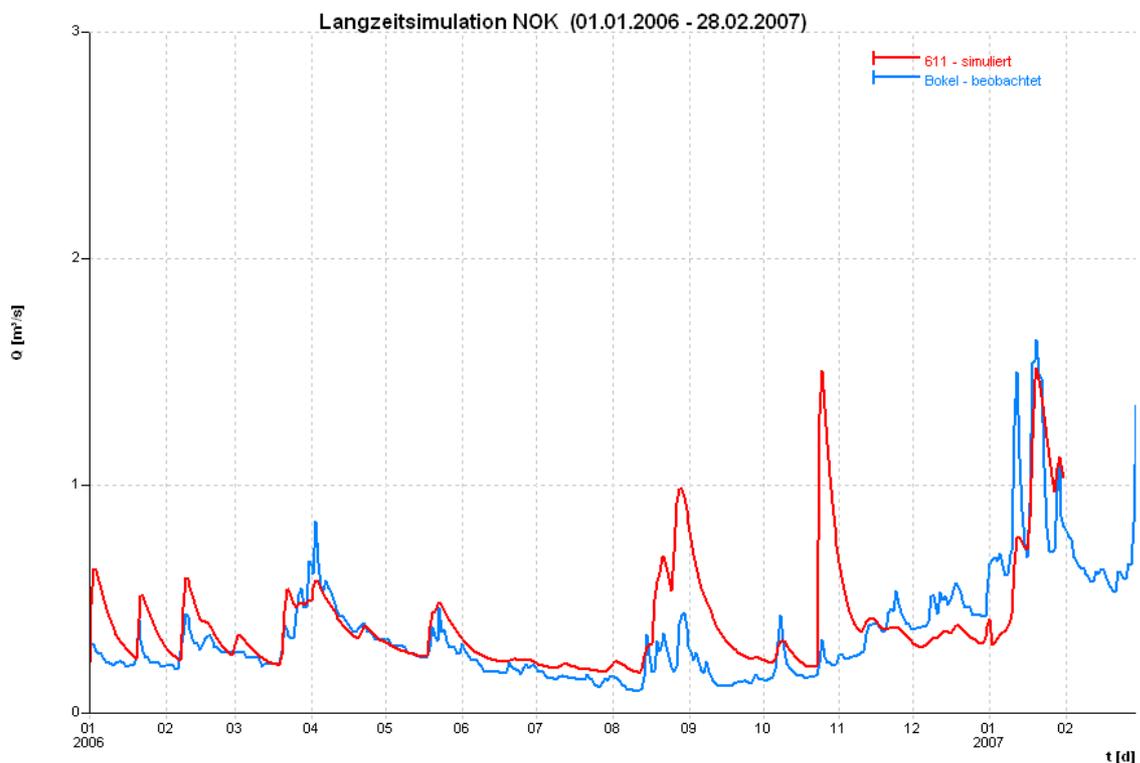


Abbildung 102: Kalibrierung Abflusspegel Bokel – Hochwasser 2007 (Kyrill)

**C10 Pegel Brammer (Jevenau)**

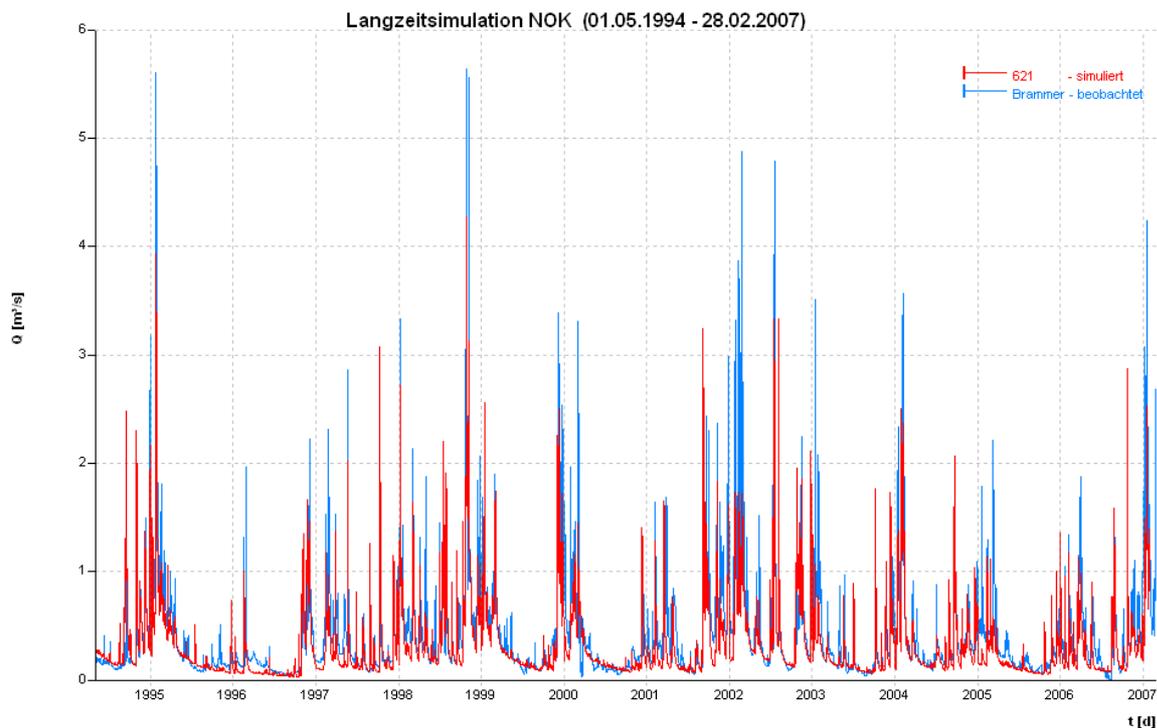


Abbildung 103: Kalibrierung Abflusspegel Brammer – Übersicht

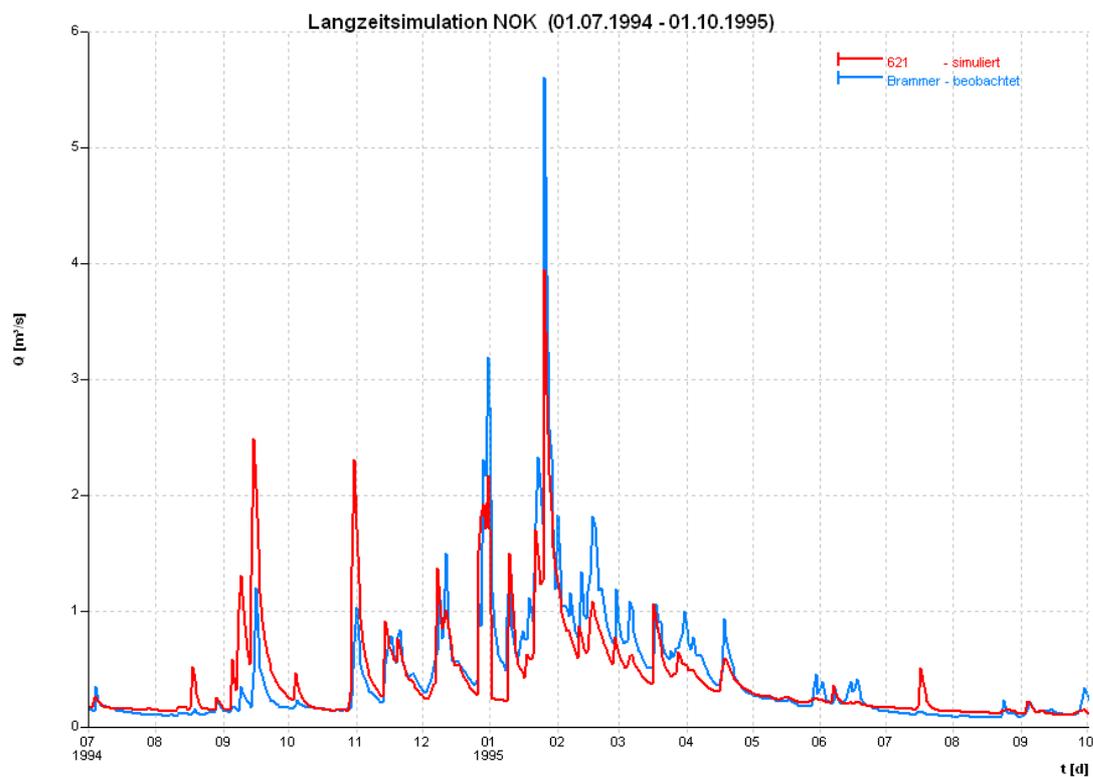


Abbildung 104: Kalibrierung Abflusspegel Brammer – Hochwasser 1995

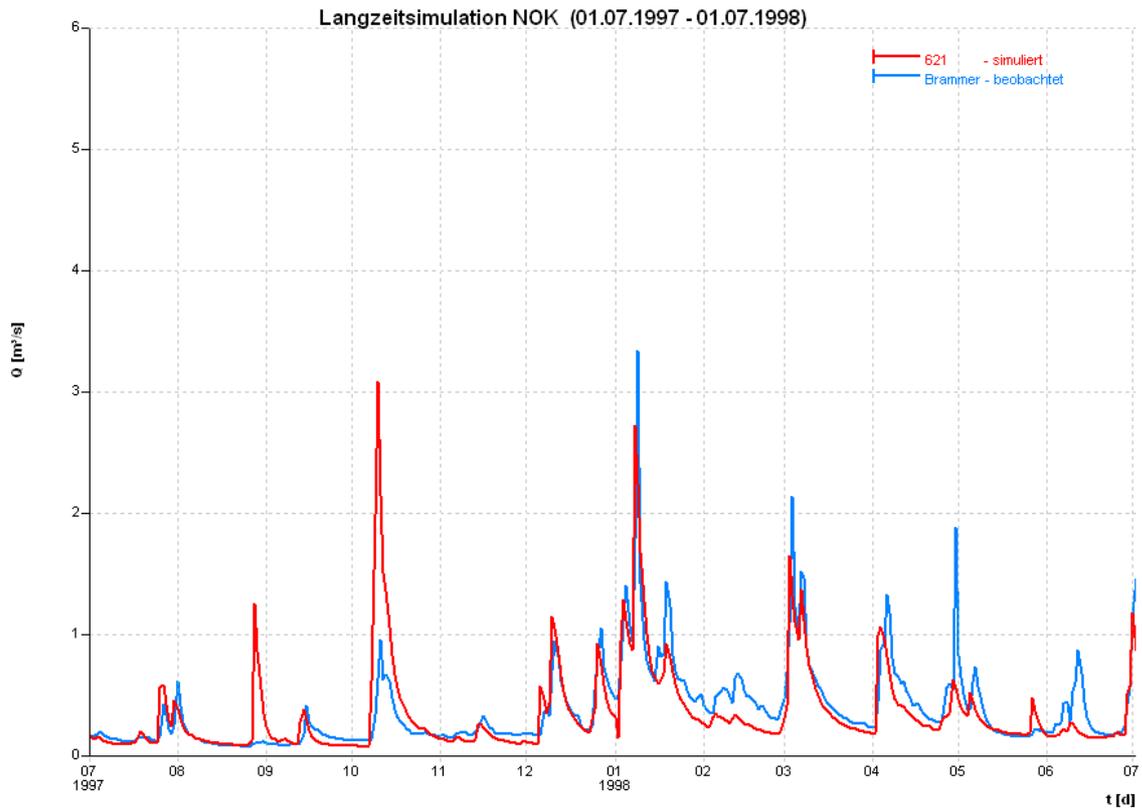


Abbildung 105: Kalibrierung Abflusspegel Brammer – Hochwasser 1998

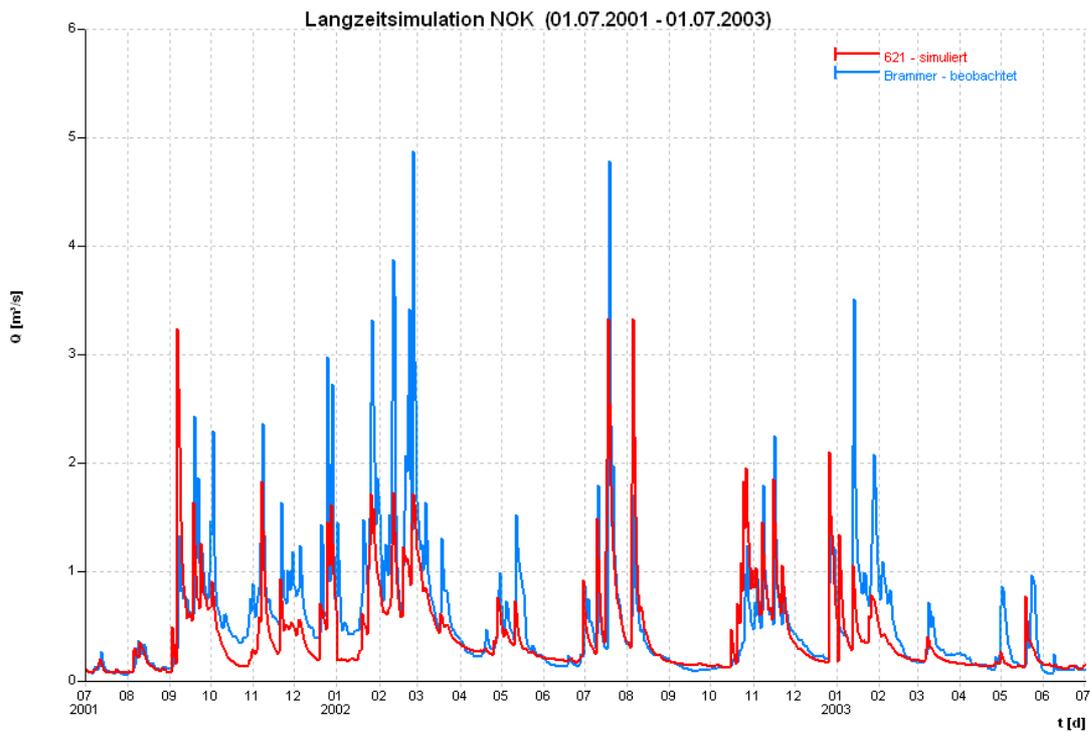


Abbildung 106: Kalibrierung Abflusspegel Brammer – Hochwasser 2002

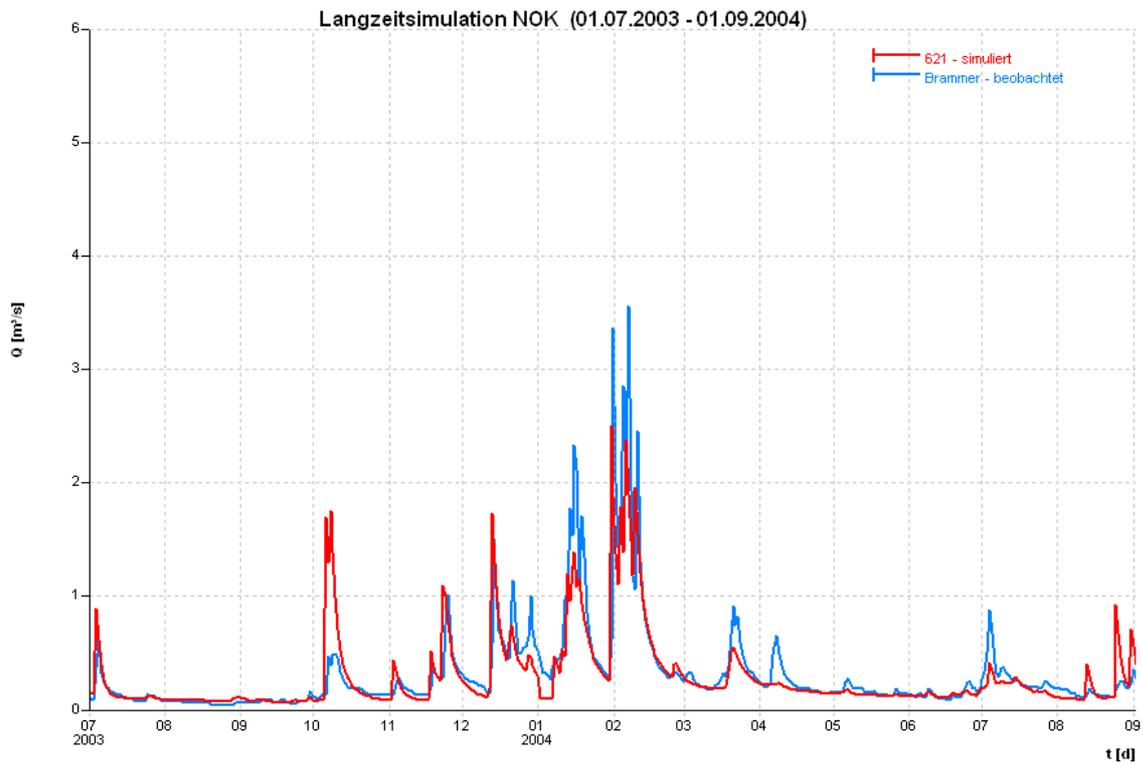


Abbildung 107: Kalibrierung Abflusspegel Brammer – Hochwasser 2004

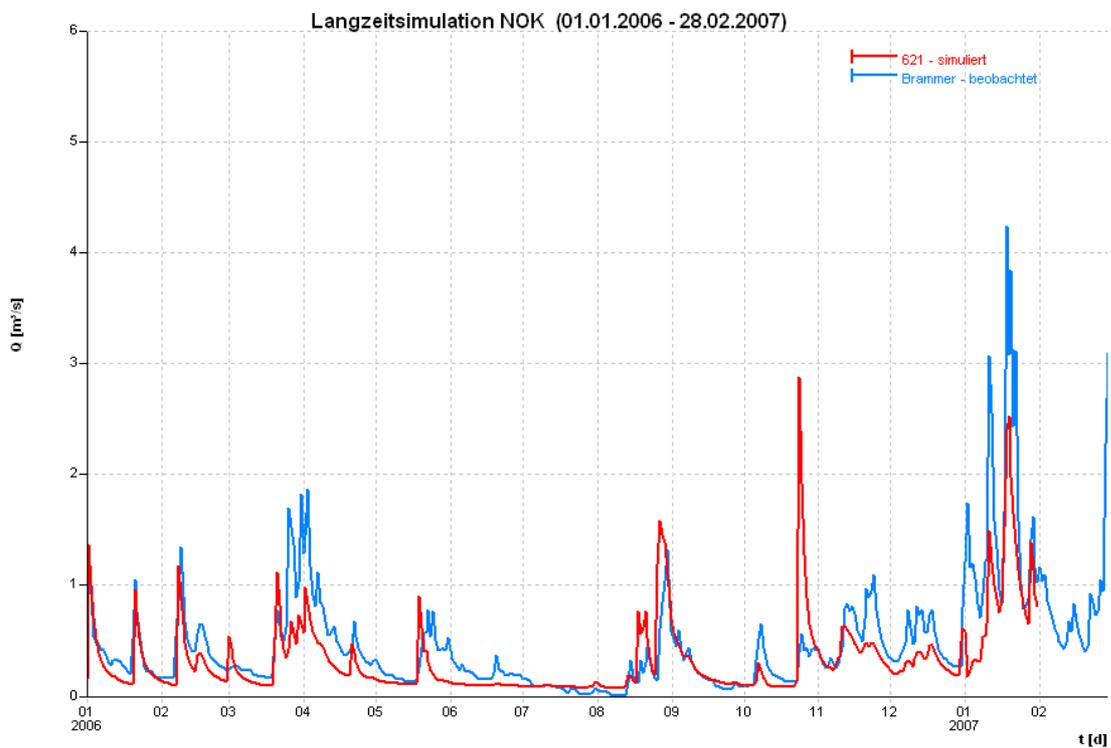


Abbildung 108: Kalibrierung Abflusspegel Brammer – Hochwasser 2007 (Kyrill)

### C11 Pegel Jevenstedt (Jevenau)

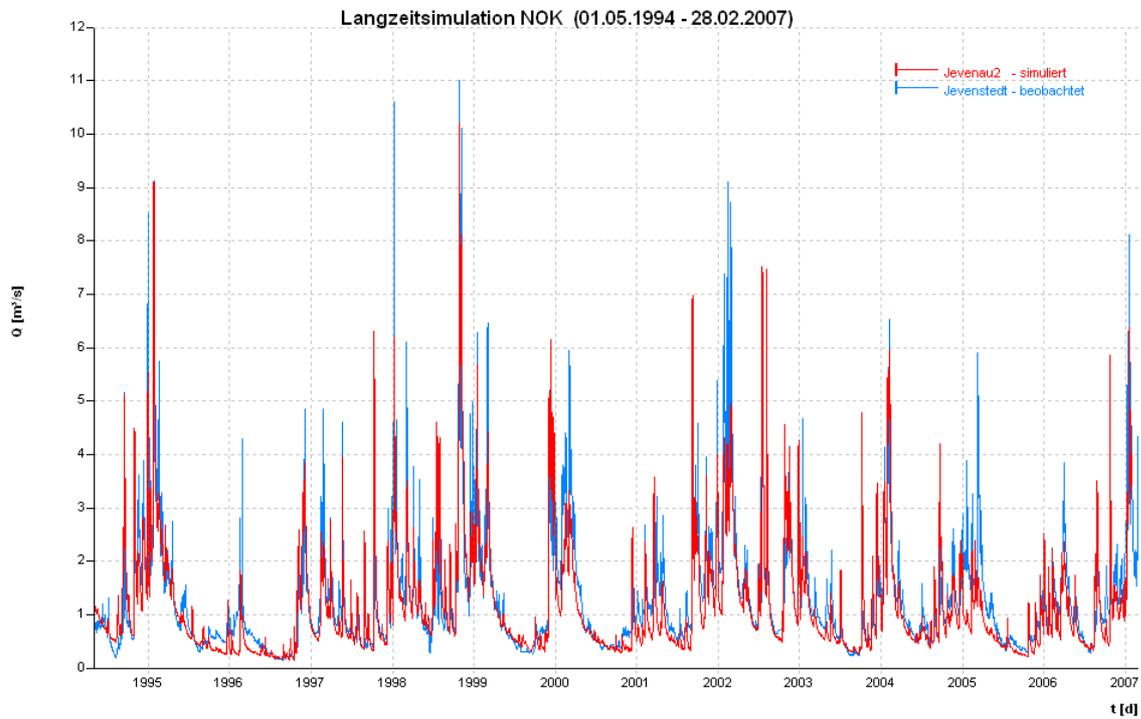


Abbildung 109: Kalibrierung Abflusspegel Jevenstedt – Übersicht

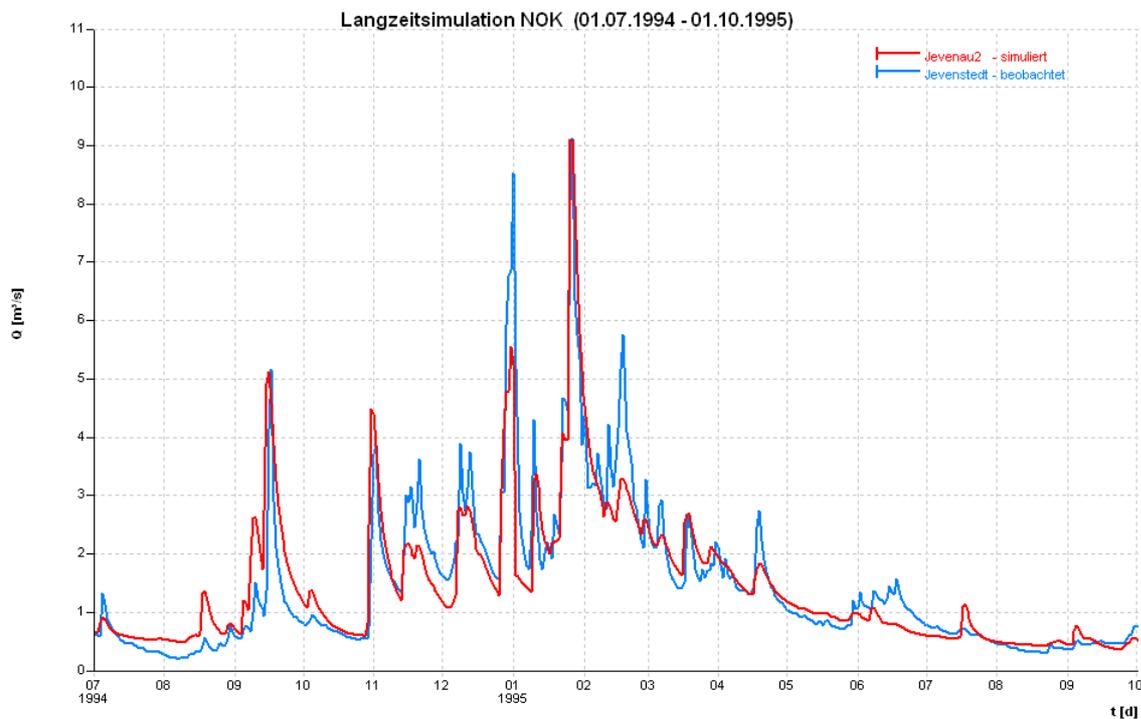


Abbildung 110: Kalibrierung Abflusspegel Jevenstedt – Hochwasser 1995

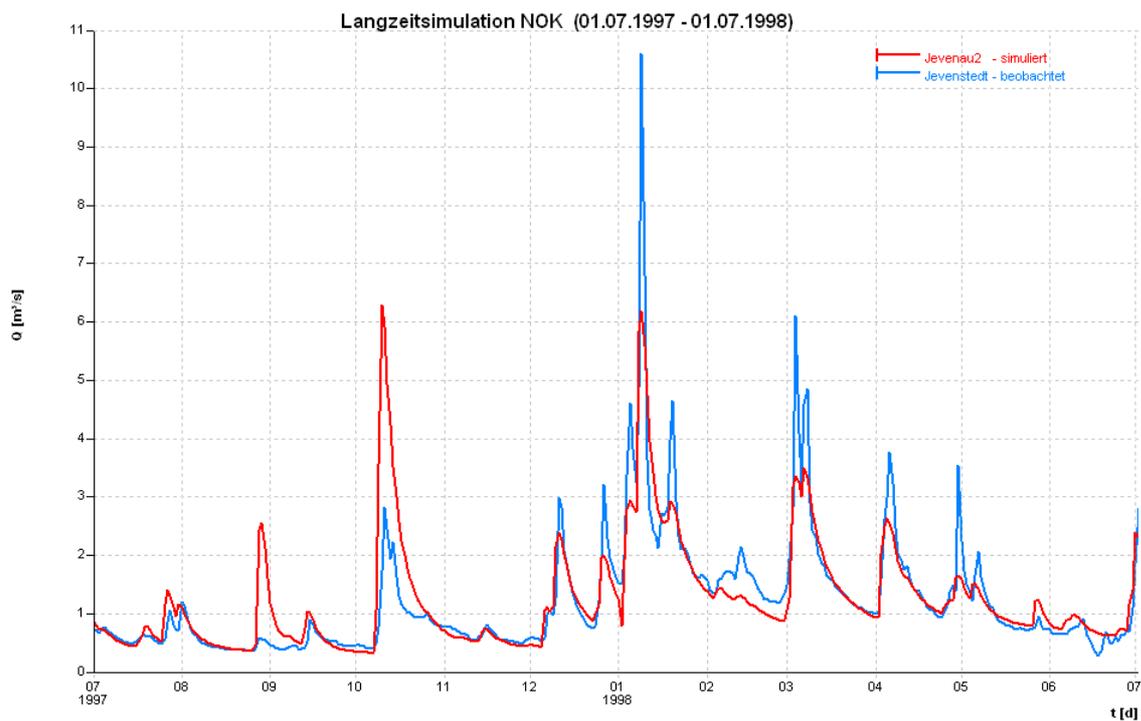


Abbildung 111: Kalibrierung Abflusspegel Jevenstedt – Hochwasser 1998

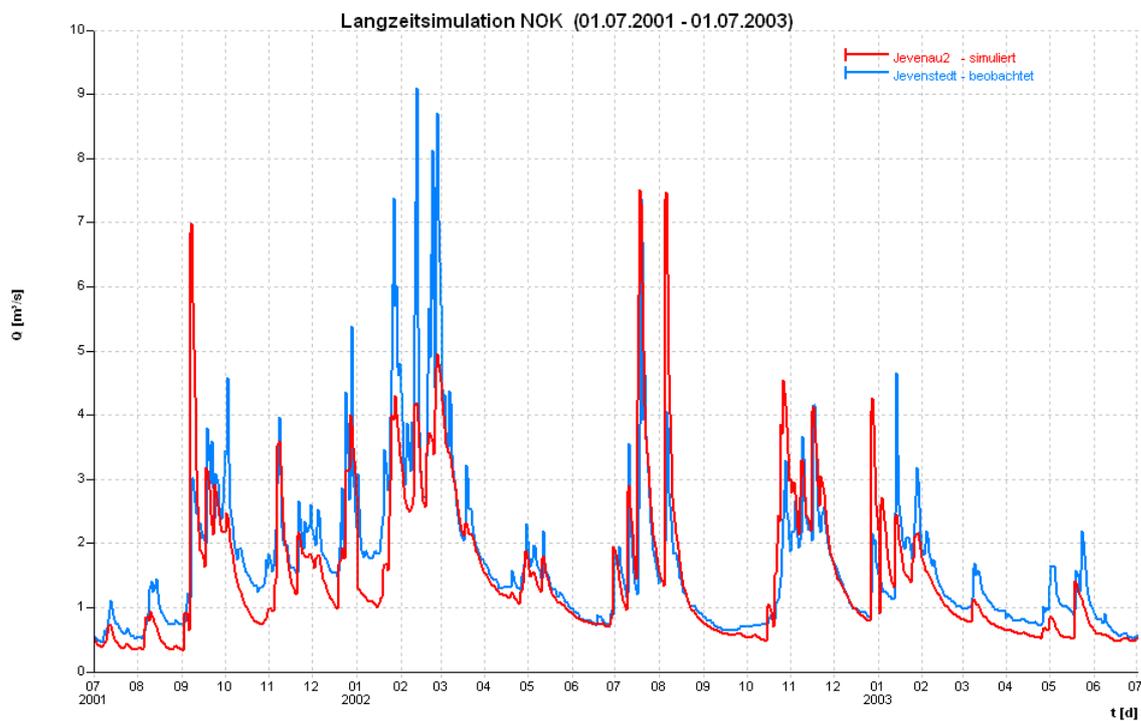


Abbildung 112: Kalibrierung Abflusspegel Jevenstedt – Hochwasser 2002

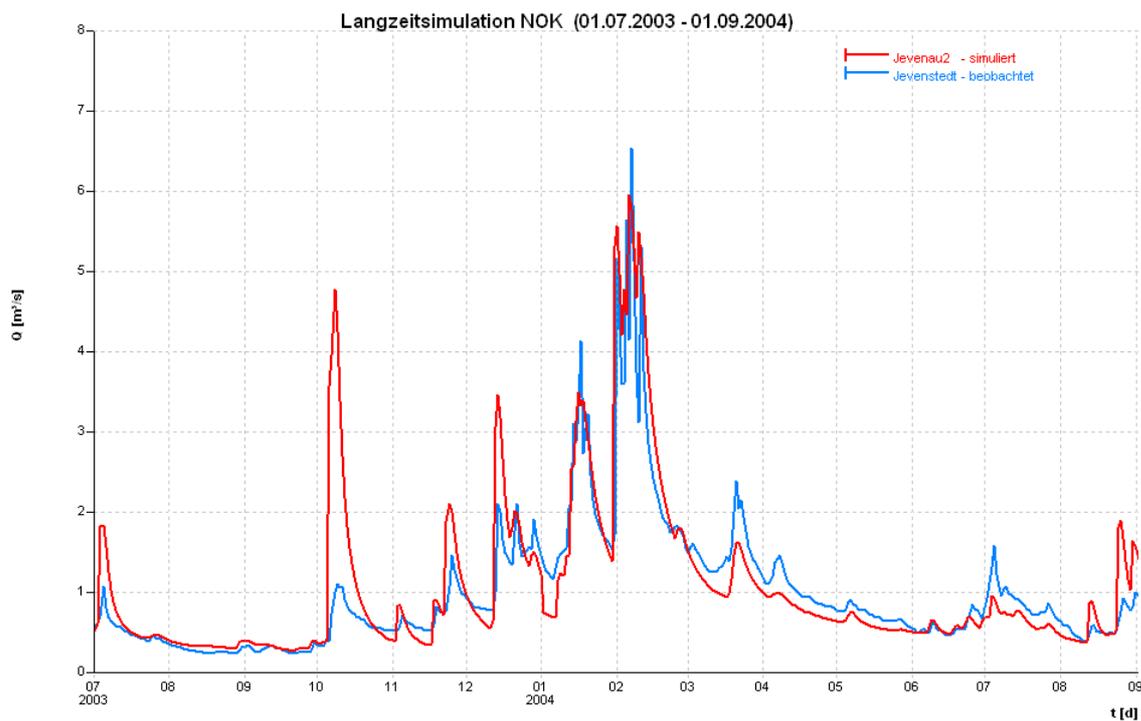


Abbildung 113: Kalibrierung Abflusspegel Jevenstedt – Hochwasser 2004

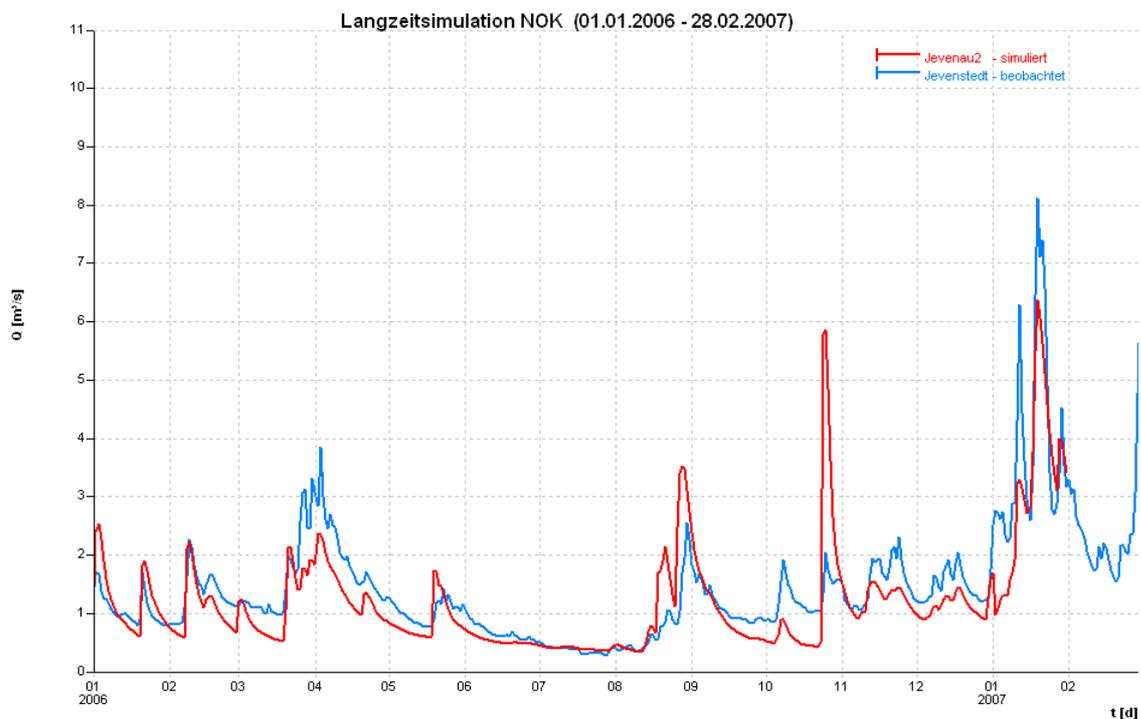


Abbildung 114: Kalibrierung Abflusspegel Jevenstedt – Hochwasser 2007 (Kyrill)

**C12 Pegel Papenau oben (Haalerau)**

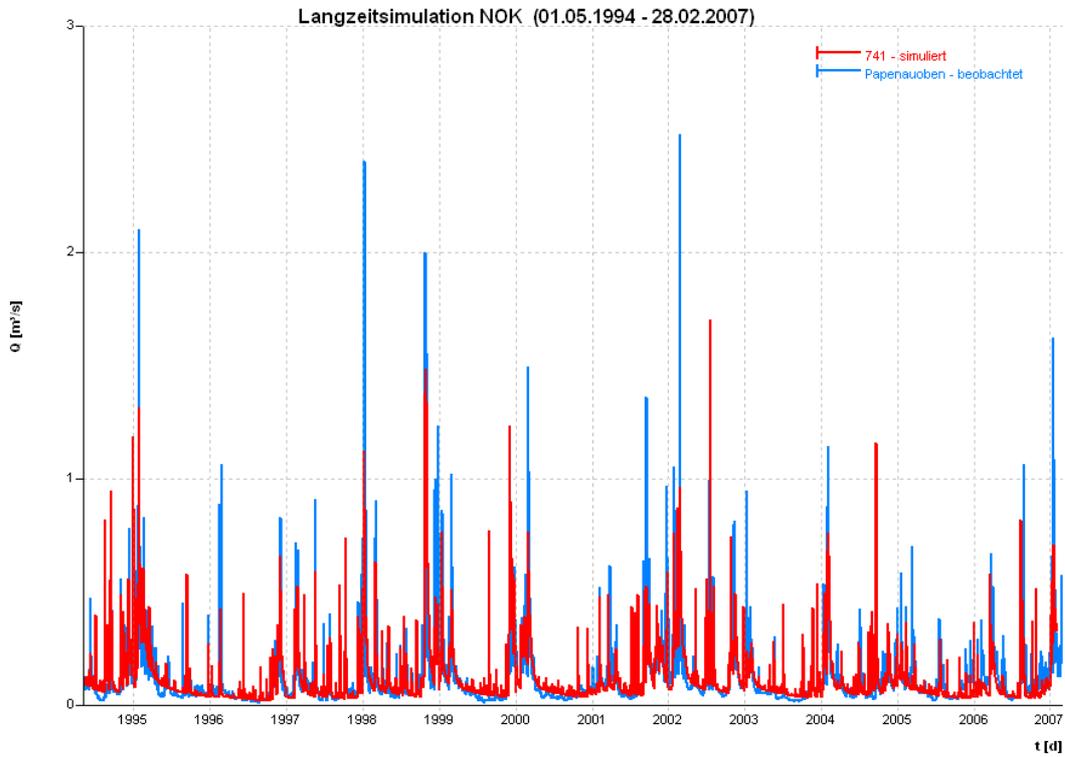


Abbildung 115: Kalibrierung Abflusspegel Papenau oben – Übersicht

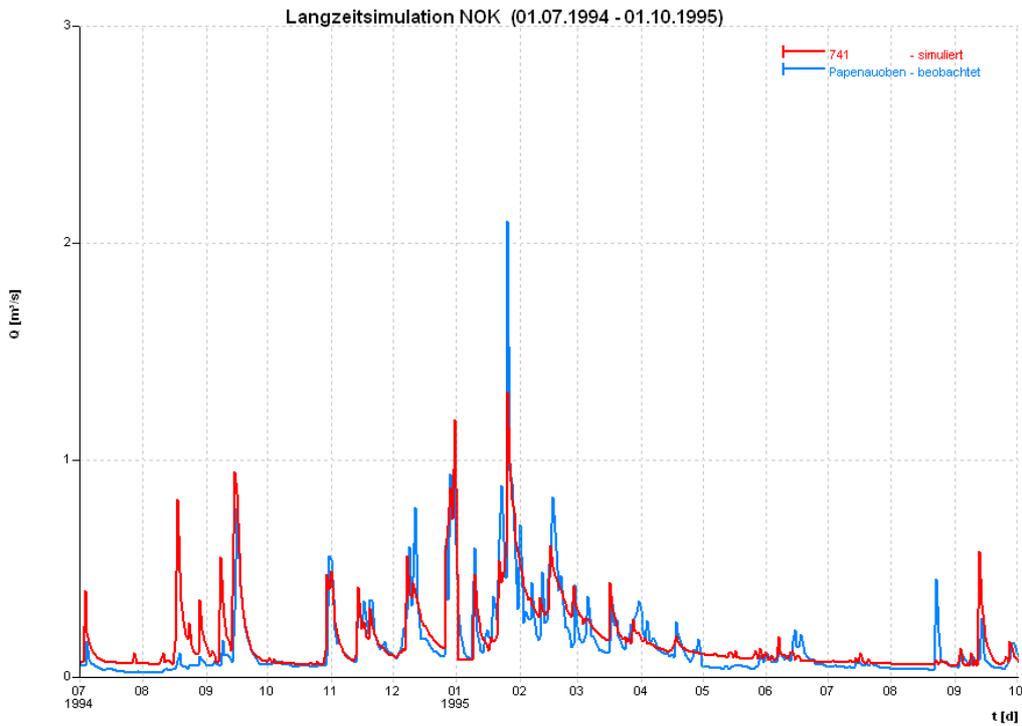


Abbildung 116: Kalibrierung Abflusspegel Papenau oben – Hochwasser 1995

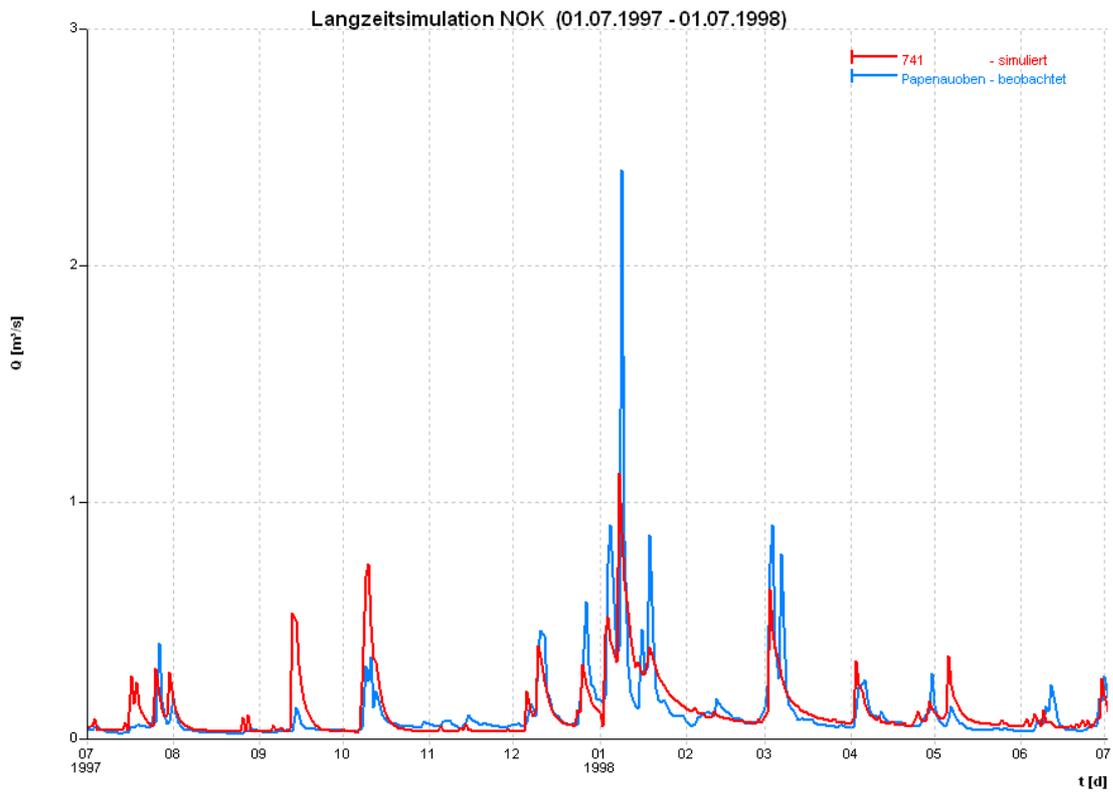


Abbildung 117: Kalibrierung Abflusspegel Papenau oben – Hochwasser 1998

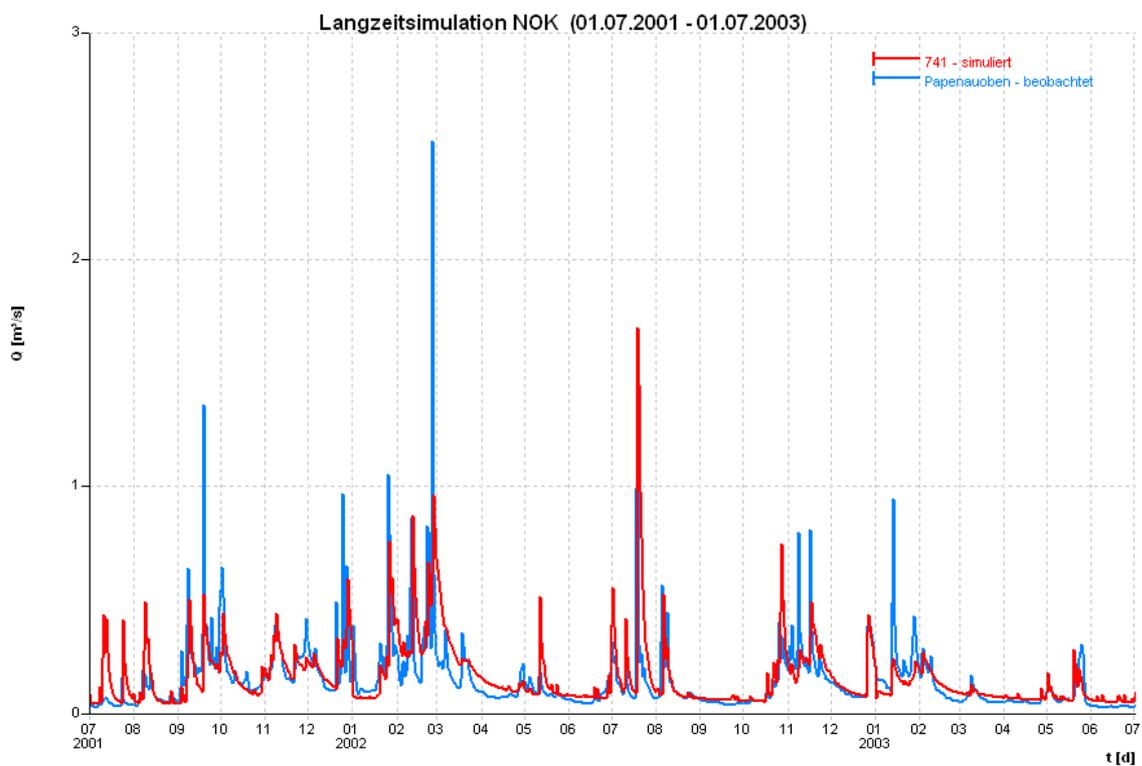


Abbildung 118: Kalibrierung Abflusspegel Papenau oben – Hochwasser 2002

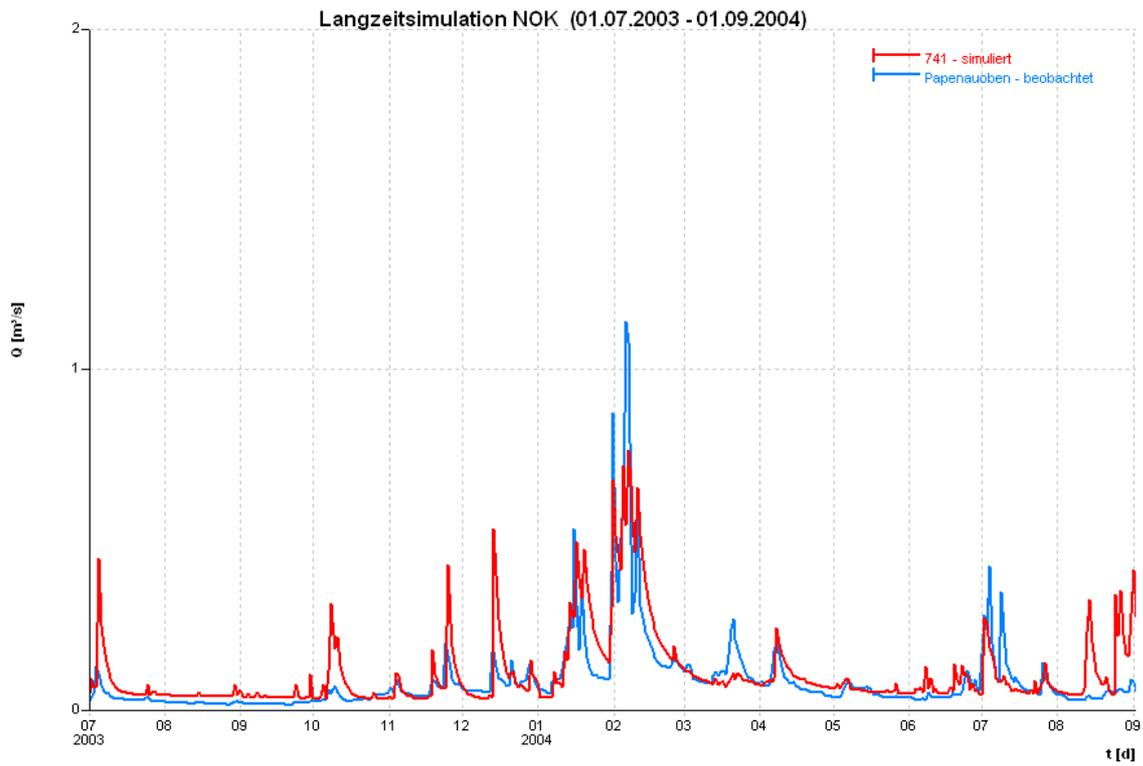


Abbildung 119: Kalibrierung Abflusspegel Papenau oben – Hochwasser 2004

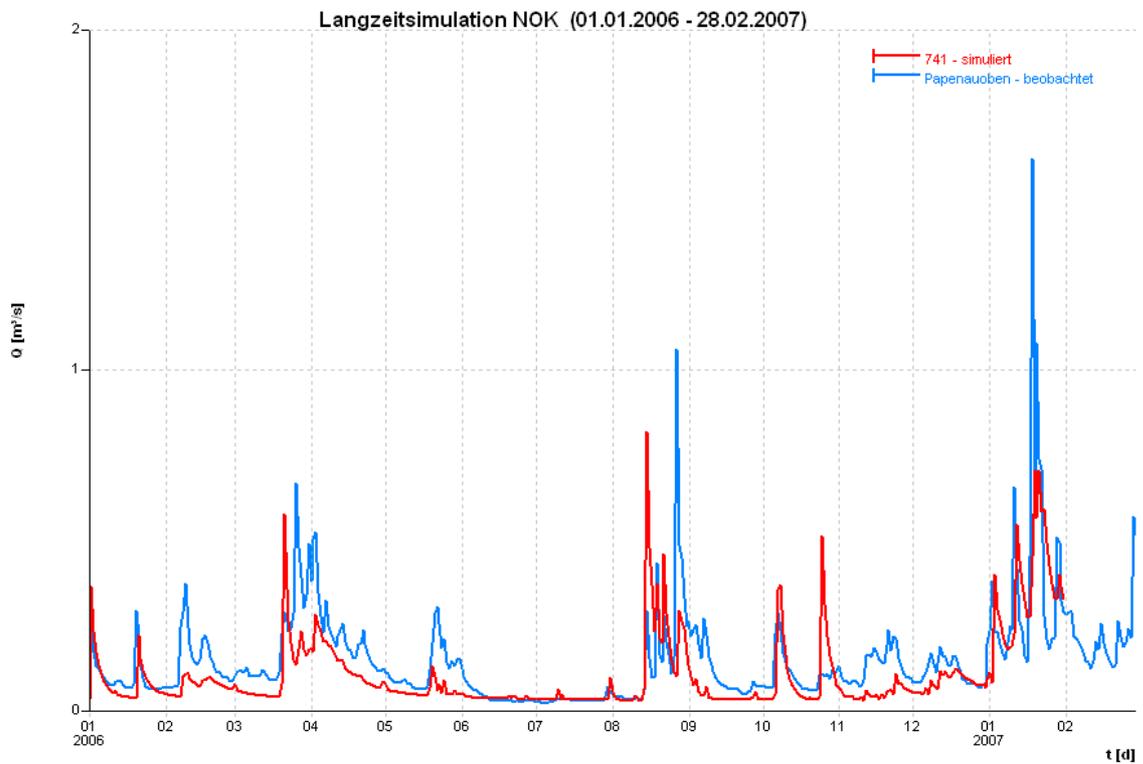


Abbildung 120: Kalibrierung Abflusspegel Papenau oben – Hochwasser 2007 (Kyrill)

### C13 Pegel Todenbüttel (Haalerau)

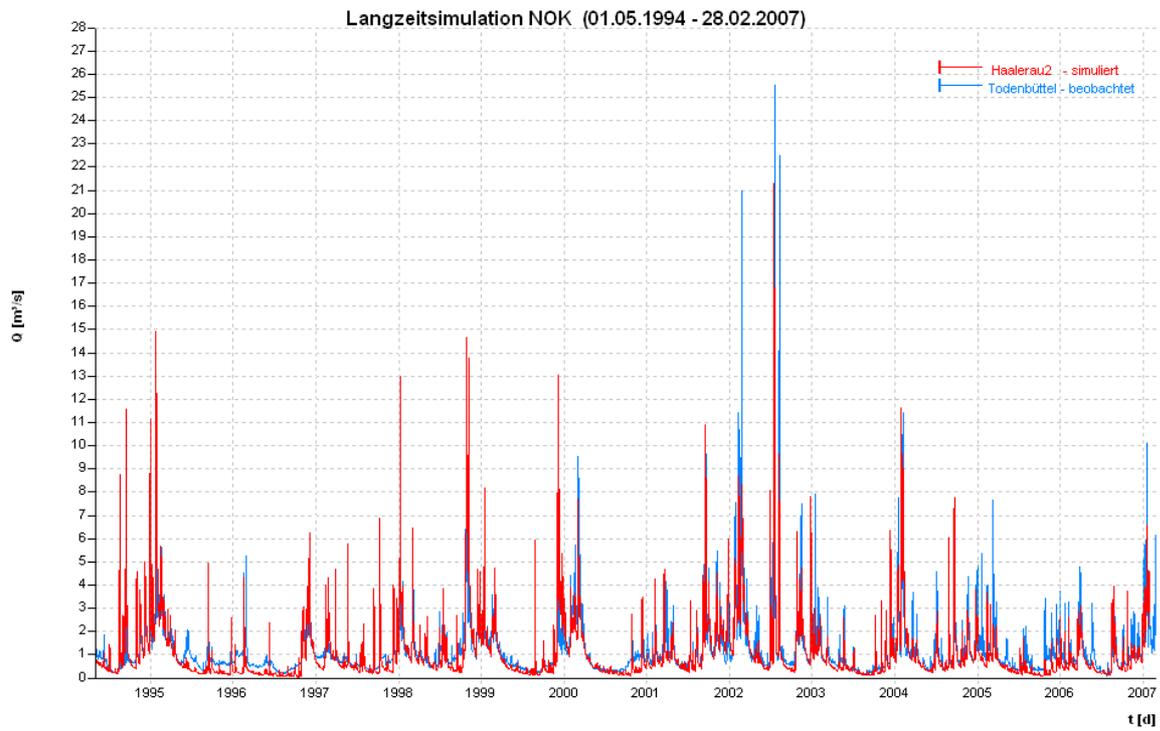


Abbildung 121: Kalibrierung Abflusspegel Todenbüttel – Übersicht

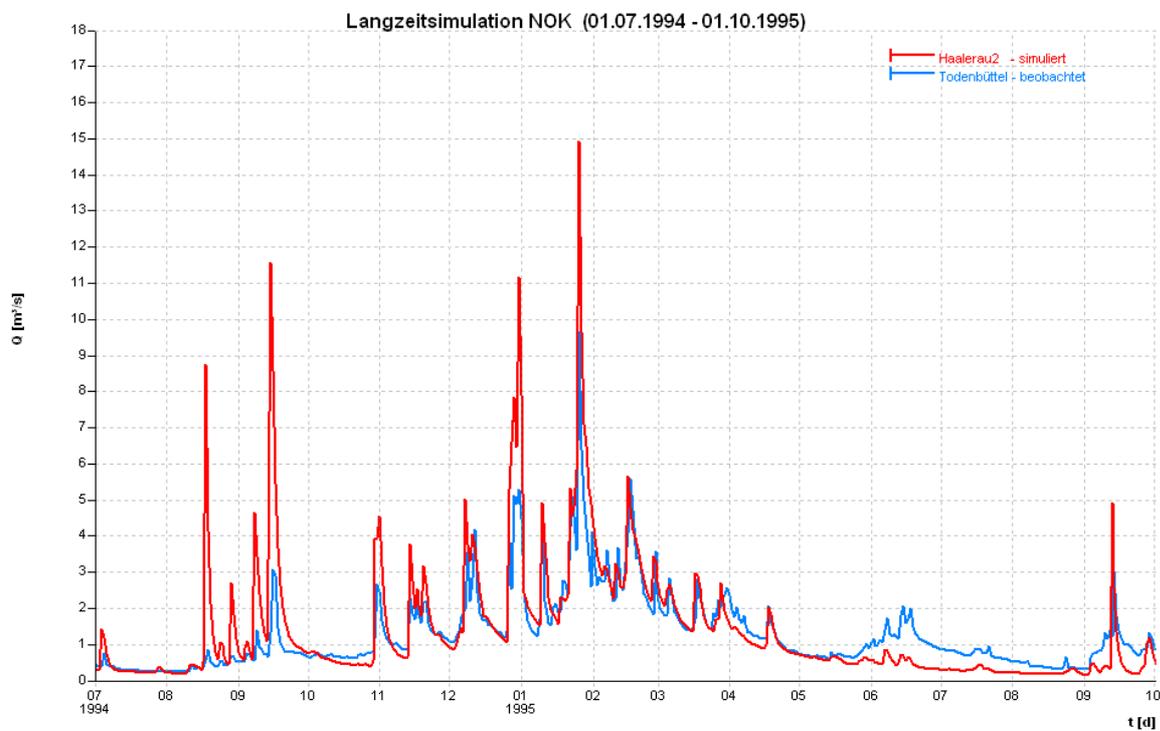


Abbildung 122: Kalibrierung Abflusspegel Todenbüttel – Hochwasser 1995

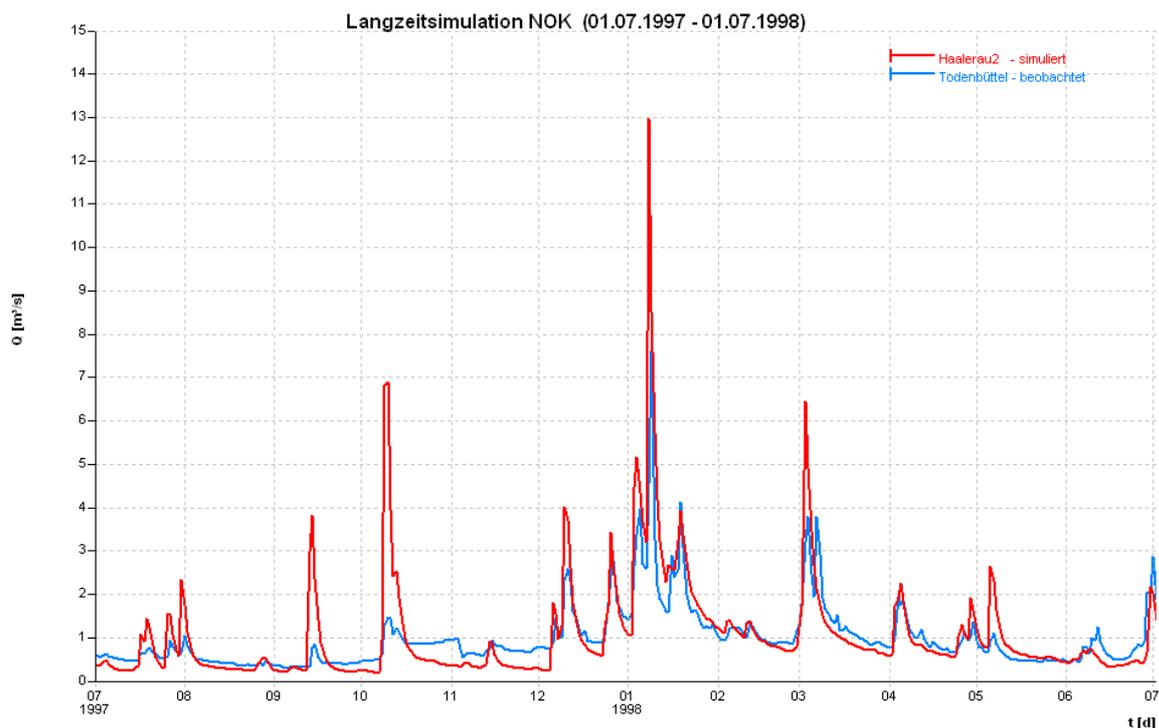


Abbildung 123: Kalibrierung Abflusspegel Todenbüttel – Hochwasser 1998

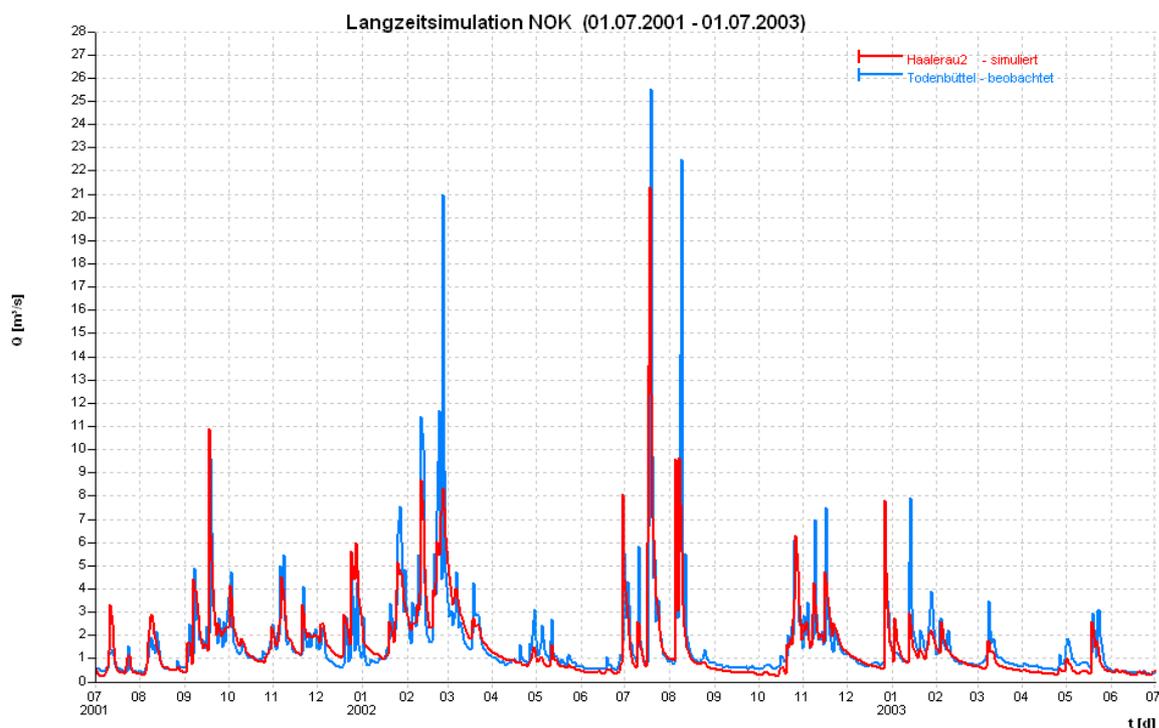


Abbildung 124: Kalibrierung Abflusspegel Todenbüttel – Hochwasser 2002

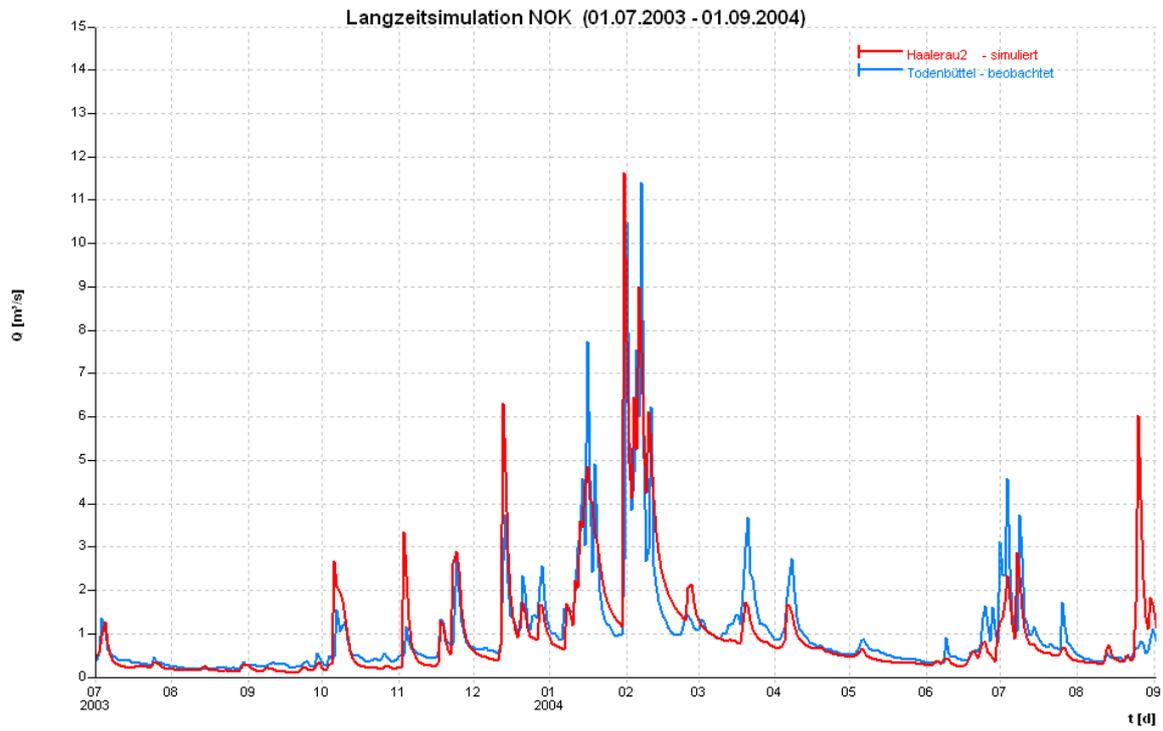


Abbildung 125: Kalibrierung Abflusspegel Todenbüttel – Hochwasser 2004

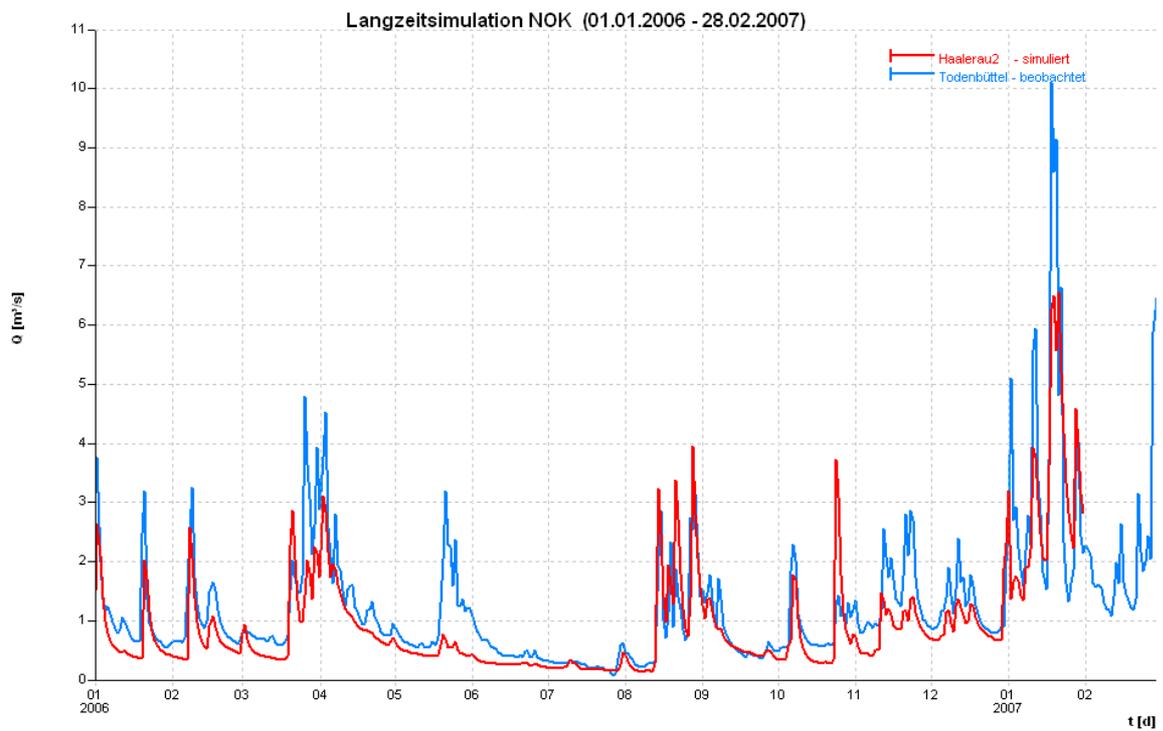


Abbildung 126: Kalibrierung Abflusspegel Todenbüttel – Hochwasser 2007 (Kyrill)

### C14 Pegel Wennbüttel

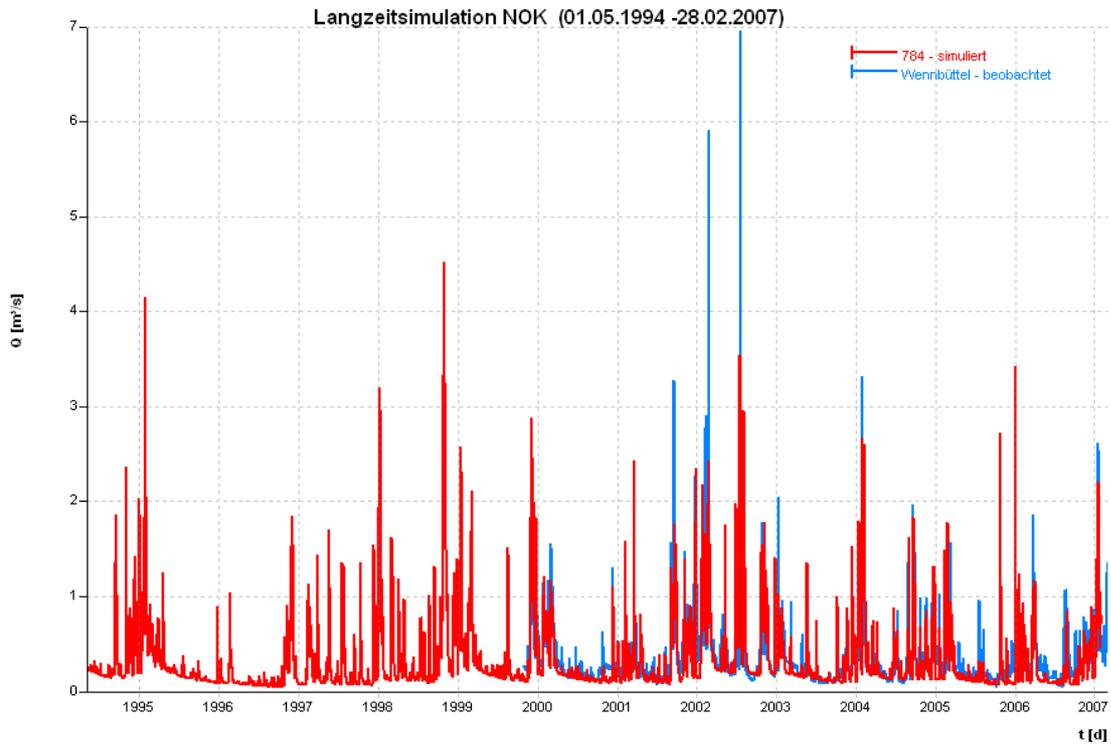


Abbildung 127: Kalibrierung Abflusspegel Wennbüttel – Übersicht

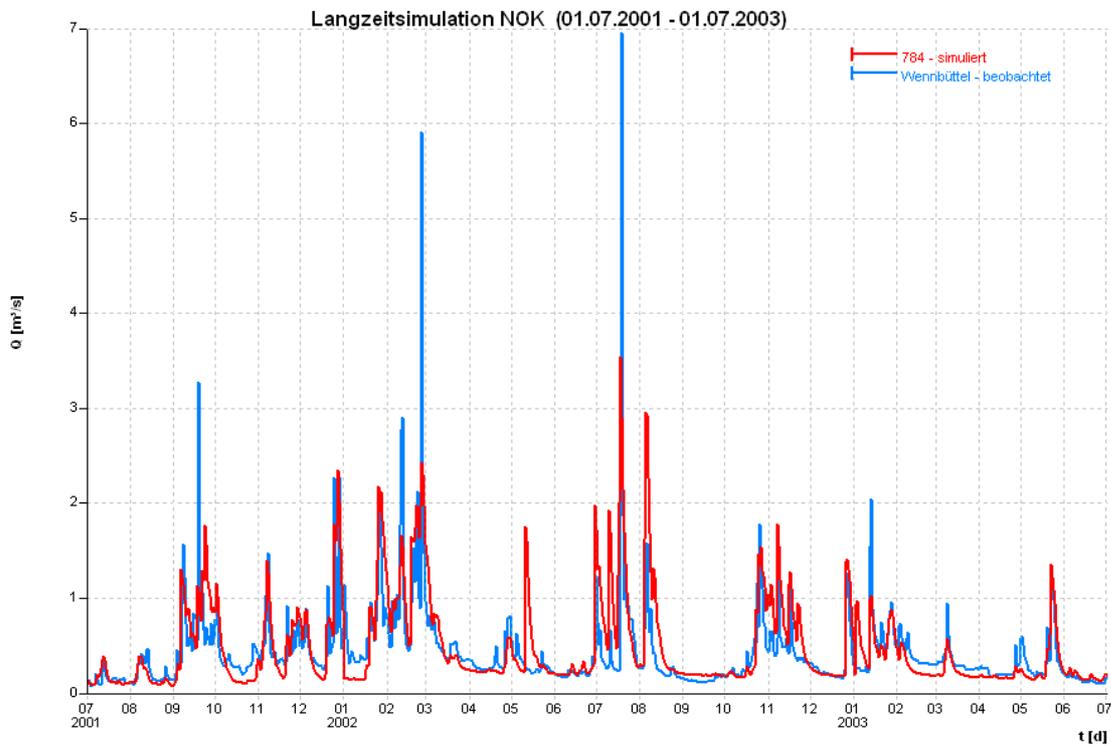


Abbildung 128: Kalibrierung Abflusspegel Wennbüttel – Hochwasser 2002

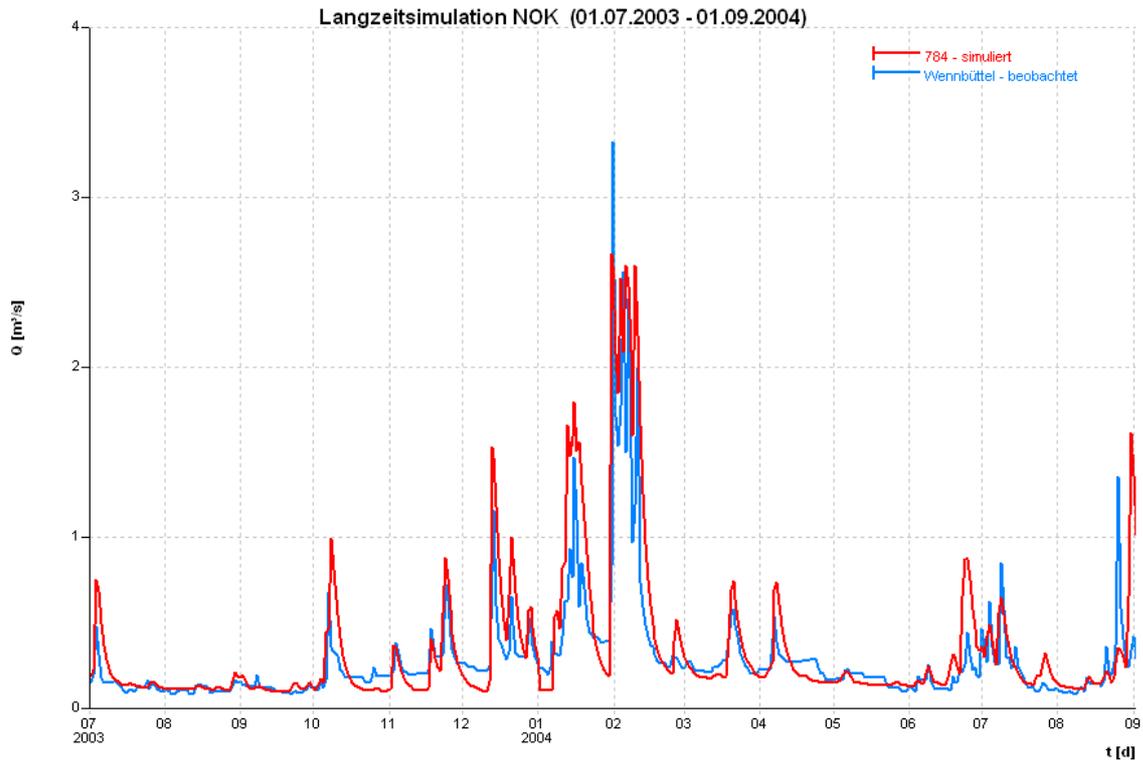


Abbildung 129: Kalibrierung Abflusspegel Wennbüttel – Hochwasser 2004

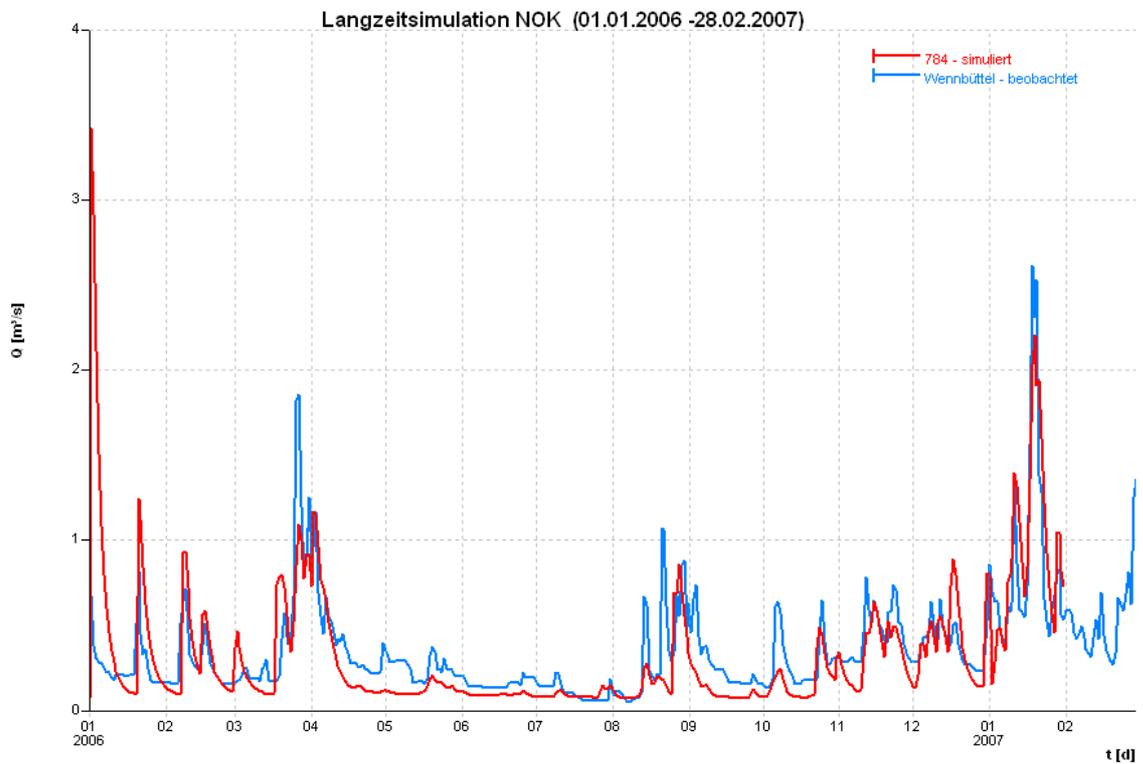


Abbildung 130: Kalibrierung Abflusspegel Wennbüttel – Hochwasser 2007 (Kyrill)

### C15 Pegel Schafstedt

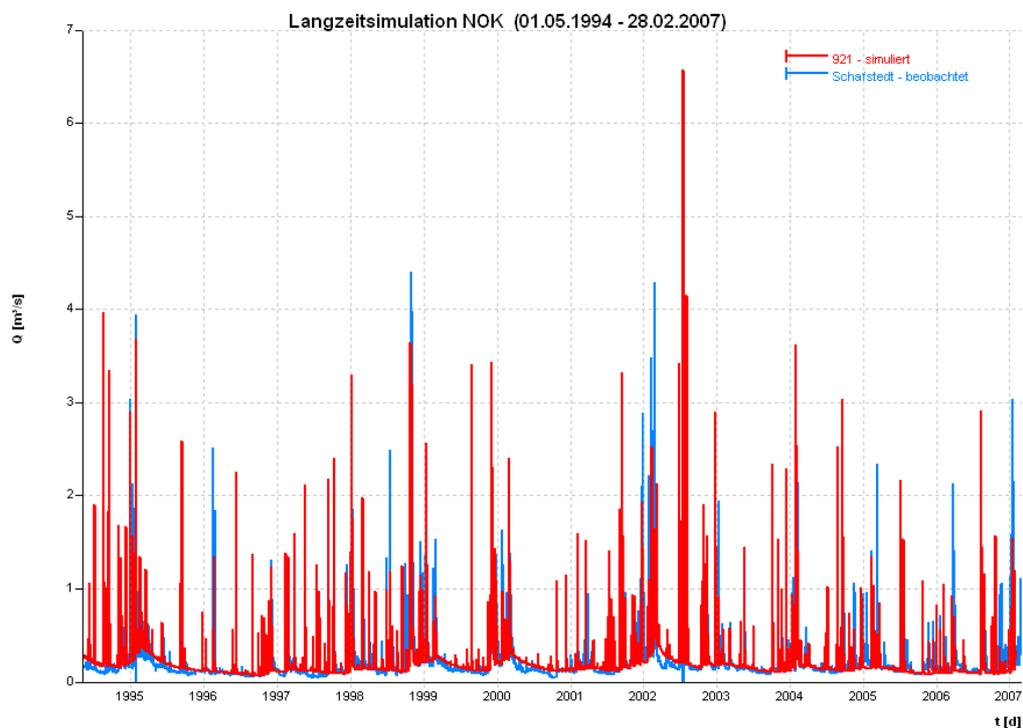


Abbildung 131: Kalibrierung Abflusspegel Schafstedt – Übersicht

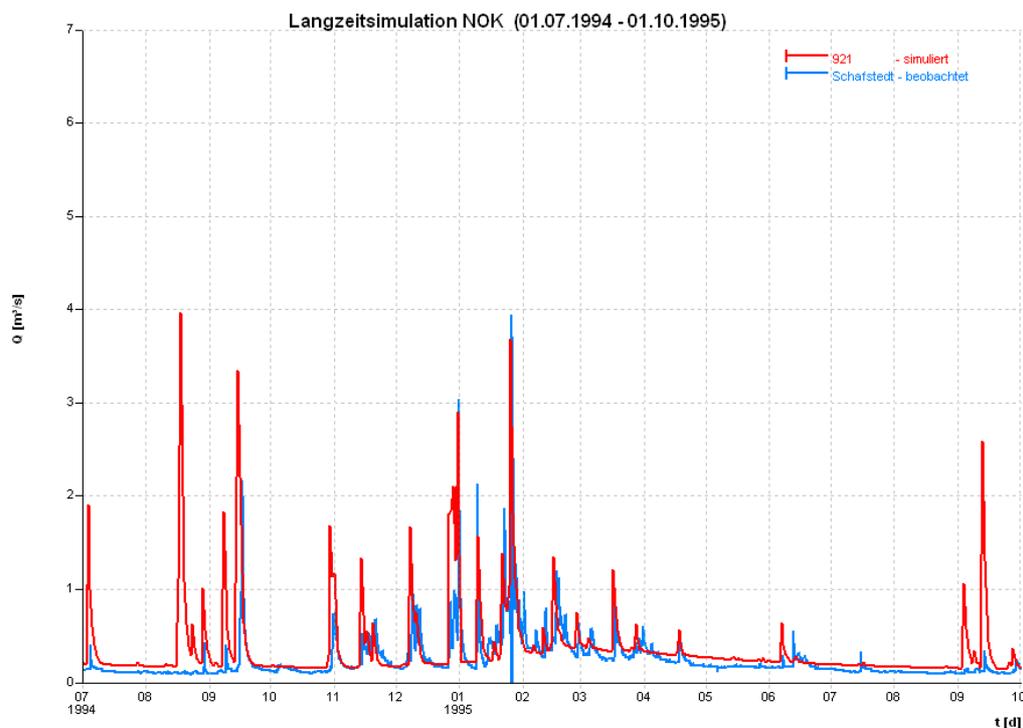


Abbildung 132: Kalibrierung Abflusspegel Schafstedt – Hochwasser 1995

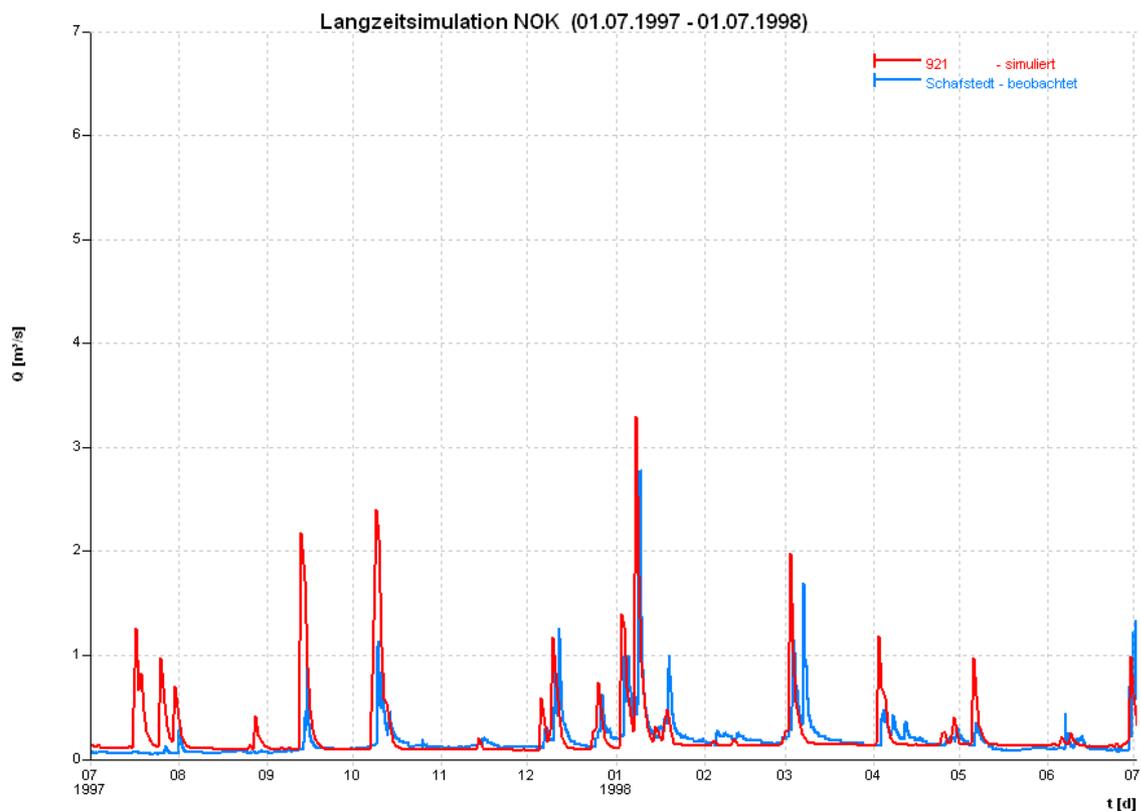


Abbildung 133: Kalibrierung Abflusspegel Schafstedt – Hochwasser 1998

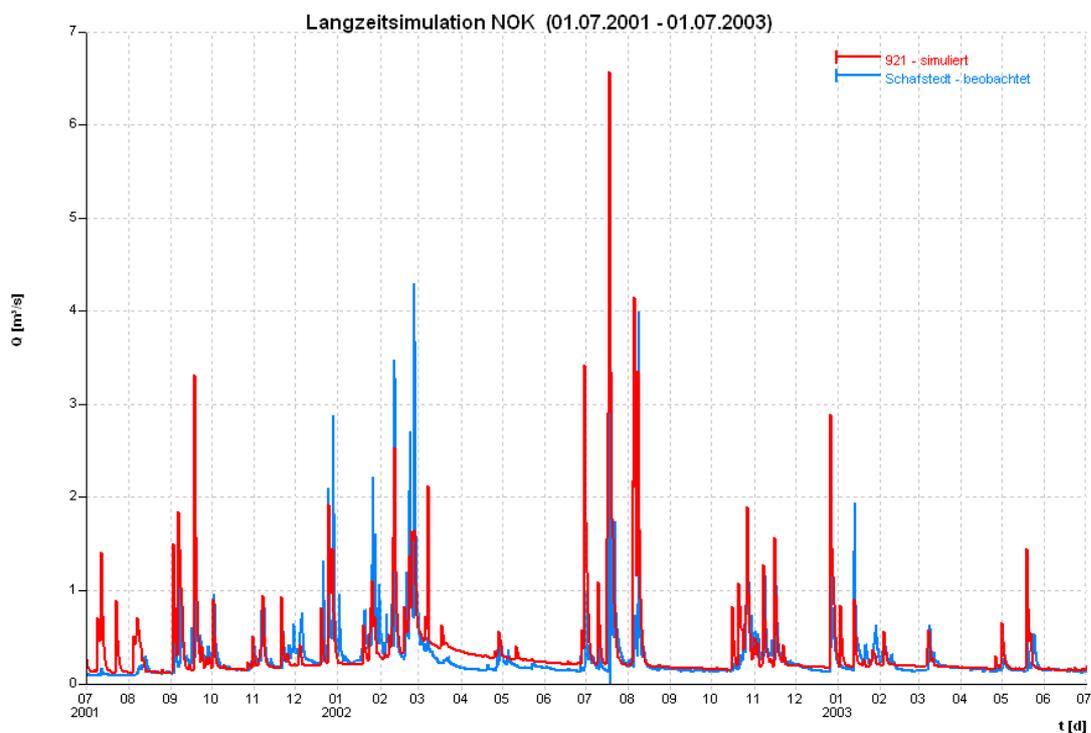


Abbildung 134: Kalibrierung Abflusspegel Schafstedt – Hochwasser 2002

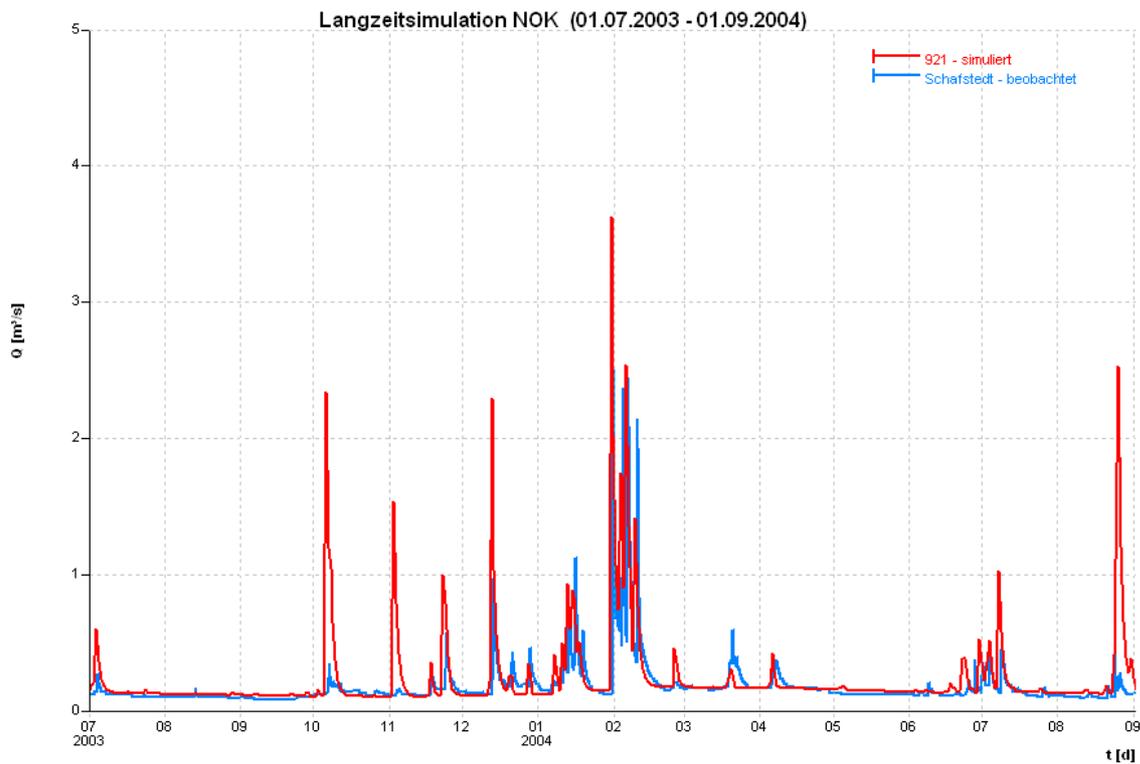


Abbildung 135: Kalibrierung Abflusspegel Schafstedt – Hochwasser 2004

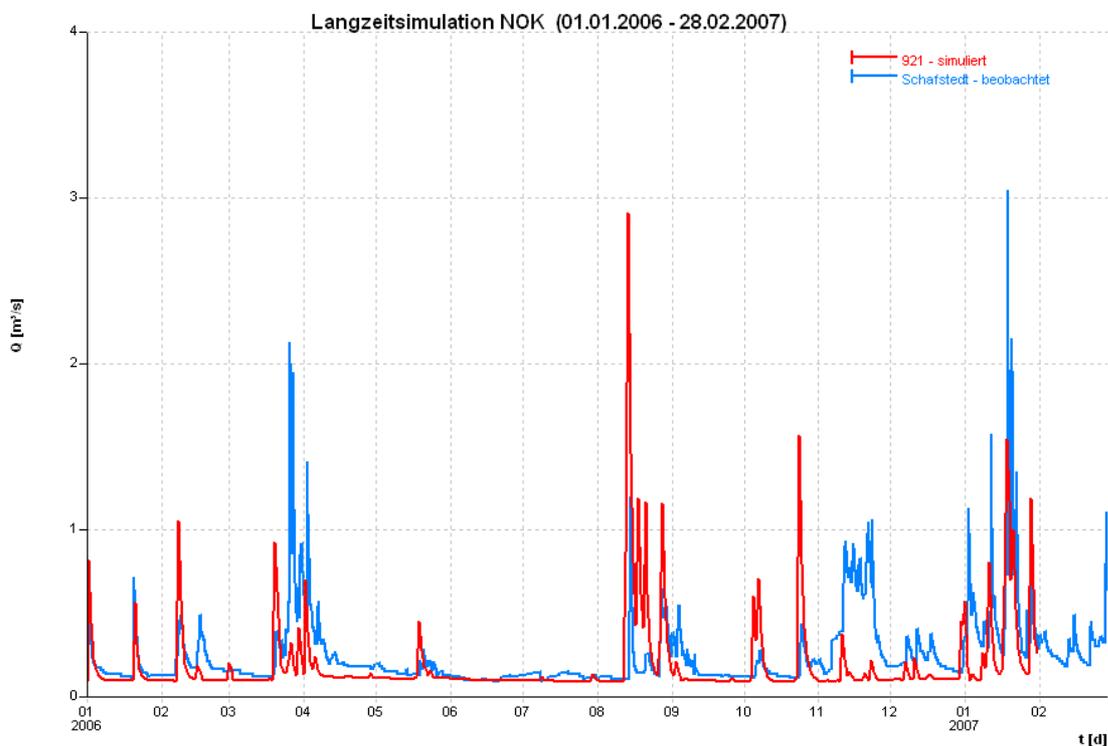


Abbildung 136: Kalibrierung Abflusspegel Schafstedt – Hochwasser 2007 (Kyrill)

## Anhang D Datengrundlage Zuflussprognose

### D1 NOK-Ost

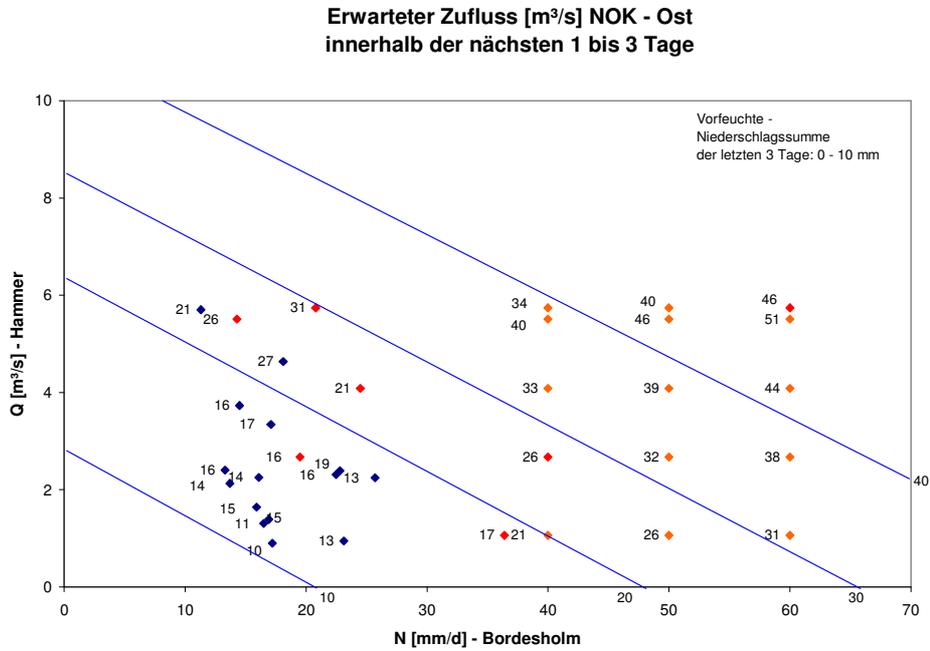


Abbildung 137: Datengrundlage Zuflussprognose; NOK-Ost, Vorregen 0 mm - 10 mm

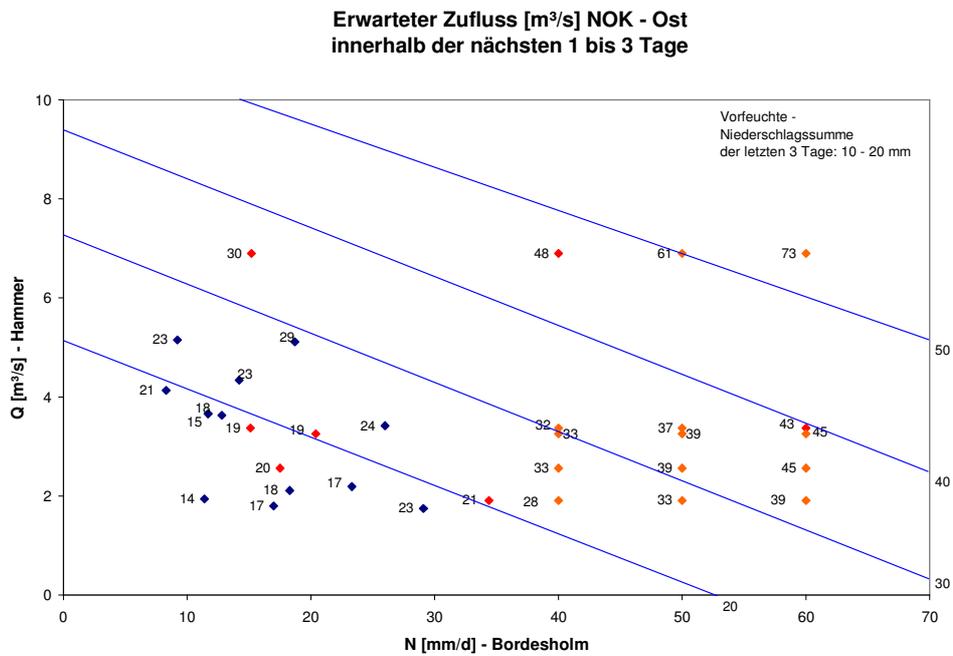


Abbildung 138: Datengrundlage Zuflussprognose; NOK-Ost, Vorregen 10 mm - 20 mm

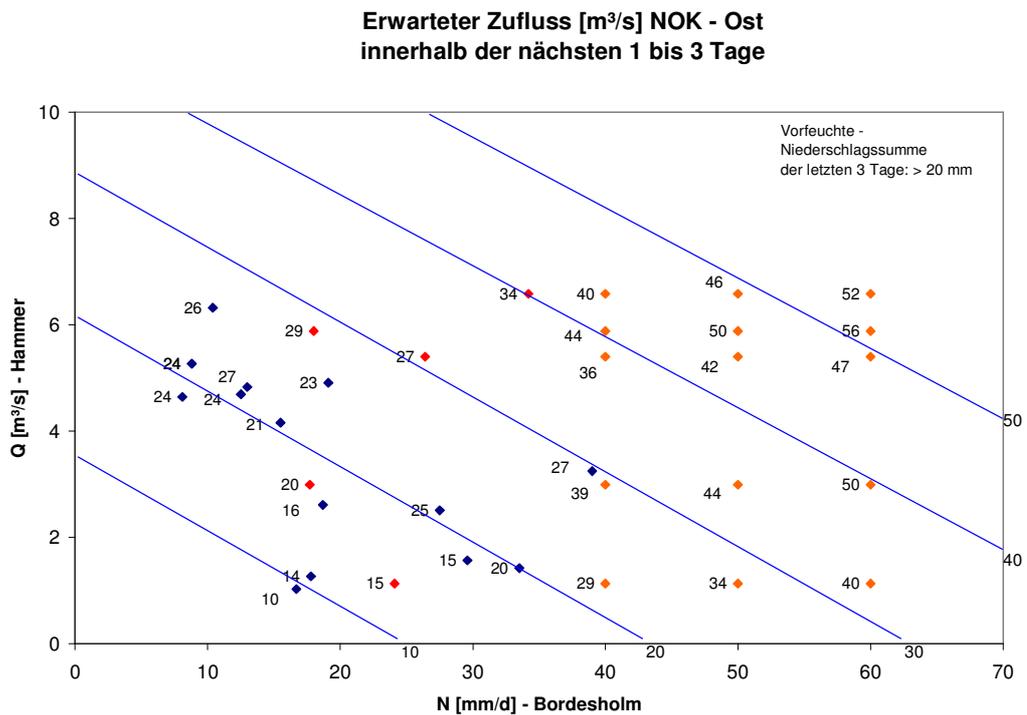


Abbildung 139: Datengrundlage Zuflussprognose; NOK-Ost, Vorregen >20 mm

**D2 NOK-Mitte/Ost**

**Erwarteter Zufluss [m³/s] NOK - Mitte-Ost  
innerhalb der nächsten 1 bis 3 Tage**

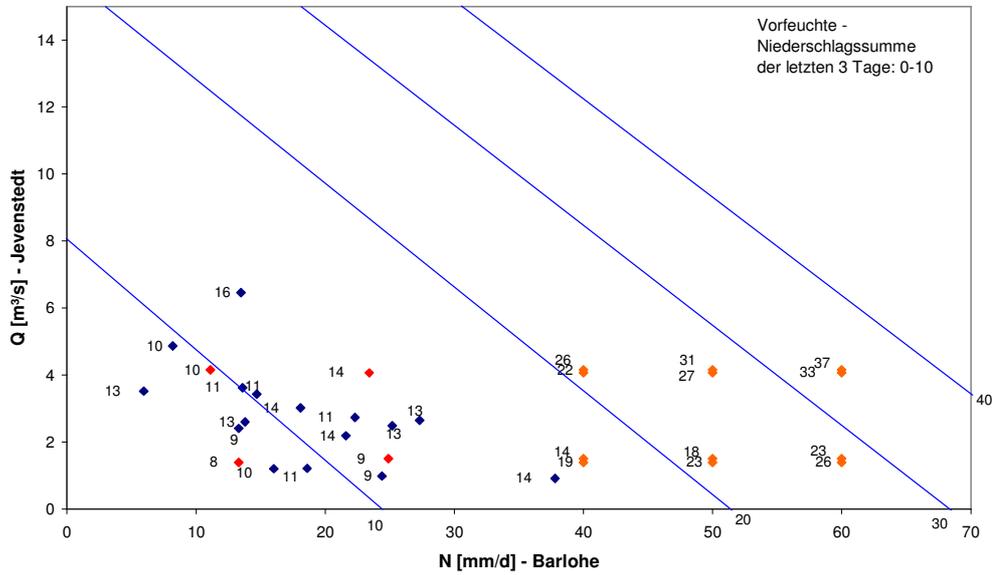


Abbildung 140: Datengrundlage Zuflussprognose; NOK-Mitte/Ost, Vorregen 0 - 10 mm

**Erwarteter Zufluss [m³/s] NOK - Mitte-Ost  
innerhalb der nächsten 1 bis 3 Tage**

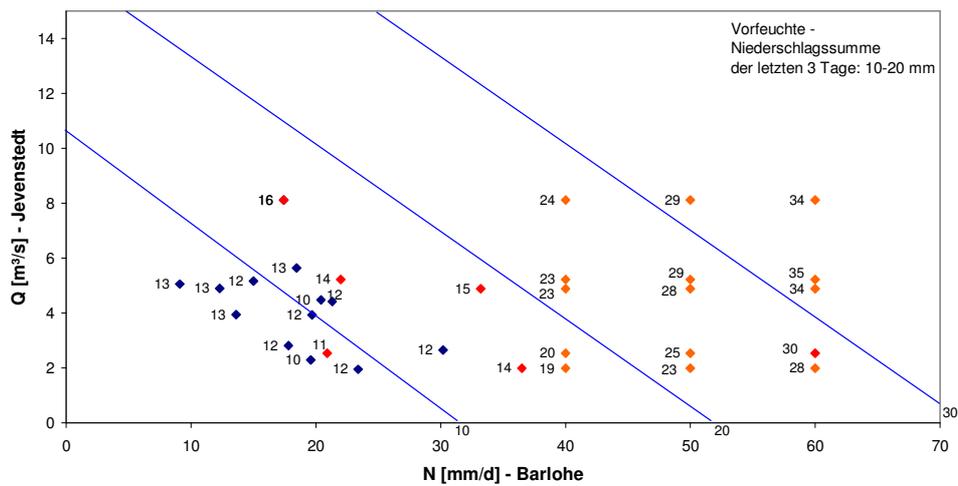


Abbildung 141: Datengrundlage Zuflussprognose; NOK-Mitte/Ost, Vorregen 10 - 20 mm

**Erwarteter Zufluss [m³/s] NOK - Mitte-Ost  
innerhalb der nächsten 1 bis 3 Tage**

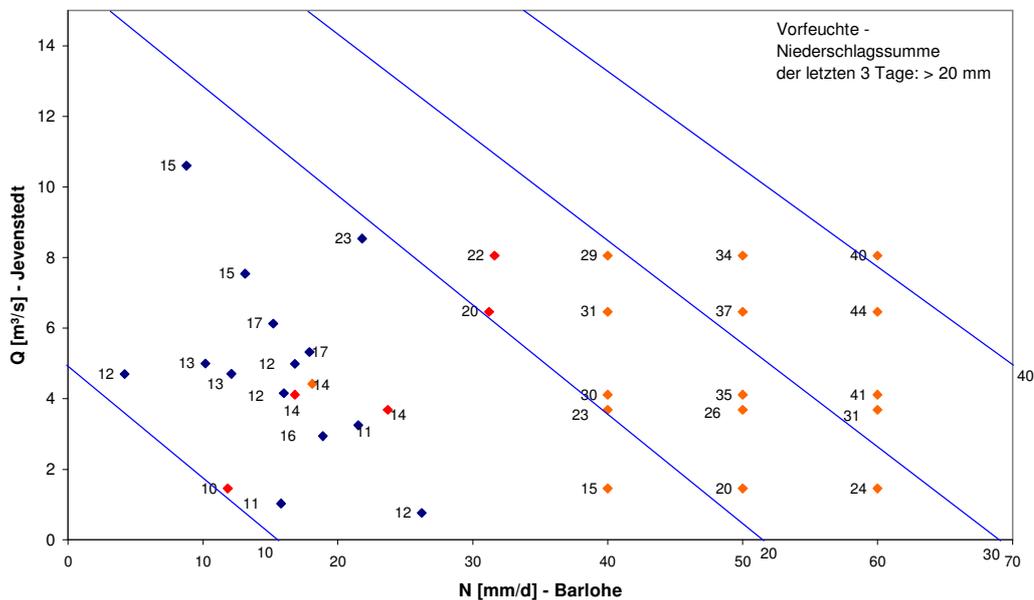


Abbildung 142: Datengrundlage Zuflussprognose; NOK-Mitte/Ost, Vorregen > 20 mm

**D3 NOK-Mitte/West**

**Erwarteter Zufluss [m<sup>3</sup>/s] NOK - Mittewest  
innerhalb der nächsten 1 bis 3 Tage**

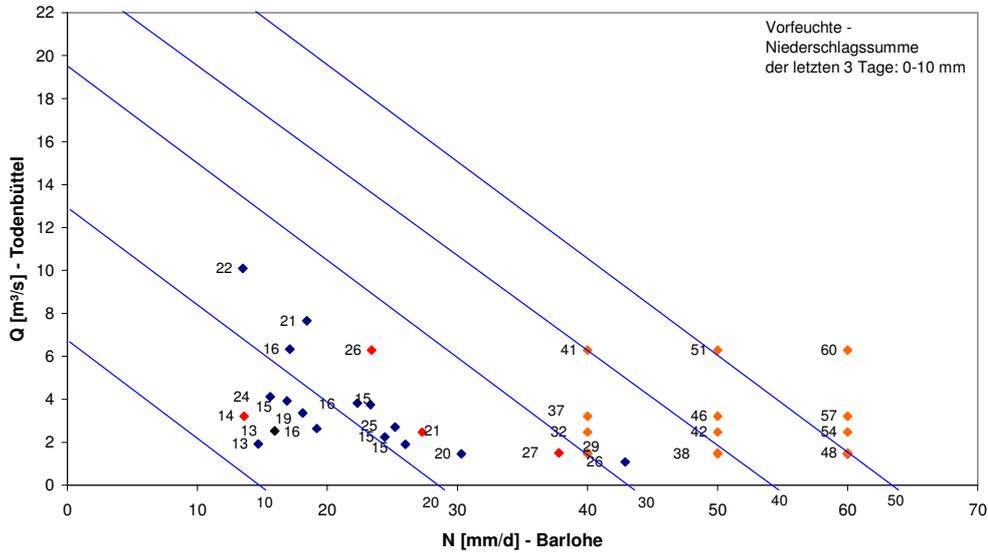


Abbildung 143: Datengrundlage Zuflussprognose; NOK-Mitte/West, Vorregen 0 - 10 mm

**Erwarteter Zufluss [m<sup>3</sup>/s] NOK - Mittewest  
innerhalb der nächsten 1 bis 3 Tagen**

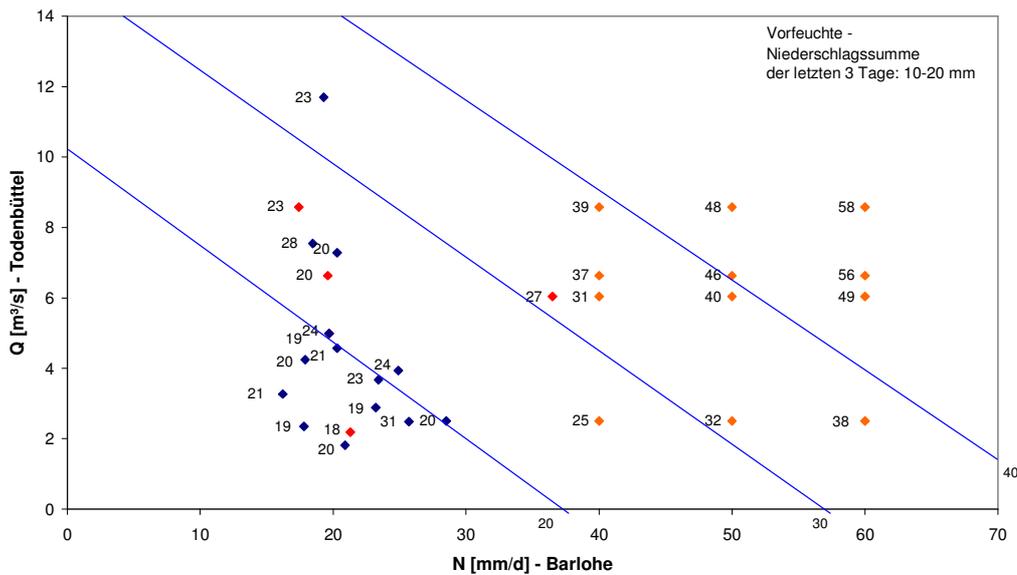


Abbildung 144: Datengrundlage Zuflussprognose; NOK-Mitte/West, Vorregen 10 - 20 mm

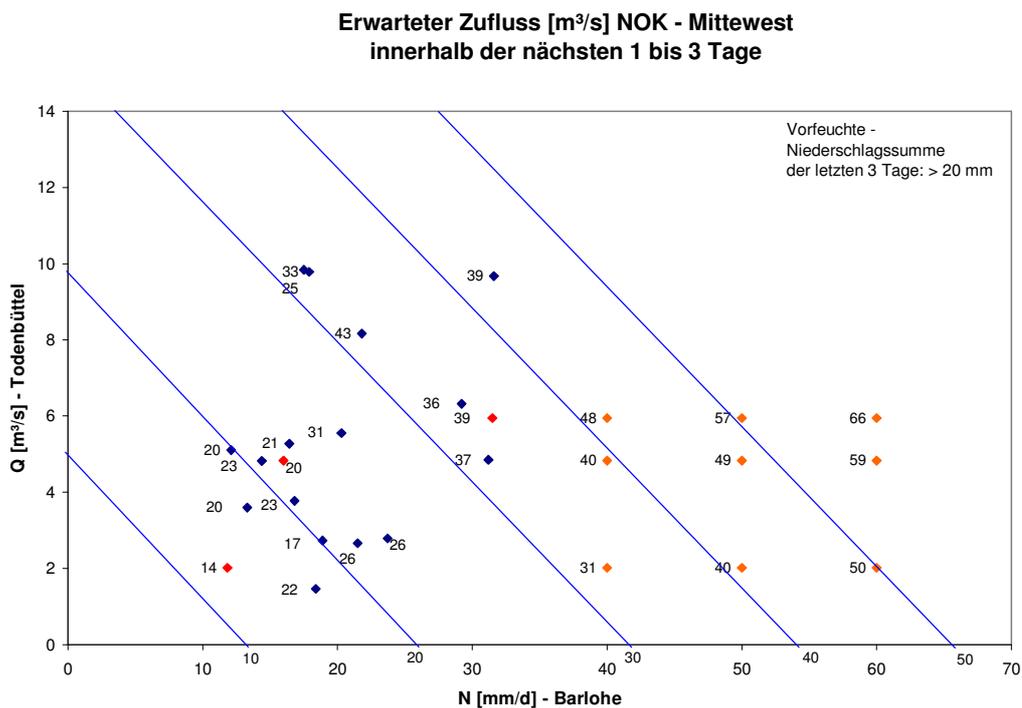


Abbildung 145: Datengrundlage Zuflussprognose; NOK-Mitte/West, Vorregen > 20 mm

**D4 NOK-West**

**Erwarteter Zufluss [m³/s] NOK - West  
innerhalb der nächsten 1 bis 3 Tage**

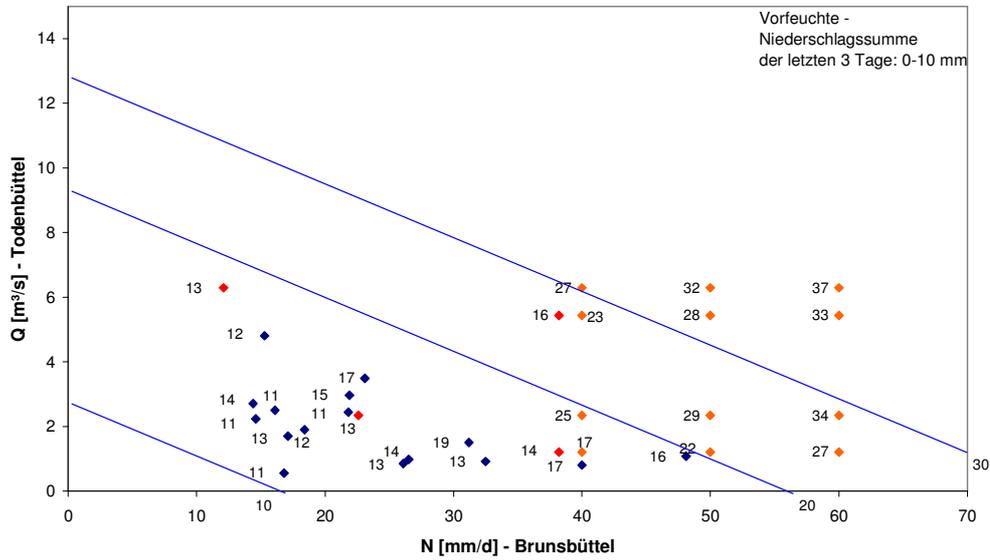


Abbildung 146: Datengrundlage Zuflussprognose; NOK-West, Vorregen 0 - 10 mm

**Erwarteter Zufluss [m³/s] NOK - West  
innerhalb der nächsten 1 bis 3 Tage**

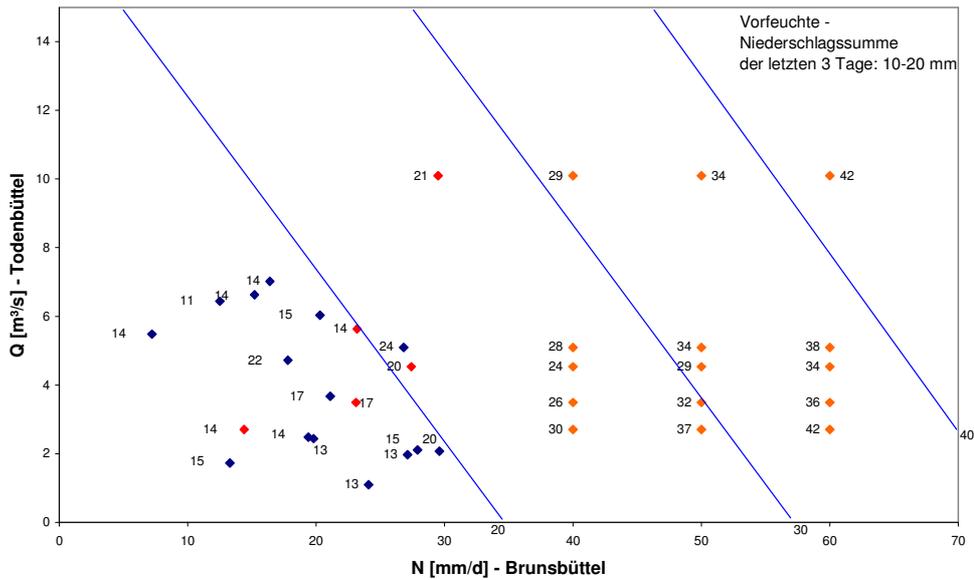


Abbildung 147: Datengrundlage Zuflussprognose; NOK-West, Vorregen 10 - 20 mm

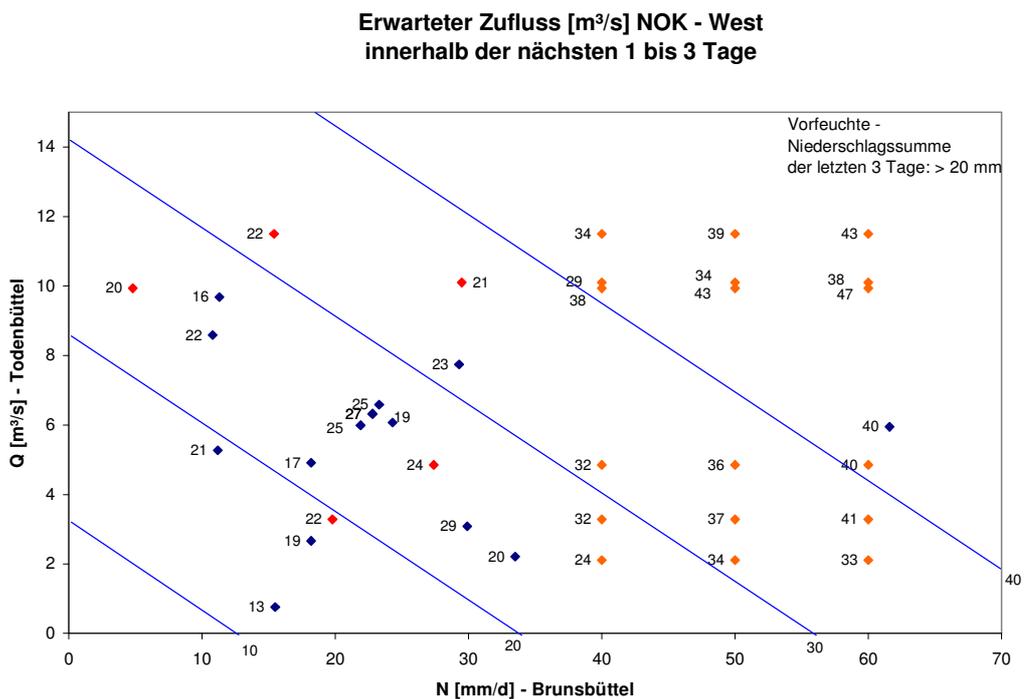


Abbildung 148: Datengrundlage Zuflussprognose; NOK-West, Vorregen > 20 mm

Anhang E Einzugsgebiet

