

Modellierung des Salzgehaltes von Strandseen an der Ostsee unter ungestörten Bedingungen



**Landesamt für Natur und
Umwelt des Landes
Schleswig Holstein**

**Endbericht
13.12.2006**



Modellierung des Salzgehaltes von Strandseen an der Ostsee unter ungestörten Bedingungen

Wiesenstraße 10a
D-28857 Syke

Tel: +49 4242 1638-0
Fax: +49 4242 1638-18
e-mail: dhi@dhi-umwelt.de
Web: www.dhi-umwelt.de

Auftraggeber Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig Holstein Hamburger Chaussee 25 24220 Flintbek	Auftraggeber vertreten durch Dipl.-Biol. E. Wesseler Dipl.-Ing. U. Jesussek
--	---

Projekt Modellierung des Salzgehaltes von Strandseen an der Ostsee unter ungestörten Bedingungen		Angebots Nr. 06ang502			
Erstellt Dr. Ole Larsen Dipl.-Ing. Christian Pohl		Datum 13.12.2006			
		Genehmigt Dr. Ole Larsen			
1	Angebot	CPO	MPA	OLA	13.12.2006
Ausgabe	Beschreibung	Erstellt	Geprüft	Genehmigt	Datum
Schlüsselwörter: Salzgehaltsentwicklung MIKE11 Advektion Dispersion		Klassifikation			
		☐ Frei ☐ Intern ☒ Geschützt ☐ Forschung			

Verteiler		Anzahl Kopien
AG: LANU	Wesseler, Jesussek, etc.	5
DHI:	ola, cpo	2

INHALT

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	III
TABELLENVERZEICHNIS	VIII
ANLAGENVERZEICHNIS	X
1 VERANLASSUNG	1
2 BESCHREIBUNG DES MODELLAUFBAUS	2
3 GROßER BINNENSEE	7
3.1 Allgemein	7
3.2 Randbedingungen Großer Binnensee	8
3.3 Simulation Ist-Zustand	11
3.4 Simulation ungestörte Bedingungen	15
3.5 Simulation optimierter Sielbetrieb	19
4 HEMMELMARKER SEE	26
4.1 Allgemein	26
4.2 Randbedingungen Hemmelmarker See	27
4.3 Simulation Ist-Zustand	30
4.4 Simulation ungestörte Bedingungen	32
4.5 Simulation optimierter Sielbetrieb	34
5 HEMMELSDORFER SEE	38
5.1 Allgemein	38
5.2 Randbedingungen Hemmelsdorfer See	40
5.3 Simulation Ist-Zustand	43
5.4 Simulation ungestörte Bedingungen	46
5.5 Simulation optimierter Sielbetrieb	48
6 NEUSTÄDTER BINNENWASSER	52
6.1 Allgemein	52
6.2 Randbedingungen Neustädter Binnenwasser	53
6.3 Simulation Ist-Zustand	56
7 SCHWANSENER SEE	59
7.1 Allgemein	59
7.2 Randbedingungen Schwansener See	60
7.3 Simulation Ist-Zustand	63
7.4 Simulation ungestörte Bedingungen	65
7.5 Simulation optimierter Sielbetrieb	67
8 SEHLENDORFER SEE	71
8.1 Allgemein	71
8.2 Randbedingungen Sehlendorfer See	72
8.3 Simulation Ist-Zustand	75
9 WINDEBYER NOOR	78



9.1	Allgemein	78
9.2	Randbedingungen Windebyer Noor	79
9.3	Simulation Ist-Zustand	82
9.4	Simulation ungestörte Bedingungen	85
9.5	Simulation optimierter Sielbetrieb	87
10	ZUSAMMENFASSUNG	90
ANLAGEN		93
10.1	Anlagen Hemmelmarker See	94
10.1.1	Salzgehalt Ist-Zustand	94
10.1.2	Salzgehalt ungestörter Zustand	95
10.1.3	Salzgehalt Optimierung Var. I	97
10.1.4	Salzgehalt Optimierung Var. II	98
10.2	Anlagen Hemmelsdorfer See	100
10.2.1	Salzgehalt Ist-Zustand	100
10.2.2	Salzgehalt ungestörter Zustand	101
10.2.3	Salzgehalt Optimierung Var. I	103
10.2.4	Salzgehalt Optimierung Var. II	104
10.3	Anlagen Neustädter Binnenwasser	106
10.3.1	Salzgehalt Ist-Zustand	106
10.4	Anlagen Schwansener See	108
10.4.1	Salzgehalt Ist-Zustand	108
10.4.2	Salzgehalt ungestörter Zustand	109
10.4.3	Salzgehalt Optimierung Var. I	111
10.4.4	Salzgehalt Optimierung Var. II	112
10.5	Anlagen Sehlendorfer See	114
10.5.1	Salzgehalt Ist-Zustand	114
10.6	Anlagen Windebyer Noor	115
10.6.1	Salzgehalt Ist-Zustand	115
10.6.2	Salzgehalt ungestörter Zustand	117
10.6.3	Salzgehalt Optimierung Var. I	118
10.6.4	Salzgehalt Optimierung Var. II	120

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1:	Tiefenplan zur Erfassung der Seetiefen (hier: Großer Binnensee)	2
Abb. 2:	Rasterdarstellung mit zugehörigen DGK 5 Kartenschnitten	3
Abb. 3:	Mittelsachse mit Querprofilen zur Abbildung der Seegeometrie	3
Abb. 4:	Eingabemaske des Simulationsmaske	4
Abb. 5:	Eingabemaske der Netzwerkdatei mit grafischer und tabellarischer Ansicht	4
Abb. 6:	Querschnittsdatei mit grafischer und tabellarischer Ansicht	5
Abb. 7:	Erstellen von Querschnitten mit MIKE 11 GIS	5
Abb. 8:	Wehranlage im Auslauf des Großen Binnensee	7
Abb. 9:	Tiefenplan Großer Binnensee	8
Abb. 10:	Untere Randbedingung Gr. Binnensee Wasserstand Pegel Heiligenhafen	10
Abb. 11:	Untere Randbedingung Gr. Binnensee Salzgehalt Messstelle Süderfahrt	10
Abb. 12:	Obere Randbedingung Zufluss Gr. Binnensee	11
Abb. 13:	Obere Randbedingung Salzgehalt Zufluss zum G. Binnensee	11
Abb. 14:	Vergleich gemessener und simulierter Wasserstand (Gr. Binnensee)	13
Abb. 15:	Vergleich gemessener (tiefste Stelle) und simulierter (Zulauf) Salzgehalt (Gr. Binnensee)	13
Abb. 16:	Vergleich gemessener (tiefste Stelle) und simulierter (tiefste Stelle) Salzgehalt (Gr. Binnensee)	14
Abb. 17:	Vergleich gemessener (tiefste Stelle) und simulierter (Ablauf) Salzgehalt (Gr. Binnensee)	15
Abb. 18:	Vergleich gemessener (tiefste Stelle) und simulierter (gemittelt) Salzgehalt (Gr. Binnensee)	15
Abb. 19:	Vergleich der Wasserstände ungestörter- und Ist-Zustand (Gr. Binnensee)	16
Abb. 20:	Vergleich der Salzgehalt ungestörter- (Zulauf) und Ist-Zustand (Zulauf) (Gr. Binnensee)	17
Abb. 21:	Vergleich der Salzgehalt ungestörter- (tiefste Stelle) und Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Gr. Binnensee)	17
Abb. 22:	Vergleich der Salzgehalt ungestörter- (Ablauf) und Ist-Zustand (Ablauf) (Gr. Binnensee)	18
Abb. 23:	Vergleich der Salzgehalt ungestörter- (gemittelt) und Ist-Zustand (gemittelt) (Gr. Binnensee)	18
Abb. 24:	Vergleich der Wasserstände optimierter Sielbetrieb Var. I und Ist-Zustand (Gr. Binnensee)	20
Abb. 25:	Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (Zulauf) und Ist-Zustand (Zulauf) (Gr. Binnensee)	20
Abb. 26:	Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (tiefste Stelle) und Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Gr. Binnensee)	21
Abb. 27:	Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (Ablauf) und Ist-Zustand (Ablauf) (Gr. Binnensee)	21



Abb. 28:	Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (gemittelt) und Ist-Zustand (gemittelt) (Gr. Binnensee)	22
Abb. 29:	Vergleich der Wasserstände optimierter Sielbetrieb Var. II und Ist-Zustand (Gr. Binnensee)	22
Abb. 30:	Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (Zulauf) und Ist-Zustand (Zulauf) (Gr. Binnensee)	23
Abb. 31:	Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (tiefste Stelle) und Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Gr. Binnensee)	24
Abb. 32:	Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (Ablauf) und Ist-Zustand (Ablauf) (Gr. Binnensee)	24
Abb. 33:	Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (gemittelt) und Ist-Zustand (gemittelt) (Gr. Binnensee)	25
Abb. 34:	links Brücke mit Rohrdurchlass; rechts Rohrdurchlass mit Rückstauklappe	26
Abb. 35:	Tiefenplan Hemmelmarker See	27
Abb. 36:	Untere Randbedingung Hemmelmarker See Wasserstand Pegel Eckernförde	28
Abb. 37:	Untere Randbedingung Hemmelmarker See Salzgehalt Messstelle Bookniseck	29
Abb. 38:	Obere Randbedingung Zufluss Hemmelmarker See	29
Abb. 39:	Obere Randbedingung Salzgehalt Zufluss zum Hemmelmarker See	30
Abb. 40:	Vergleich gemessener und simulierter Wasserstand (Hemmelmarker See)	30
Abb. 41:	Simulierter Salzgehalt Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Hemmelmarker See)	31
Abb. 42:	Vergleich der Wasserstände ungestörter- und Ist-Zustand (Hemmelmarker See)	32
Abb. 43:	Vergleich der Salzgehalte ungestörter- (tiefste Stelle) und Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Hemmelmarker See)	33
Abb. 44:	Vergleich der Wasserstände optimierter Sielbetrieb Var. I und Ist-Zustand (Hemmelmarker See)	34
Abb. 45:	Vergleich der Salzgehalte ungestörter- (tiefste Stelle) und optimierter Sielbetrieb Var. I (tiefste Stelle) (Hemmelmarker See)	35
Abb. 46:	Vergleich der Wasserstände optimierter Sielbetrieb Var. II und Ist-Zustand (Hemmelmarker See)	35
Abb. 47:	Vergleich der Salzgehalte ungestörter- (tiefste Stelle) und optimierter Sielbetrieb Var. II (tiefste Stelle) (Hemmelmarker See)	37
Abb. 48:	links: Stemmtore mit hinterliegendem Wehr, rechts: Querschnittseinengende Brücke.....	38
Abb. 49:	links: Wehranlage ohne Funktion ; rechts: vernachlässigbare Brücke.....	38
Abb. 50:	Tiefenplan Hemmelsdorfer See	40
Abb. 51:	Untere Randbedingung Hemmelsdorfer See Wasserstand Pegel Travemünde.....	41

Abb. 52:	Untere Randbedingung Hemmelsdorfer See Salzgehalt Messsstelle Neustadt	42
Abb. 53:	Obere Randbedingung Zufluss Hemmelsdorfer See.....	42
Abb. 54:	Obere Randbedingung Salzgehalt Zufluss zum Hemmelsdorfer See	43
Abb. 55:	Vergleich gemessener und simulierter Wasserstand (Hemmelsdorfer See)	43
Abb. 56:	Vergleich gemessener (tiefste Stelle) und simulierter (tiefste Stelle) Salzgehalt (Hemmelsdorfer See)	45
Abb. 57:	Vergleich der Wasserstände ungestörter- und Ist-Zustand (Hemmelsdorfer See)	46
Abb. 58:	Vergleich der Salzgehalte ungestörter Zustand (tiefste Stelle) und Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Hemmelsdorfer See)	47
Abb. 59:	Vergleich der Wasserstände optimierter Sielbetrieb Var. I und Ist- Zustand (Hemmelsdorfer See)	48
Abb. 60:	Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (tiefste Stelle) und Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Hemmelsdorfer See)	49
Abb. 61:	Vergleich der Wasserstände optimierter Sielbetrieb Var. II und Ist- Zustand (Hemmelsdorfer See)	49
Abb. 62:	Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (tiefste Stelle) und Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Hemmelsdorfer See)	50
Abb. 63:	Neustädter Binnenwasser	52
Abb. 64:	Tiefenplan Neustädter Binnenwasser.....	53
Abb. 65:	Untere Randbedingung Neustädter Binnenwasser Wasserstand Pegel Neustadt.....	54
Abb. 66:	Untere Randbedingung Neustädter Binnenwasser Salzgehalt Messsstelle Neustadt	55
Abb. 67:	Obere Randbedingung Zufluss Neustädter Binnenwasser	55
Abb. 68:	Obere Randbedingung Salzgehalt Zufluss zum Neustädter Binnensee.....	56
Abb. 69:	Vergleich gemessener und simulierter Wasserstand (Neustädter Binnenwasser).....	56
Abb. 70:	Detailansicht: Vergleich gemessener und simulierter Wasserstand (Neustädter Binnenwasser)	57
Abb. 71:	Vergleich gemessener (tiefste Stelle) und simulierter (tiefste Stelle) Salzgehalt (Neustädter Binnenwasser)	58
Abb. 72:	links: Einlauf unterirdische Schleuse; rechts: Auslaufbauwerk Ostsee	59
Abb. 73:	Tiefenplan Schwansener See.....	60
Abb. 74:	Untere Randbedingung Schwansener See Wasserstand Pegel Schleimünde.....	61
Abb. 75:	Untere Randbedingung Schwansener See Salzgehalt Messsstelle Schleimünde.....	62
Abb. 76:	Obere Randbedingung Zufluss Schwansener See	62
Abb. 77:	Obere Randbedingung Salzgehalt Zufluss zum Schwansener See.....	63



Abb. 78:	Vergleich gemessener und simulierter Wasserstand (Schwansener See)	63
Abb. 79:	Vergleich der Salzgehalte Ist-Zustand gemessen (tiefste Stelle) und simuliert (tiefste Stelle) (Schwansener See)	64
Abb. 80:	Vergleich der Wasserstände ungestörter- und Ist-Zustand (Schwansener See)	65
Abb. 81:	Vergleich der Salzgehalte ungestörter- (tiefste Stelle) und Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Schwansener See)	66
Abb. 82:	Vergleich der Wasserstände optimierter Sielbetrieb Var. I und Ist-Zustand (Schwansener See)	67
Abb. 83:	Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (tiefste Stelle) und Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Schwansener See)	68
Abb. 84:	Vergleich der Wasserstände optimierter Sielbetrieb Var. II und Ist-Zustand (Schwansener See)	69
Abb. 85:	Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (tiefste Stelle) und Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Schwansener See)	69
Abb. 86:	Ablauf Sehlendorfer See.....	71
Abb. 87:	Tiefenplan Sehlendorfer Binnensee	71
Abb. 88:	Untere Randbedingung Sehlendorfer See Wasserstand Pegel Heiligenhafen	73
Abb. 89:	Untere Randbedingung Sehlendorfer See Salzgehalt Messstelle Süderfahrt	73
Abb. 90:	Obere Randbedingung Zufluss (gesamt und aufgeteilt) Sehlendorfer See	74
Abb. 91:	Obere Randbedingung Salzgehalt Zufluss zum Sehlendorfer See	74
Abb. 92:	Vergleich gemessener und simulierter Wasserstand (Sehlendorfer See)	75
Abb. 93:	Detailausschnitt: Vergleich gemessener und simulierter Wasserstand (Sehlendorfer See)	75
Abb. 94:	Vergleich der Salzgehalt Ist Zustand gemessene, gemessen und verschoben (tiefste Stelle) und simuliert (tiefste Stelle) (Sehlendorfer See)	76
Abb. 95:	links: unterströmtes Wehr; rechts: Rückschlagtores.....	78
Abb. 96:	Tiefenplan Windebyer Noor	79
Abb. 97:	Untere Randbedingung Windebyer Noor Wasserstand Pegel Eckernförde	80
Abb. 98:	Untere Randbedingung Windebyer Noor Salzgehalt Messstelle Bookniseck	81
Abb. 99:	Obere Randbedingung Zufluss Windebyer Noor	81
Abb. 100:	Obere Randbedingung Salzgehalt Zufluss zum Windebyer Noor.....	82
Abb. 101:	Vergleich gemessener und simulierter Wasserstand (Windebyer Noor).....	82
Abb. 102:	Vergleich der Salzgehalte Ist-Zustand gemessen (tiefste Stelle) und simuliert (tiefste Stelle) (Windebyer Noor)	84
Abb. 103:	Vergleich der Wasserstände ungestörter- und Ist-Zustand (Windebyer Noor)	85

Abb. 104:	Vergleich der Salzgehalte ungestörter-(tiefste Stelle) und Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Windebyer Noor)	86
Abb. 105:	Vergleich der Wasserstände optimierter Sielbetrieb Var. I und Ist-Zustand (Windebyer Noor)	87
Abb. 106:	Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (tiefste Stelle) und Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Windebyer Noor)	88
Abb. 107:	Vergleich der Wasserstände optimierter Sielbetrieb Var. II und Ist-Zustand (Windebyer Noor)	88
Abb. 108:	Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (tiefste Stelle) und Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Windebyer Noor)	89
Abb. 109:	Bauwerke- links: Gr. Binnensee; rechts: Hemmelsdorfer See	91



TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1:	Bauwerksabmessungen Großer Binnensee	7
Tab. 2:	Wasserstandsentwicklung im Ist- und ungestörten Zustand (Gr. Binnensee).....	16
Tab. 3:	Vergleich der mittleren und maximalen Salzgehalte für den Ist- und ungestörten Zustand (Gr. Binnensee)	19
Tab. 4:	Wasserstandsentwicklung für die Variantenrechnung (Gr. Binnensee).....	20
Tab. 5:	Vergleich der mittleren und maximalen Salzgehalte für die verschiedenen Variantenrechnungen (Gr. Binnensee).....	23
Tab. 6:	Bauwerksabmessungen Hemmelmarker See	26
Tab. 7:	Wasserstandsentwicklung im Ist- und ungestörten Zustand (Hemmelmarker See)	32
Tab. 8:	Vergleich der mittleren und maximalen Salzgehalte für den Ist- und ungestörten Zustand (Hemmelmarker See)	33
Tab. 9:	Wasserstandsentwicklung für die Variantenrechnung (Hemmelmarker See)	34
Tab. 10:	Vergleich der mittleren und maximalen Salzgehalte für die Variantenrechnung (Hemmelmarker See)	36
Tab. 11:	Wehrsabmessungen Hemmelsdorfer See	39
Tab. 12:	Durchlassabmessungen Hemmelsdorfer See	39
Tab. 13:	Wasserstandsentwicklung im Ist- und ungestörten Zustand (Hemmelsdorfer See)	46
Tab. 14:	Vergleich der mittleren und maximalen Salzgehalte für den Ist- und ungestörten Zustand (Hemmelsdorfer See)	47
Tab. 15:	Wasserstandsentwicklung für die Variantenrechnungen (Hemmelsdorfer See)	48
Tab. 16:	Vergleich der mittleren und maximalen Salzgehalte für die Variantenrechnungen (Hemmelsdorfer See)	51
Tab. 17:	Durchlassabmessungen Neustädter Binnenwasser	52
Tab. 18:	Wasserstände im Ist- Zustand (Neustädter Binnenwasser)	57
Tab. 19:	Salzgehalte im Ist- Zustand (Neustädter Binnenwasser).....	58
Tab. 20:	Durchlassabmessungen Schwansener See	59
Tab. 21:	Wasserstandsentwicklung im Ist- und ungestörten Zustand (Schwansener See)	65
Tab. 22:	Vergleich der mittleren und maximalen Salzgehalte für den Ist- und ungestörten Zustand (Schwansener See)	66
Tab. 23:	Wasserstandsentwicklung für die Variantenrechnungen (Schwansener See)	67
Tab. 24:	Vergleich der mittleren und maximalen Salzgehalte für die Variantenrechnungen (Schwansener See).....	70
Tab. 25:	Wasserstände im Ist- Zustand (Sehlendorfer See).....	76
Tab. 26:	Salzgehalte im Ist- Zustand (Sehlendorfer See).....	77
Tab. 27:	Bauwerksabmessungen Windebyer Noor	78



Tab. 28:	Brückenabmessungen Ablauf Windebyer Noor.....	79
Tab. 29:	Wasserstandsentwicklung im Ist- und ungestörten Zustand (Windebyer Noor)	85
Tab. 30:	Vergleich der mittleren und maximalen Salzgehalte für den Ist- und ungestörten Zustand (Windebyer Noor)	86
Tab. 31:	Wasserstandsentwicklung für die Variantenrechnungen (Windebyer Noor)	87
Tab. 32:	Vergleich der mittleren und maximalen Salzgehalte für die Variantenrechnungen (Windebyer Noor)	89
Tab. 33:	Salzgehaltsentwicklung für die Varianten in allen Seen	90



ANLAGENVERZEICHNIS

Abb.-A. 1:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (Zulauf) und gemessen (tiefste Stelle) (Hemmelmarker See)	94
Abb.-A. 2:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (Ablauf) und gemessen (tiefste Stelle) (Hemmelmarker See)	94
Abb.-A. 3:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (gemittelt) und gemessen (tiefste Stelle) (Hemmelmarker See)	95
Abb.-A. 4:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand (Zulauf) und ungestörter Zustand (Zulauf) (Hemmelmarker See)	95
Abb.-A. 5:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand (Ablauf) und ungestörter Zustand (Ablauf) (Hemmelmarker See)	96
Abb.-A. 6:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand (gemittelt) und ungestörter Zustand (gemittelt) (Hemmelmarker See)	96
Abb.-A. 7:	Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (Zulauf) und Ist-Zustand (Zulauf) (Hemmelmarker See)	97
Abb.-A. 8:	Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (Ablauf) und Ist-Zustand (Ablauf) (Hemmelmarker See)	97
Abb.-A. 9:	Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (gemittelt) und Ist-Zustand (gemittelt) (Hemmelmarker See)	98
Abb.-A. 10:	Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (Zulauf) und Ist-Zustand (Zulauf) (Hemmelmarker See)	98
Abb.-A. 11:	Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (Ablauf) und Ist-Zustand (Ablauf) (Hemmelmarker See)	99
Abb.-A. 12:	Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (gemittelt) und Ist-Zustand (gemittelt) (Hemmelmarker See)	99
Abb.-A. 13:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (Zulauf) und gemessen (tiefste Stelle) (Hemmelsdorfer See)	100
Abb.-A. 14:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (Ablauf) und gemessen (tiefste Stelle) (Hemmelsdorfer See)	100
Abb.-A. 15:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (gemittelt) und gemessen (tiefste Stelle) (Hemmelsdorfer See)	101
Abb.-A. 16:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand (Zulauf) und ungestörter Zustand (Zulauf) (Hemmelsdorfer See)	101
Abb.-A. 17:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand (Ablauf) und ungestörter Zustand (Ablauf) (Hemmelsdorfer See)	102
Abb.-A. 18:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand (gemittelt) und ungestörter Zustand (gemittelt) (Hemmelsdorfer See)	102
Abb.-A. 19:	Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (Zulauf) und Ist-Zustand (Zulauf) (Hemmelsdorfer See)	103
Abb.-A. 20:	Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (Ablauf) und Ist-Zustand (Ablauf) (Hemmelsdorfer See)	103
Abb.-A. 21:	Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (gemittelt) und Ist-Zustand (gemittelt) (Hemmelsdorfer See)	104



Abb.-A. 22:	Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (Zulauf) und Ist-Zustand (Zulauf) (Hemmelsdorfer See).....	104
Abb.-A. 23:	Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (Ablauf) und Ist-Zustand (Ablauf) (Hemmelsdorfer See).....	105
Abb.-A. 24:	Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (gemittelt) und Ist-Zustand (gemittelt) (Hemmelsdorfer See)	105
Abb.-A. 25:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (Zulauf 1) und gemessen (tiefste Stelle) (Neustädter Binnenwasser)	106
Abb.-A. 26:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (Zulauf 2) und gemessen (tiefste Stelle) (Neustädter Binnenwasser)	106
Abb.-A. 27:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (Ablauf) und gemessen (tiefste Stelle) (Neustädter Binnenwasser)	107
Abb.-A. 28:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (gemittelt) und gemessen (tiefste Stelle) (Neustädter Binnenwasser)	107
Abb.-A. 29:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (Zulauf) und gemessen (tiefste Stelle) (Schwansener See)	108
Abb.-A. 30:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (Ablauf) und gemessen (tiefste Stelle) (Schwansener See)	108
Abb.-A. 31:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (gemittelt) und gemessen (tiefste Stelle) (Schwansener See)	109
Abb.-A. 32:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand (Zulauf) und ungestörter Zustand (Zulauf) (Schwansener See).....	109
Abb.-A. 33:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand (Ablauf) und ungestörter Zustand (Ablauf) (Schwansener See)	110
Abb.-A. 34:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand (gemittelt) und ungestörter Zustand (gemittelt) (Schwansener See)	110
Abb.-A. 35:	Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (Zulauf) und Ist-Zustand (Zulauf) (Schwansener See).....	111
Abb.-A. 36:	Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (Ablauf) und Ist-Zustand (Ablauf) (Schwansener See)	111
Abb.-A. 37:	Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (gemittelt) und Ist-Zustand (gemittelt) (Schwansener See)	112
Abb.-A. 38:	Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (Zulauf) und Ist-Zustand (Zulauf) (Schwansener See).....	112
Abb.-A. 39:	Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (Ablauf) und Ist-Zustand (Ablauf) (Schwansener See)	113
Abb.-A. 40:	Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (gemittelt) und Ist-Zustand (gemittelt) (Schwansener See)	113
Abb.-A. 41:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (Zulauf 2) und gemessen (tiefste Stelle) (Sehlendorfer See).....	114
Abb.-A. 42:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (Ablauf) und gemessen (tiefste Stelle) (Sehlendorfer See)	114
Abb.-A. 43:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (gemittelt) und gemessen (tiefste Stelle) (Sehlendorfer See).....	115
Abb.-A. 44:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (Zulauf) und gemessen (tiefste Stelle) (Windebyer Noor)	115



Abb.-A. 45:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (Ablauf) und gemessen (tiefste Stelle) (Windebyer Noor)	116
Abb.-A. 46:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (gemittelt) und gemessen (tiefste Stelle) (Windebyer Noor)	116
Abb.-A. 47:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand (Zulauf) und ungestörter Zustand (Zulauf) (Windebyer Noor)	117
Abb.-A. 48:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand (Ablauf) und ungestörter Zustand (Ablauf) (Windebyer Noor)	117
Abb.-A. 49:	Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand (gemittelt) und ungestörter Zustand (gemittelt) (Windebyer Noor)	118
Abb.-A. 50:	Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (Zulauf) und Ist-Zustand (Zulauf) (Windebyer Noor)	118
Abb.-A. 51:	Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (Ablauf) und Ist-Zustand (Ablauf) (Windebyer Noor)	119
Abb.-A. 52:	Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (gemittelt) und Ist-Zustand (gemittelt) (Windebyer Noor)	119
Abb.-A. 53:	Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (Zulauf) und Ist-Zustand (Zulauf) (Windebyer Noor)	120
Abb.-A. 54:	Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (Ablauf) und Ist-Zustand (Ablauf) (Windebyer Noor)	120
Abb.-A. 55:	Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (gemittelt) und Ist-Zustand (gemittelt) (Windebyer Noor)	121

1 VERANLASSUNG

In Schleswig Holstein soll die Salzgehaltsentwicklung für sieben Strandseen untersucht werden. Bei den Seen handelt es sich namentlich um den Großen Binnensee, den Hemmelsdorfer See, den Hemmelmarker See, das Neustädter Binnenwasser, den Schwansener See, den Sehlendorfer See und den Windebyer Noor.

Da die Seen aus Gründen des Hochwasserschutzes von der Ostsee baulich abgetrennt wurden, hat sich der Salzgehalt nachhaltig verändert und es ist zu einer Versüßung der Seen gekommen. Aus diesem Grund sollen drei Zustände berechnet werden. Der Ist-Zustand, ein ungestörter Zustand und eine Optimierung des Salzgehaltes unter Berücksichtigung der jetzigen Nutzung.

Der Salzgehalt im Ist-Zustand ist durch eine Abkopplung der Seen von der Ostsee nachhaltig beeinflusst worden. Die jetzige Steuerung zielt auf eine maximale Sielung ab und verhindert somit einen Rückstrom aus der Ostsee. Die Simulation des Ist Zustandes dient somit der Kalibrierung, da nur für dieses Ereignis Aufzeichnungen der Salzgehalte vorliegen.

Beim Sehlendorfer Binnensee und dem Neustädter Binnenwasser wird nur der Ist Zustand nachgebildet, da hier keine bauwerkliche Abtrennung von der Ostsee vorliegt.

Der ungestörte Zustand stellt den Gegensatz dazu dar, da keine Beeinflussung durch Bauwerke mehr vorliegt. Hierbei soll die Entwicklung des Salzgehaltes nachgebildet werden, die sich unter ungestörten Bedingungen wieder einstellt. Von Interesse ist in diesem Zusammenhang, wie viel Zeit vergeht, bis sich wieder der ursprüngliche und natürliche Zustand einstellt hat. Bauliche Gegebenheiten werden jedoch berücksichtigt, da aus der Topographie heraus ein kompletter Rückbau nicht möglich ist. Es werden daher alle Bauwerke komplett geöffnet gerechnet.

Die Optimierung stellt eine Verbesserung der Steuerung bestehender Bauwerke dar. Das Hauptaugenmerk liegt auf einer Widerversalzung unter Berücksichtigung der jetzigen Nutzung. Die Bauwerke sind somit immer geöffnet, wenn ein Abströmen möglich ist oder bestimmte Schwellenwerte nicht überschritten werden. Hierdurch wird die Kommunikation zwischen Strandsee und Ostsee gefördert und liefert somit den gewünschten Salzgehaltsaustausch.



2 BESCHREIBUNG DES MODELLAUFBAUS

Im nachfolgenden Kapitel wird zuerst der generelle Ablauf der Modellerstellung erläutert, bevor dann auf die einzelnen Modelle mit deren Besonderheiten eingegangen wird.

Für die Berechnung wurde für jeden Strandsee ein Einzelmodell aufgebaut. Um das Volumen und die Topographie der Seen abbilden zu können, wurden die vorliegenden Tiefenpläne (Abb. 1) anhand von DGK5-Kartenschnitten georeferenziert und anschließend abdigitalisiert.

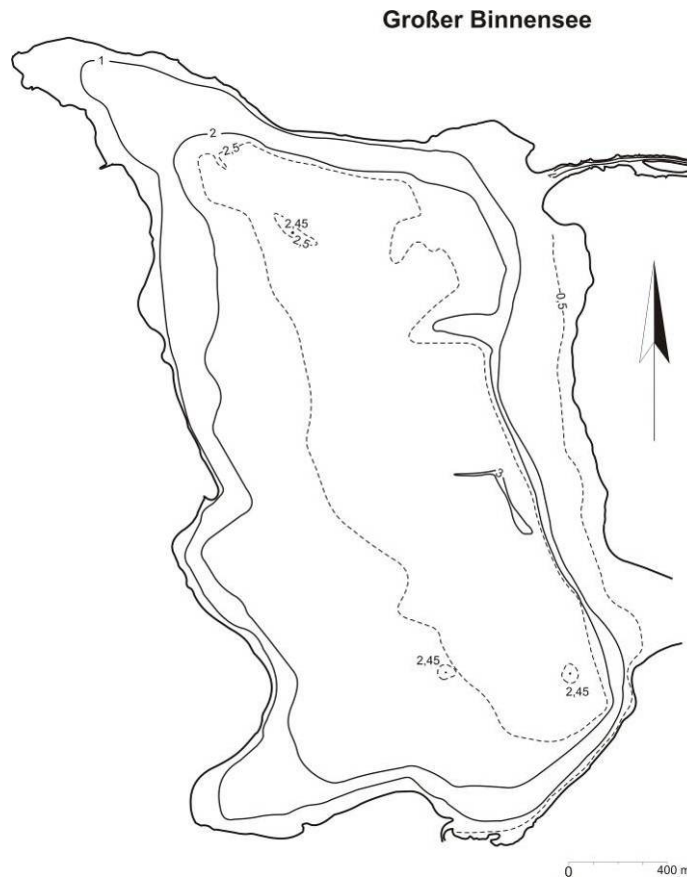


Abb. 1: Tiefenplan zur Erfassung der Seetiefen (hier: Großer Binnensee)

Um den Anschluss der Uferlinien zum Gelände zu erhalten, wurden ebenfalls die Höhenlinien der Umgebung erfasst. Dabei wurde darauf geachtet, dass für alle zu berechnenden Szenarien eine Höhenlage der Umgebung erreicht wurde, die eine korrekte Ausuferung für alle Wasserstände darstellt. Die Erfassung der Höhenlage erfolgte ebenfalls auf Basis der DGK5-Kartenschnitte. Nach Erfassung aller für den Modell Aufbau relevanten Höhendaten wurden diese mittels ArcGIS in ein flächenhaftes Raster überführt (Abb. 2). Bei den vorliegenden Daten wurde dabei eine Zellengröße von 5 x 5 m gewählt. Aufbauend auf dieser Datengrundlage wurde die Mittelachse der Strandseen erfasst (rot in Abb. 3). Diese dient im späteren Verlauf als Berechnungsachse, auf der die Querschnitte (blau in Abb. 3) angeordnet werden. Diese Mittelachse wurde ebenfalls für die Abläufe erstellt. Für die Abläufe der Strandseen wurden die gelieferten Querschnitte aus der vom LANU durchgeführten Vermessung übernommen. Für den Großen Binnensee wurden zusätzliche Peildaten (Peilung des Ablaufes) mit in das entsprechende Modell integriert.

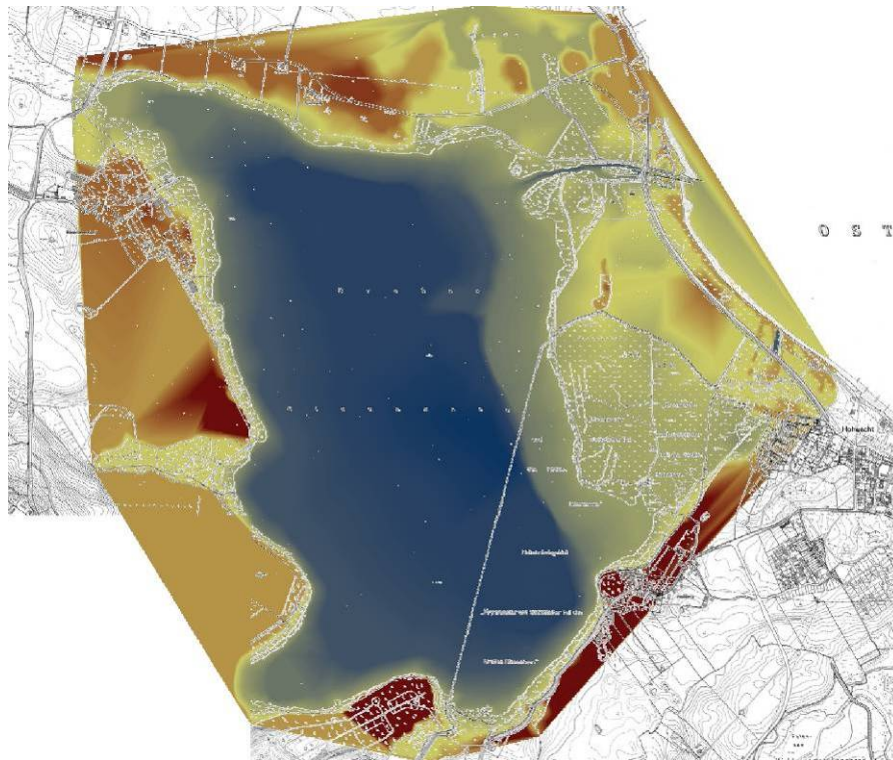


Abb. 2: Rasterdarstellung mit zugehörigen DGK 5 Kartenschnitten

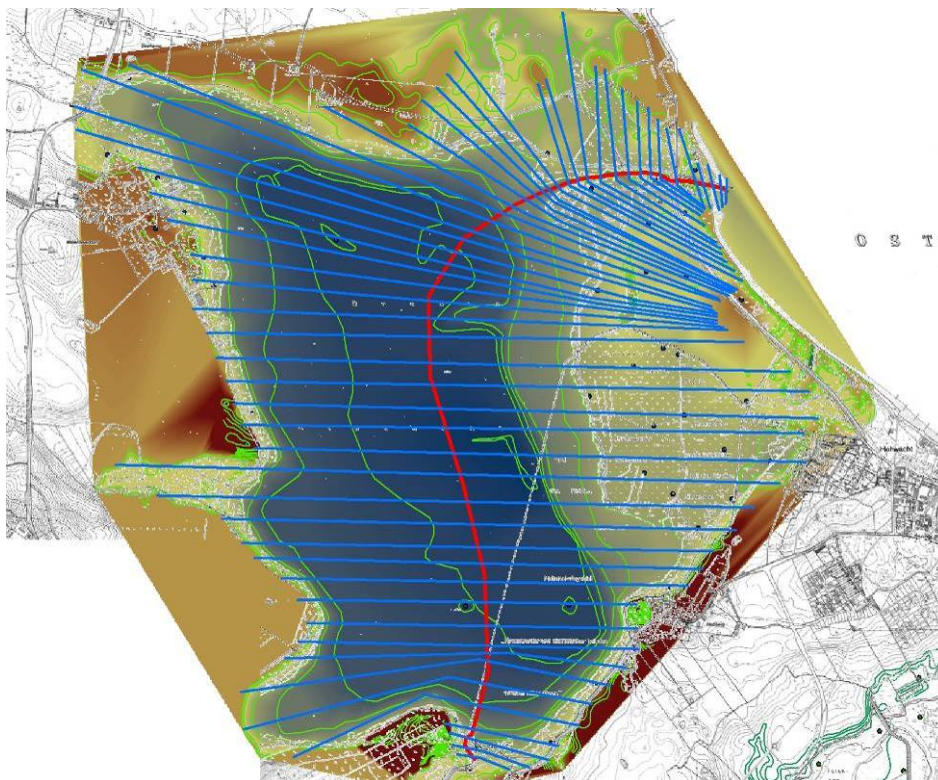


Abb. 3: Mittelsachse mit Querprofilen zur Abbildung der Seegeometrie

Die weiteren Schritte der Modellerstellung sind mit MIKE 11 und mit MIKE 11 GIS vorgenommen worden.

Für ein MIKE 11 Modell werden verschiedene Eingabedaten und Parameter benötigt. Basis der Simulation stellt eine alles umfassende Simulationsdatei (Abb. 4) dar. In ihr werden alle



weiteren Dateien miteinander verknüpft. In der Simulationsdatei wird der Simulationszeitraum festgelegt und alle Module bestimmt, die mit in die Berechnung einbezogen werden sollen. In diesem Fall handelt es sich um das Hydrodynamik und das Advektion - Dispersion Modul.

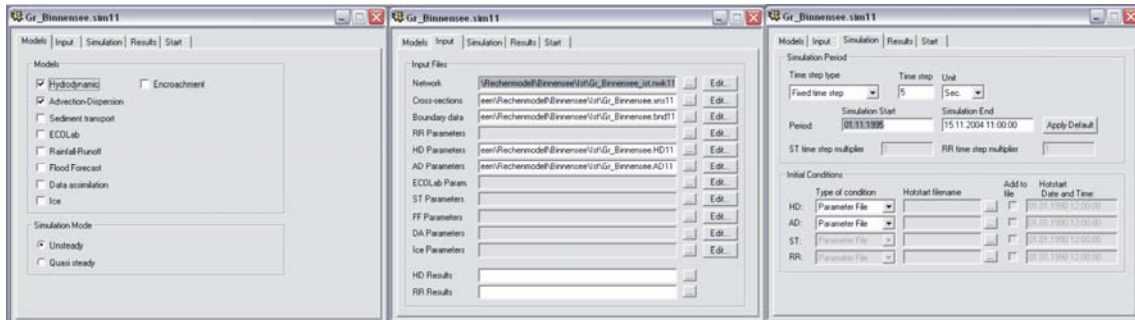


Abb. 4: Eingabemaske des Simulationsmaske

Im weiteren Verlauf muss eine Netzwerkdatei (Abb. 5) erstellt werden, die den Flussschlauch bzw. hier die See-Mittelachse abbildet. Zusätzlich enthält sie weitere Informationen über Bauwerke im Modell und deren eventuelle Steuerung. Auf die Besonderheiten der Einzelmodelle wird im späteren Verlauf eingegangen.

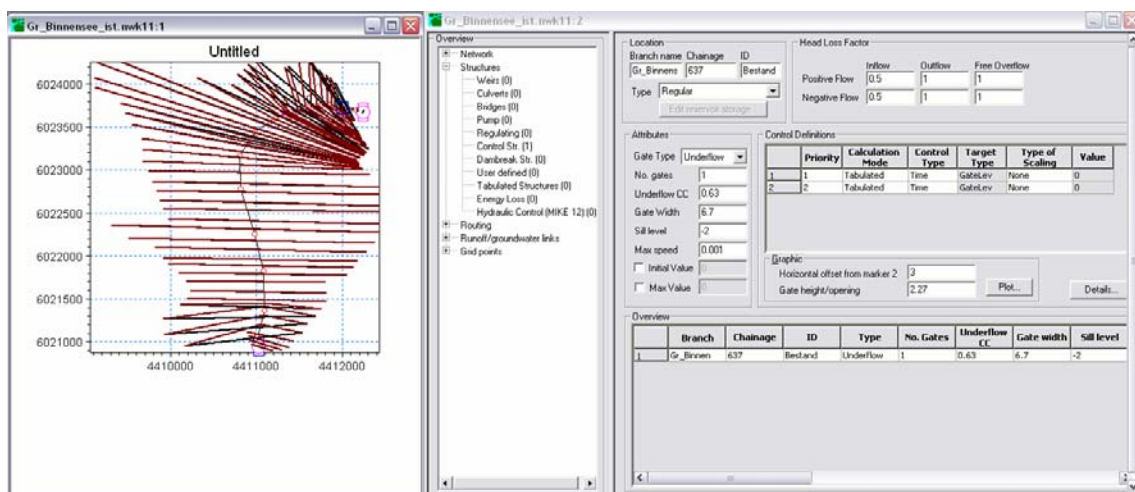


Abb. 5: Eingabemaske der Netzwerkdatei mit grafischer und tabellarischer Ansicht

Im Anschluss an die Erstellung der Netzwerkdatei muss eine Querschnittsdatei erstellt werden, die alle nötigen Informationen über das abzubildende Gelände enthält. Zur Erzeugung dieser Datei stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Die eine geht davon aus, dass die Querschnitte mittels Vermessung aufgenommen wurden und lagemäßig bekannt sind. Die bestehenden Informationen können dann direkt übertragen werden. In der anderen Variante werden die Querschnitte aus einem bestehenden Geländemodell ermittelt. In diesem Projekt kamen beide Varianten zum Einsatz. Die vom LANU gemessenen Querschnitte wurden direkt übernommen (Abb. 6).

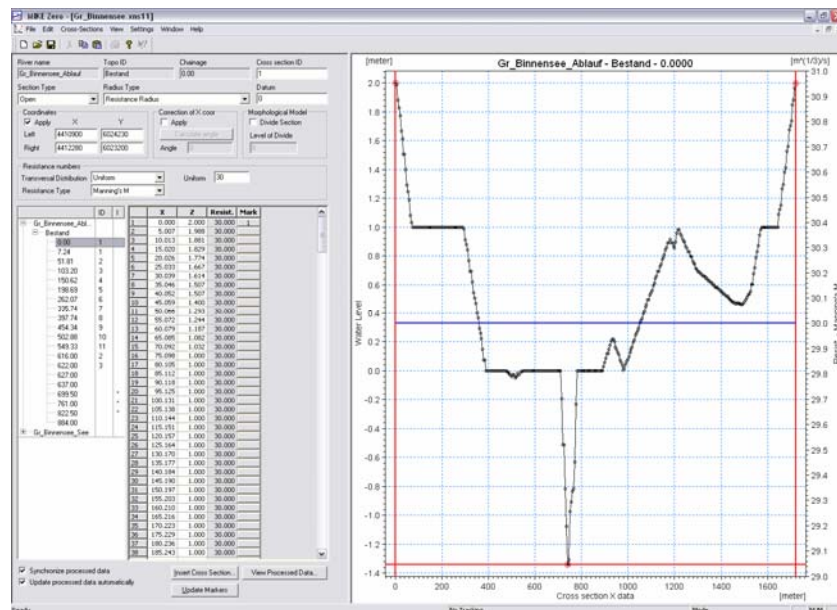


Abb. 6: Querschnittsdatei mit grafischer und tabellarischer Ansicht

Die zur Abbildung der Strandseen notwendigen Querschnitte wurden aus den Rastern ermittelt. Nach dem Import des Rasters in MIKE 11 GIS wurde die Mittelachse mit eingeladen. Diese dient als Grundlage zur Bestimmung der Lage im Strandsee. Im weiteren Verlauf wurden regelmäßig Querschnitte angeordnet (Abb. 7). Die Höhe der Querschnitte wird aus dem digitalen Geländemodell übernommen. Das gleiche gilt für die geografische Lage der Querschnitte.

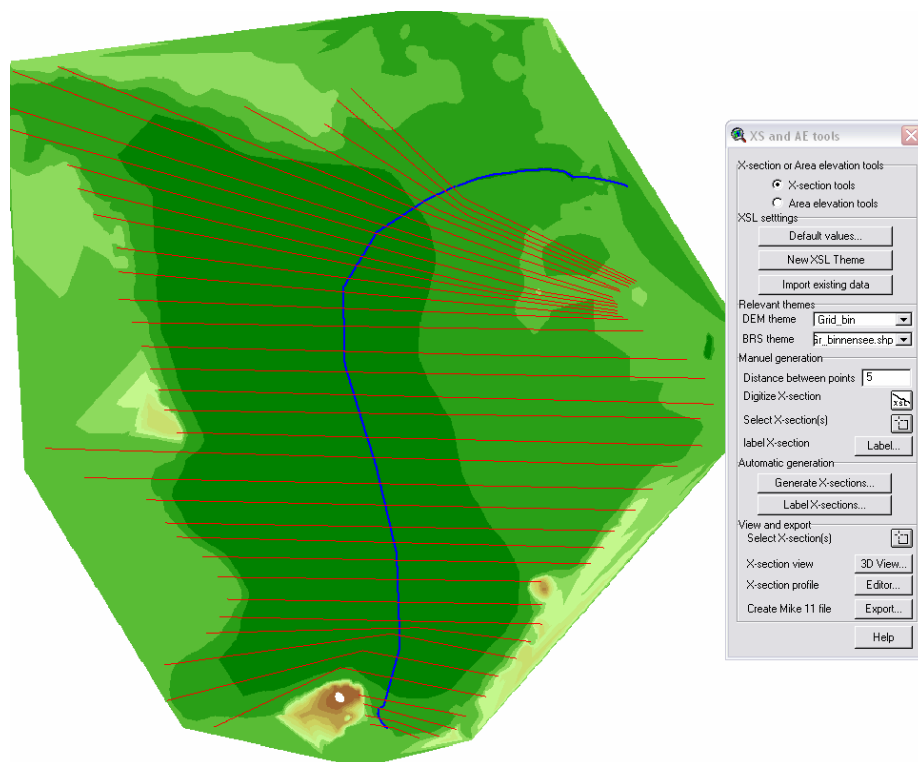


Abb. 7: Erstellen von Querschnitten mit MIKE 11 GIS



Im Anschluss an die Erstellung der Querschnittsdatei werden noch Randbedingungen zum Betrieb des Hydrodynamischen Modells und des Advektion – Dispersion Modells benötigt. Dabei handelt es sich am oberen Modellrand um einen Zufluss und einen Salzgehalt und an der unteren Modellgrenze um einen Wasserstand und einen Salzgehalt. Diese werden als instationäre Zeitreihen eingelesen.

Für den Betrieb des Modells fehlen nun noch spezifische Parameter, die das Strömungsverhalten und die Startbedingungen definieren. So wird in der Hydrodynamikdatei festgelegt, mit welchem Startwasserstand und -durchfluss die Rechnung gestartet wird. Für alle Modelle wurde hier der Startwasserstand aus den Wasserstandsganglinien entnommen

In der Advektion - Dispersion Datei werden die Parameter für die Austauschgeschwindigkeit des Salzgehaltes und ebenfalls die Startbedingungen festgelegt. Als Austauschkoeffizient wurde für alle Modelle ein Koeffizient von $2,5 \text{ [m}^2/\text{s]}$ gewählt, der eine mittlere Austauschgeschwindigkeit und einen für die Gegebenheiten angemessenen Wert darstellt. Als Startsalzgehalt wurde für den kompletten See der Salzgehalt aus dem Zufluss verwendet.

3 GROßER BINNENSEE

3.1 Allgemein

Das Modell Großer Binnensee wurde anhand der in Kapitel 2 beschriebenen Arbeitsschritte erstellt. Der See hat eine Fläche von 4,78 km² und ein Volumen von 9.020.000 m³ bei -0,10 mNN laut Bericht „Seen an der Nord- und Ostseeküste“. Bei der Volumenkontrolle des auf Basis des in Abb. 9 dargestellten Tiefenplans erstellten Geländemodells ergibt sich ein Volumen von 9.301.344 m³. Das entspricht einer Abweichung von rund 3,1 %. Dabei muss berücksichtigt werden, dass im aufgebauten Geländemodell der Ablauf mit inbegriffen ist und keine genaue Abgrenzung zwischen See- und Ablaufkanalfläche gezogen werden kann. Bei der Volumenkontrolle ist daher ein kleiner Teil des Ablaufes mit enthalten. Für den Betrieb des Modells ist das eine ausreichend genaue Abbildung der Geometrie.



Abb. 8: Wehranlage im Auslauf des Großen Binnensee

Als Regelwerksbauwerk dient eine Wehranlage in einem Deichbauwerk (Abb. 8). Die Wehranlage wird von einem ortsansässigen Hafenmeister gesteuert. Das zu erreichende Steuerziel sieht eine maximale Sielleistung vor. Sobald der Binnenwasserstand den Außenwasserstand übersteigt wird die Sielanlage geöffnet. Kommt es zu einer Kenterung wird das Wehr wieder geschlossen. Diese Art der Steuerung beherbergt für die Modellierung jedoch eine Fehlerquelle, da sie nicht automatisch erfolgt und von der Reaktionszeit, bzw. vom Handlungsverhalten des Steuernden abhängt. Die Abmessungen der Wehranlage sind in Tab. 1 aufgeführt. Bei der Modellierung erfolgt die Steuerung mittels Steuerstrategien. Diese sind direkt an Steuerwasserstände gebunden und reagieren somit direkt auf Wasserstandsänderungen. Somit kann es bei der Simulation des Ist-Zustandes zu Abweichungen kommen, die aus der beschriebenen Tatsache resultieren.

Tab. 1: Bauwerksabmessungen Großer Binnensee

Bauwerksart	Anzahl Öffnungen	Breite [m]	Höhe [m]	Sohlhöhe [mNN]
Unterströmtes Wehr	2 als 1 modelliert	6,70	2,27	-2,00



Als Startparameter sind die zu diesem Zeitpunkt vorherrschenden Wasserstände und Salzgehalte an den Modellrändern, dem See und dem Ablauf zur Ostsee verwendet worden.

Großer Binnensee

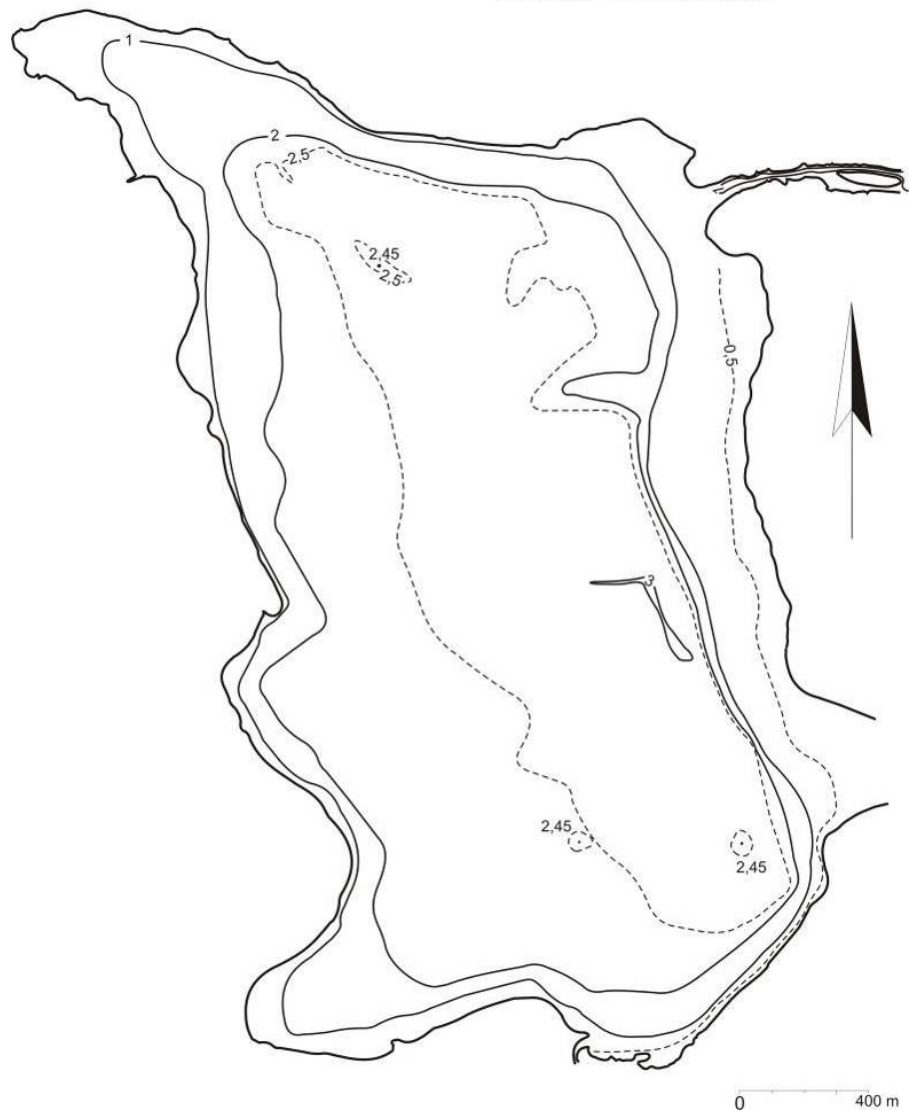


Abb. 9: Tiefenplan Großer Binnensee

3.2 Randbedingungen Großer Binnensee

Die Randbedingungen für den Großen Binnensee wurden, wie in Kapitel 2 beschrieben, in Zeitreihen für die obere und die untere Modellgrenze unterteilt. Am oberen Modellrand wurde eine Zufluss- und eine Salzgehaltszeitreihe benötigt, am unteren eine Wasserstands- und ebenfalls eine Salzgehaltsganglinie. Aus der Regionalisierung der Abflüsse lassen sich für jedes Teileinzugsgebiet, und somit auch für den Pegelstandort und den Zufluss, die statistischen Hauptwerte MNQ, MQ, MHQ angeben. Anhand dieser Hauptwerte findet eine Übertragung der Ganglinie des Pegels Kossau auf den Zufluss anhand der vom LANU zur Verfügung gestellten Formeln statt. Die Formeln zur Berechnung der Zuflussganglinien lauten:

Für $Q \geq MQ$:

$$Q_2 = \frac{(Q_K - MQ_K)}{(MHQ_K - MQ_K)} \cdot (MHQ_2 - MQ_2) + MQ_2$$

Für $MNQ < Q < MQ$:

$$Q_2 = MQ_2 - \frac{(MQ_K - Q_K)}{(MQ_K - MNQ_K)} \cdot (MQ_2 - MNQ_2)$$

Für $Q < MNQ$:

$$Q_2 = Q_K \cdot \frac{MNQ_2}{MNQ_K}$$

Die Formeln wurden vom LANU geliefert und die damit erzeugten Randbedingungen geprüft. Der Zufluss zum Großen Binnensee wurde aus dem Pegel der Kossau ermittelt. Da der Pegel nicht direkt am Einlauf des Sees liegt, wurde zusätzlich zur Ganglinie der Abfluss aus den Einzugsgebieten zwischen See und Pegel addiert. Dies stellt eine gewisse Unsicherheit dar, ist aber für die zu untersuchende Aufgabenstellung ein ausreichend genauer Ansatz (Primär werden die Salzgehalte und nicht die Wasserstände betrachtet). Am unteren Rand wurde die Wasserstandsganglinie und die Salzgehalts-ganglinie des nächstliegenden Ostseepegels verwendet.

Des Weiteren musste die Salzgehaltsmessung an der Messstelle Süderfahrt verlängert werden, da die gelieferten Daten nicht den kompletten Simulationszeitraum abdeckten. Für die Verlängerung wurden in Absprache mit dem LANU die Salzgehaltmessungen mit den an der Messstelle vorhandenen Daten ergänzt. Dies zeichnet sich in einer Periodizität der Zeitreihe ab (Abb. 11). Eine direkte Auswirkung hat diese Verlängerung auf die Simulation des Ist-Zustandes, der dadurch vom gemessenen Ist-Zustand abweichen kann. Im Weiteren Verlauf werden die Berechnungsergebnisse immer in Relation zum simulierten Ist-Zustand gesetzt. Da alle Simulationen auf den gleichen Randbedingungen basieren und sich nur durch die Steuervarianten unterscheiden, kann direkt die Auswirkung der Steuerung auf den Salzgehalt als Ergebnis entnommen werden.

Die nachfolgenden Abb. 10 bis Abb. 13 sind die für das Modell Großer Binnensee verwendeten Zeitreihen.

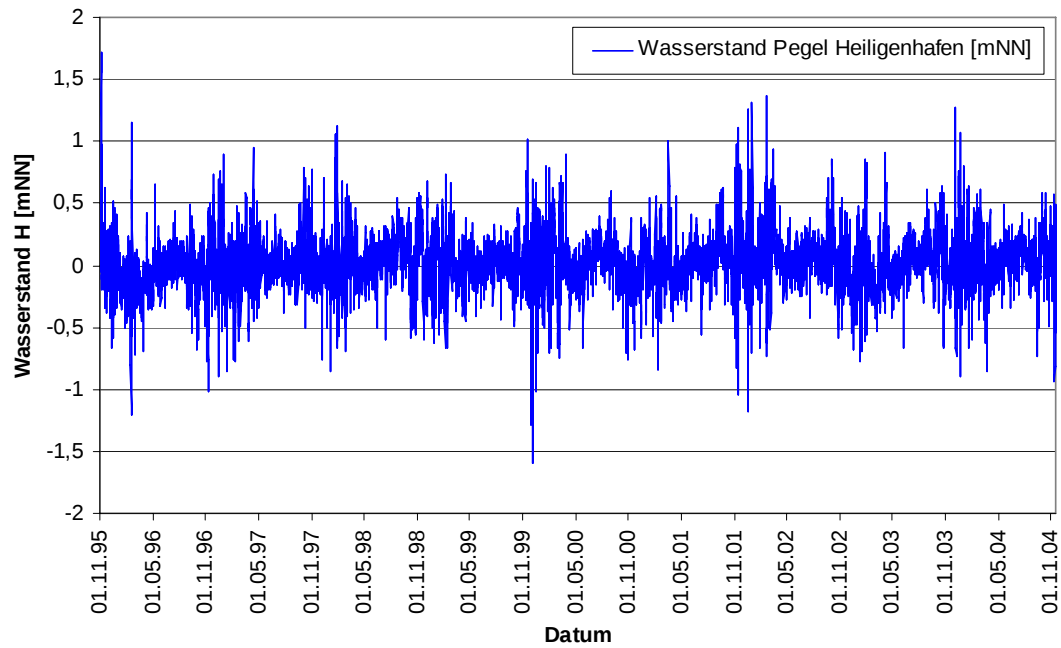


Abb. 10: Untere Randbedingung Gr. Binnensee Wasserstand Pegel Heiligenhafen

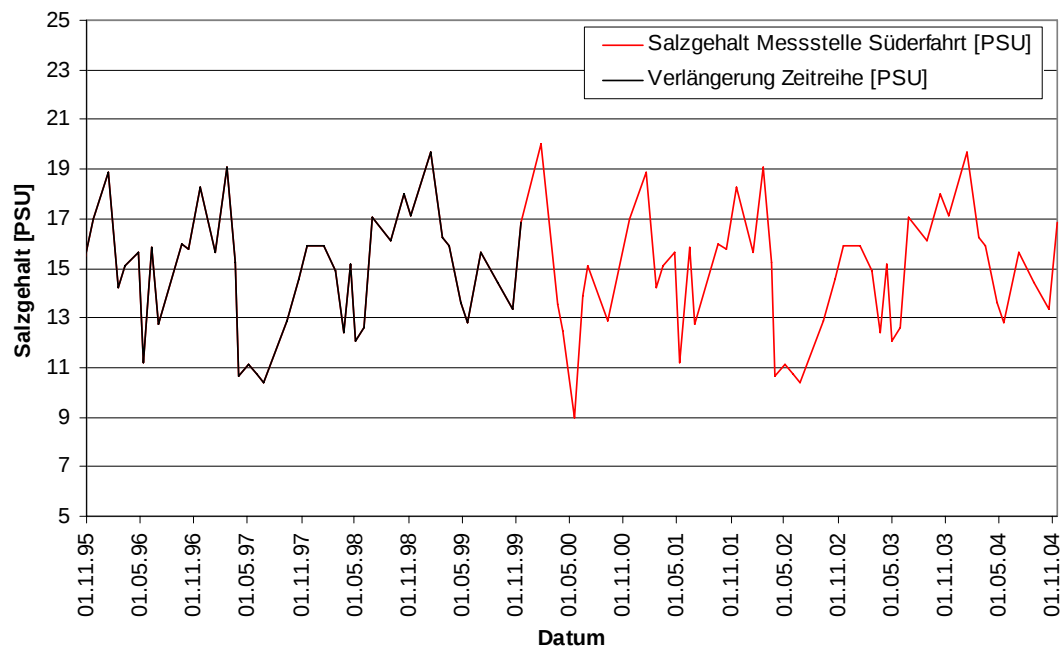


Abb. 11: Untere Randbedingung Gr. Binnensee Salzgehalt Messstelle Süderfahrt

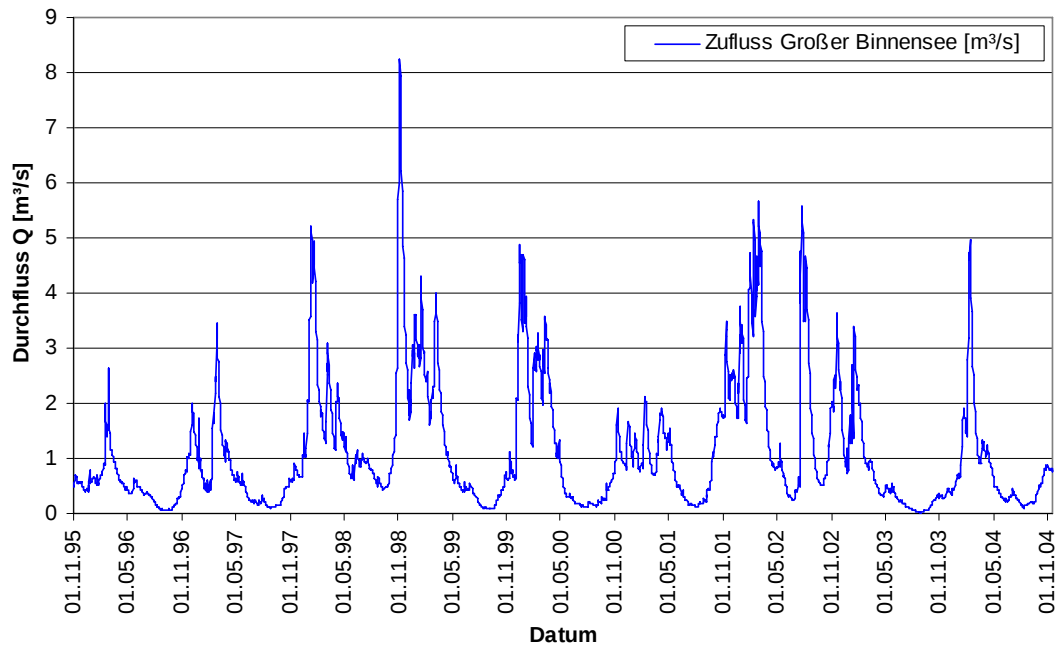


Abb. 12: Obere Randbedingung Zufluss Gr. Binnensee

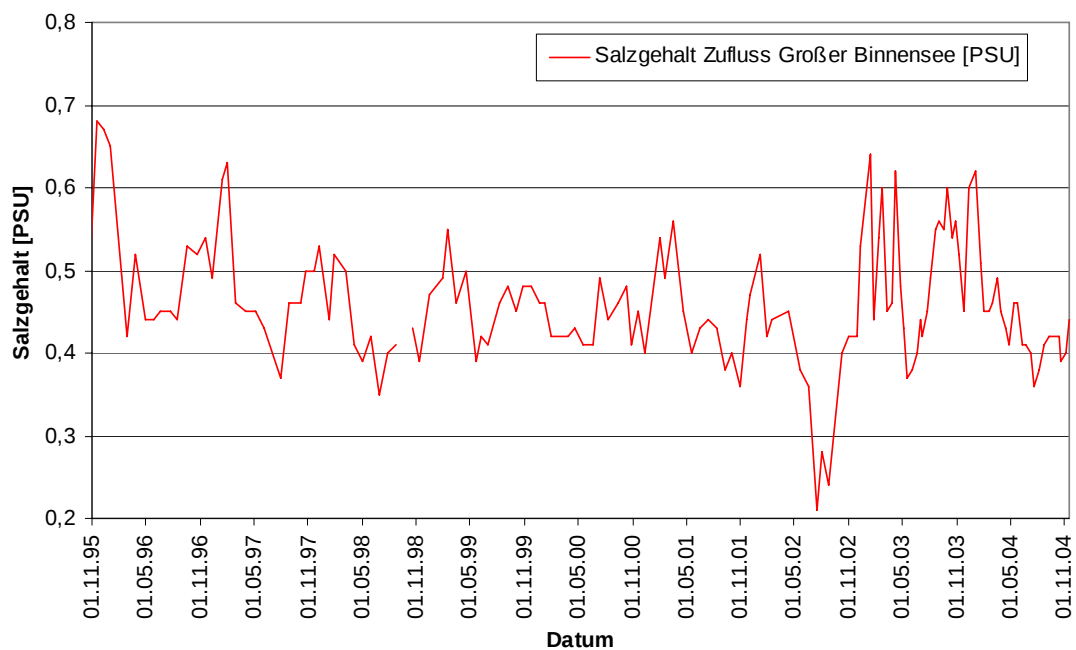


Abb. 13: Obere Randbedingung Salzgehalt Zufluss zum G. Binnensee

3.3 Simulation Ist-Zustand

Für die Simulation des Ist-Zustandes wurde das bestehende Wehr wie in Kap. 3.1 beschrieben gesteuert. Die durch diese Steuerung simulierte Wasserstandsganglinie ist in Abb. 14 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die simulierten Wasserstände zu Beginn der Simulation nahe denen der Messung sind. Im weiteren Verlauf kommt es jedoch zu größeren Abweichungen von bis zu 30 cm. Dies resultiert aus der beschriebenen Steuerung, die eine maximale Sielleis-



tung vorsieht. Im Modell wird dies über Kontrollpunkte überwacht, an denen die innen- und außenseitigen Wasserstände überwacht werden und ein sofortiges Schließen bzw. Öffnen sofort gewährleisten. Das heißt, sobald der Innenwasserstand den Außenwasserstand übersteigt, wird das Wehr geöffnet. Geschlossen wird es, wenn der Binnenwasserstand niedriger ist als der Ostseewasserstand. In der realen Steuerung ist dies von der Handlungsweise des Hafenmeisters und dessen Reaktionszeit abhängig. So kann es sein, dass der Hafenmeister bei Windstau in Richtung See das Wehr geöffnet hat, währenddessen es in der Simulation geschlossen war. So entfernen sich die gemessene und simulierte Wasserstandsganglinie voneinander, sobald einmal andere Binnenwasserstände im See erreicht werden, da die Steuerung von Innen- und Außenwasserstand abhängt.

Des Weiteren kann es zu Abweichungen kommen, da zu Simulationsbeginn der Ostseewasserstand für den See angenommen wurde. Es lagen keine Messwerte für den Simulationsbeginn vor. Die Simulation der Optimierung basiert auf den gleichen Rand- und Startbedingungen wie der modellierte Ist-Zustand. Im Simulationsverlauf der Optimierung gleicht sich der Wasserstand im See an die vorgegebenen Grenzwerte (Steuerwasserstände) an. Diese werden durch die Steuerstrategie vorgegeben.

Würde als Ausgangssituation der aufgetretene Ist-Zustand zugrunde gelegt werden und der Steuerstrategie (der Optimierung) unterworfen, so würde sich auch hier der Wasserstand im See an die vorgegebenen Grenzwerte annähern.

Der simulierte und gemessene Ist-Zustand verhält sich hier anders. Die Steuerung ist auf eine maximale Sielleistung ausgelegt. Ein zu niedriger Startwasserstand kann nur durch einen erhöhten Zufluss ausgeglichen werden, da ein Einstrom in den Strandsee durch die vorgegebene Steuerung nicht möglich ist.

Abweichungen zwischen simulierten Wasserstand und Ist-Wasserstand haben keine Auswirkungen auf die Salzgebhaltsberechnung in der Optimierung. Für diese Szenarien erfolgt die Steuerung anhand von Wasserstandsgrenzwerten in den Seen. Die Bauwerkssteuerung anhand dieser Werte führen dazu, dass sich der Seewasserstand an die Grenzwerte angleicht. Der Zeitpunkt des Erreichens des Optimierungswasserstandes hängt davon ab, wie weit die Ausgangszustände davon entfernt sind.

Salzgehalte benötigen länger für die Angleichung, da hierfür entsprechend häufig, größere salzhaltige Ostseewassermengen zufließen müssen.

Eine weitere Fehlerquelle für den Wasserstandsunterschied zwischen gemessenem und simulierten Ist-Zustand, kann in diesem Fall auch die unsichere Zuflussrandbedingung sein, die einen zu geringen oder zu großen Zufluss liefert.

Lägen genaue Wehrstellungen vor, so könnte eine genauere Steuerung erfolgen und die Wasserstände besser nachsimuliert werden. Ebenso würden genaue Startwasserstände im See die Genauigkeit des Modells steigern

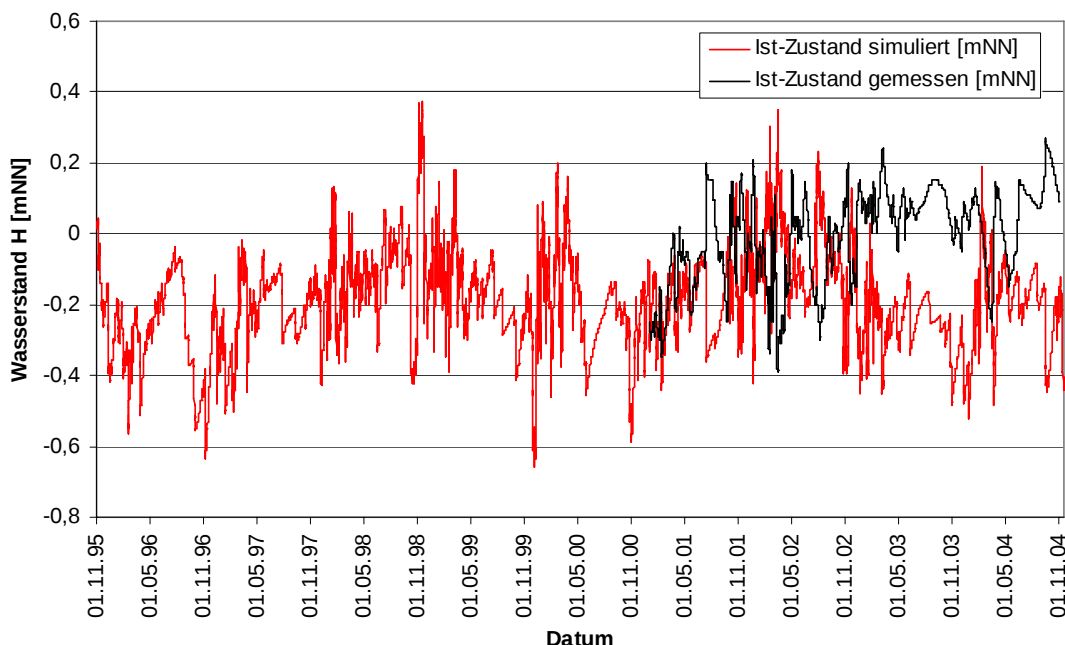


Abb. 14: Vergleich gemessener und simulierter Wasserstand (Gr. Binnensee)

Für alle Strandseen wurde die Salzgehaltsauswertung an 4 Stellen durchgeführt. Dabei handelt es sich um den Zulauf, die tiefste Stelle des Sees, den Übergang zum Ablauf und um den gemittelten Salzgehalt aus den drei vorher beschriebenen Orten unter Berücksichtigung der Volumina. So wurden die Zu- und Abläufe mit jeweils 10 % und die tiefste Stelle mit 80 % gewichtet. Dies ist für alle Seen eine gute Berücksichtigung der Volumen und spiegelt ein vollkommen durchmisches System wieder. Nur für den Großen Binnensee sind alle Grafiken im Hauptbericht dargestellt. Im weiteren Verlauf des Berichtes wird die Auswertung im Bericht an der tiefsten Stelle ausgeführt. Die weiteren Ganglinien befinden sich im Anhang. Die Ergebnisse werden jedoch im Bericht direkt tabellarisch erfasst.

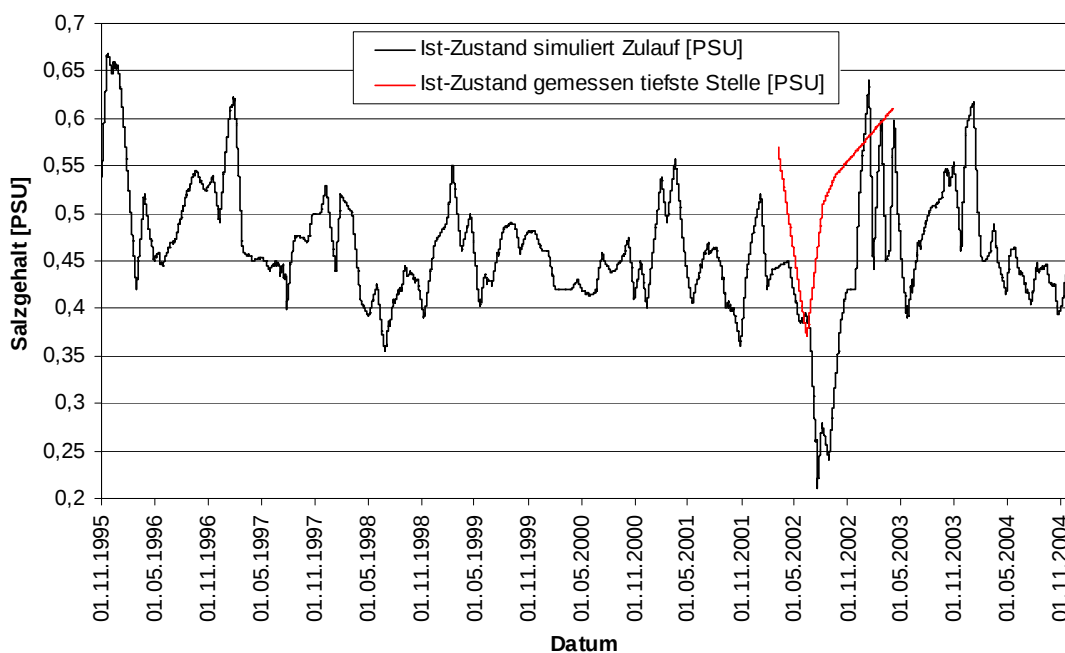


Abb. 15: Vergleich gemessener (tiefste Stelle) und simulierter (Zulauf) Salzgehalt (Gr. Binnensee)



Bei der Simulation des Ist-Zustandes fällt auf, dass der simulierte Salzgehalt zum Teil geringer ausfällt als der gemessene und zum Teil den gemessenen übersteigt. Dies kann aus der Startbedingung der Simulation resultieren, da als Startwert der Salzgehalt des Sees dem Zufluss gleichgesetzt wurde, da keine Angaben über den Salzgehalt zu diesem Zeitpunkt vorlagen.

Alle folgenden Simulationen bauen jedoch auf den gleichen Startwerten auf und gewährleisten somit eine Vergleichbarkeit der Berechnungsergebnisse. Dieses Verhalten ist an jedem Auswertungspunkt zu erkennen (Abb. 15 bis Abb. 18).

Des Weiteren kann es zu einer Abweichung kommen, da es sich bei der Simulation um über den Querschnitt gemittelte Salzgehalte handelt und nicht um Salzgehalte, die in einer bestimmten Tiefe gemessen wurden.

Ein weiterer Faktor für eine Abweichung resultiert daraus, dass die Salzgehaltsmessungen nur an 5 Tagen durchgeführt wurden und zwischen den Stützpunkten linear interpoliert wurde. Der Vergleich findet somit zwischen einer kontinuierlich berechneten Salzgehaltsentwicklung und einer aus 5 Stützpunkten ermittelten Ganglinie statt.

Generell ist festzustellen, dass es sich um Abweichungen im Zehntel PSU-Bereich handelt, währenddessen die PSU Konzentrationen im ungestörten Zustand Werte von bis zu 22 [PSU] erreicht.

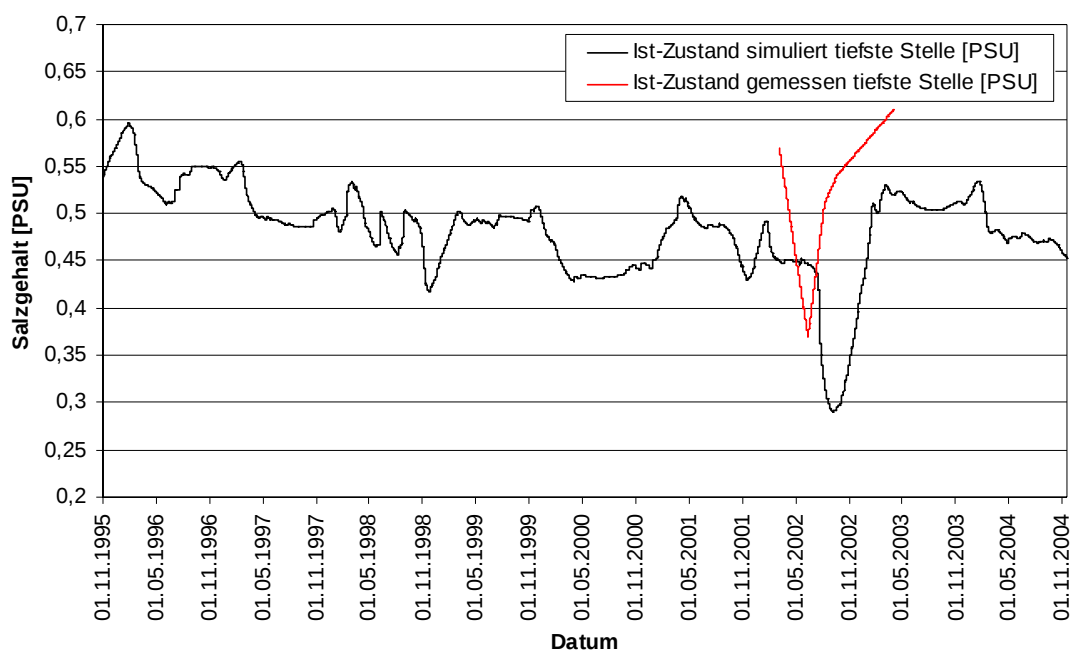


Abb. 16: Vergleich gemessener (tiefste Stelle) und simulierter (tiefste Stelle) Salzgehalt (Gr. Binnensee)

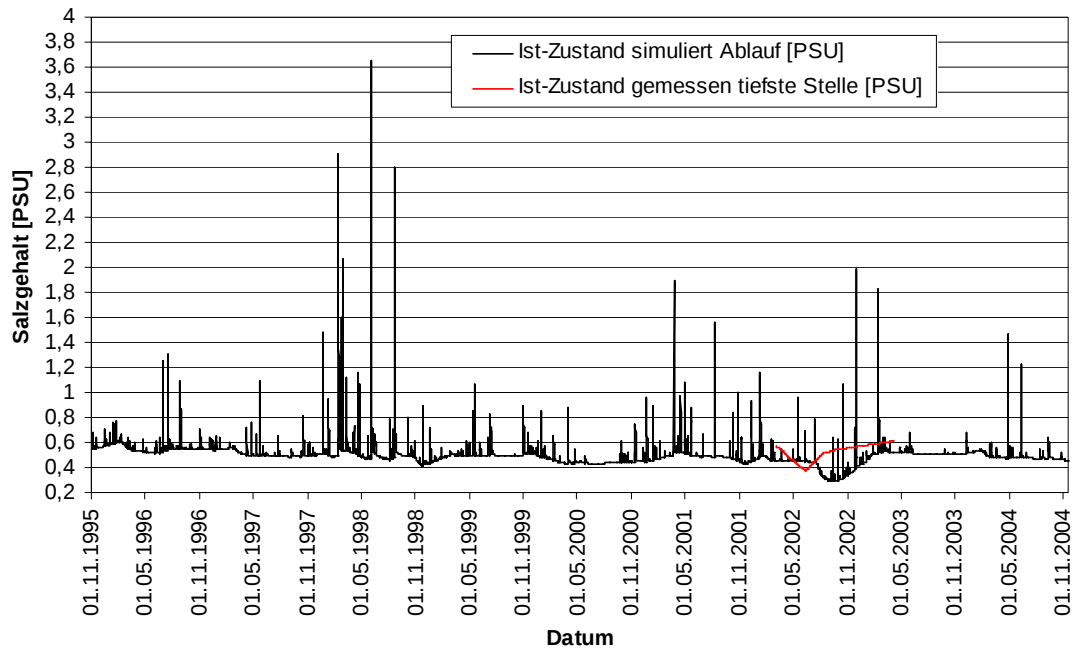


Abb. 17: Vergleich gemessener (tiefste Stelle) und simulierter (Ablauf) Salzgehalt (Gr. Binnensee)

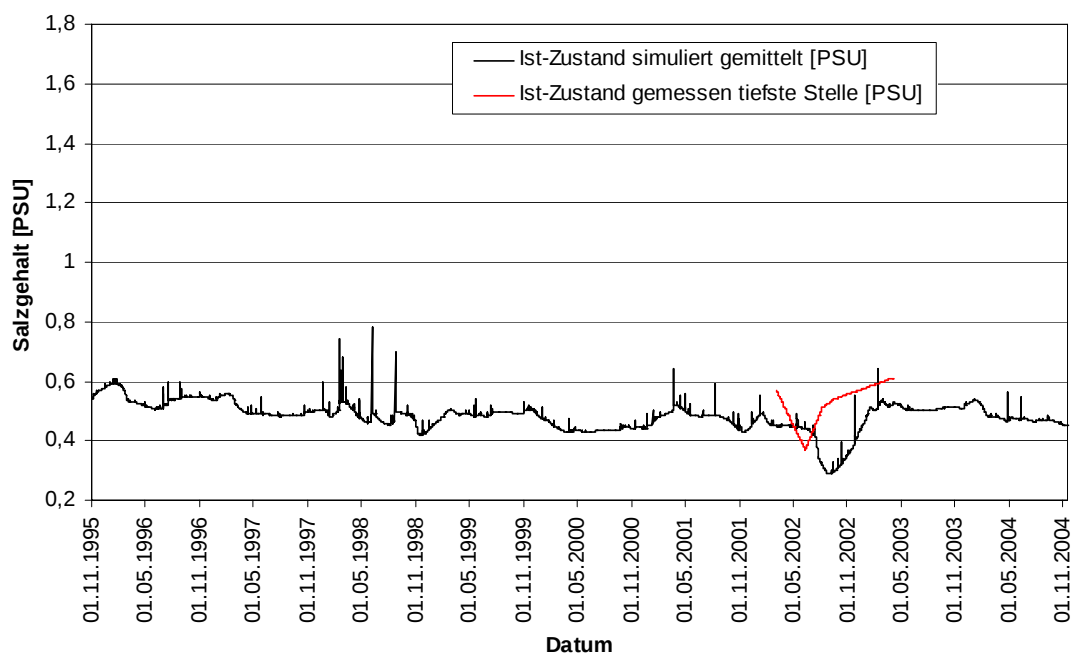


Abb. 18: Vergleich gemessener (tiefste Stelle) und simulierter (gemittelt) Salzgehalt (Gr. Binnensee)

3.4 Simulation ungestörte Bedingungen

Bei der Berechnung des ungestörten Zustandes wurden alle Bauwerke als komplett geöffnet angesehen, da die Geometrie der Bauwerke als limitierender Faktor dienen sollte. Wären die Bauwerke komplett entnommen worden, so wäre die Entwicklung des Salzgehaltes nicht direkt auf die Steuerung zurückzuführen.

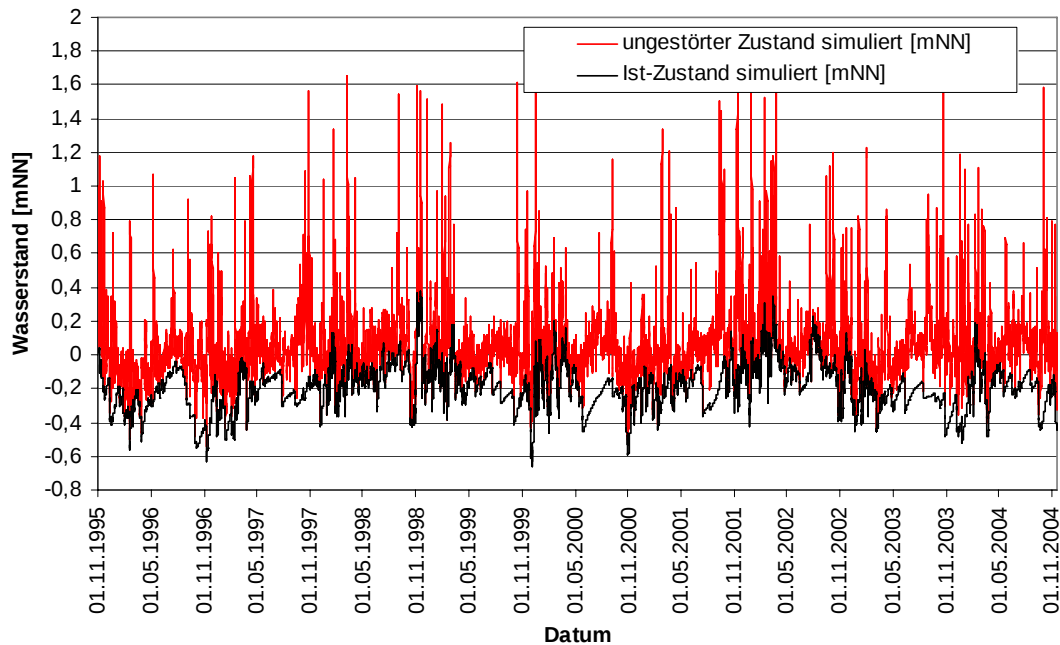


Abb. 19: Vergleich der Wasserstände ungestörter- und Ist-Zustand (Gr. Binnensee)

Tab. 2: Wasserstandsentwicklung im Ist- und ungestörten Zustand (Gr. Binnensee)

Variante	Mittelwert Wasserstand [mNN]	Maximalwert Wasserstand [mNN]
Ist-Zustand	-0,19	0,38
ungestörter Zustand	-0,13	1,74

In Tab. 2 sind die mittleren und maximalen Wasserstände aufgeführt. Es ist zu erkennen, dass durch die komplette Öffnung des Bauwerkes der Seewasserstand im Mittel um 6 cm ansteigt. Dies ist auch dem Verlauf der Wasserstandsganglinie in Abb. 19 zu entnehmen.

Der maximale Wasserstand, der im Simulationszeitraum erreicht wurde, beträgt 1,74 mNN und liegt somit um 1,36 m höher als der maximale Wasserstand im simulierten Ist-Zustand. Dies resultiert aus der direkten Kommunikation der Wasserstände der Ostsee und des Großen Binnensees.

Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, wie wichtig der Einfluss der Wehranlage für die Hochwassersicherheit im Binnenland ist.

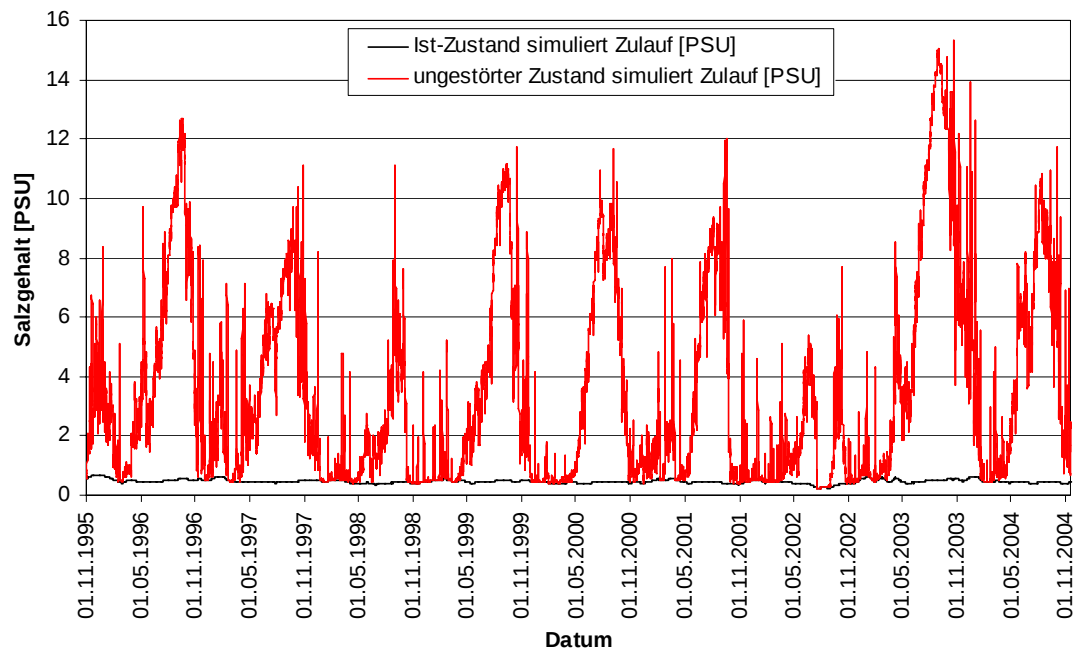


Abb. 20: Vergleich der Salzgehalt ungestörter- (Zulauf) und Ist-Zustand (Zulauf) (Gr. Binnensee)

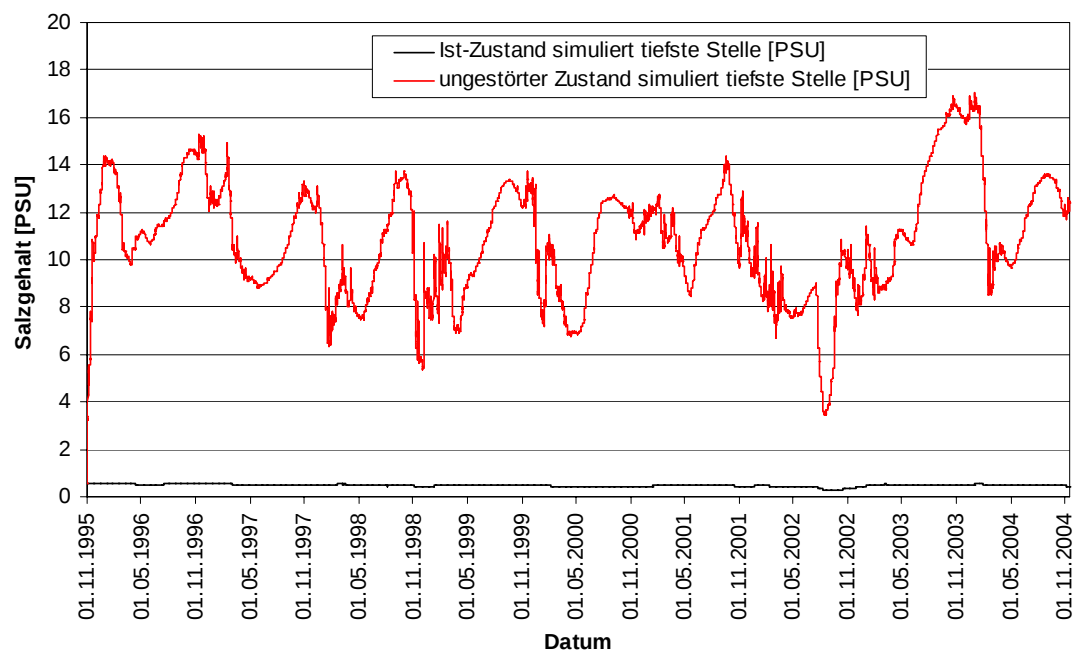


Abb. 21: Vergleich der Salzgehalt ungestörter- (tiefste Stelle) und Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Gr. Binnensee)

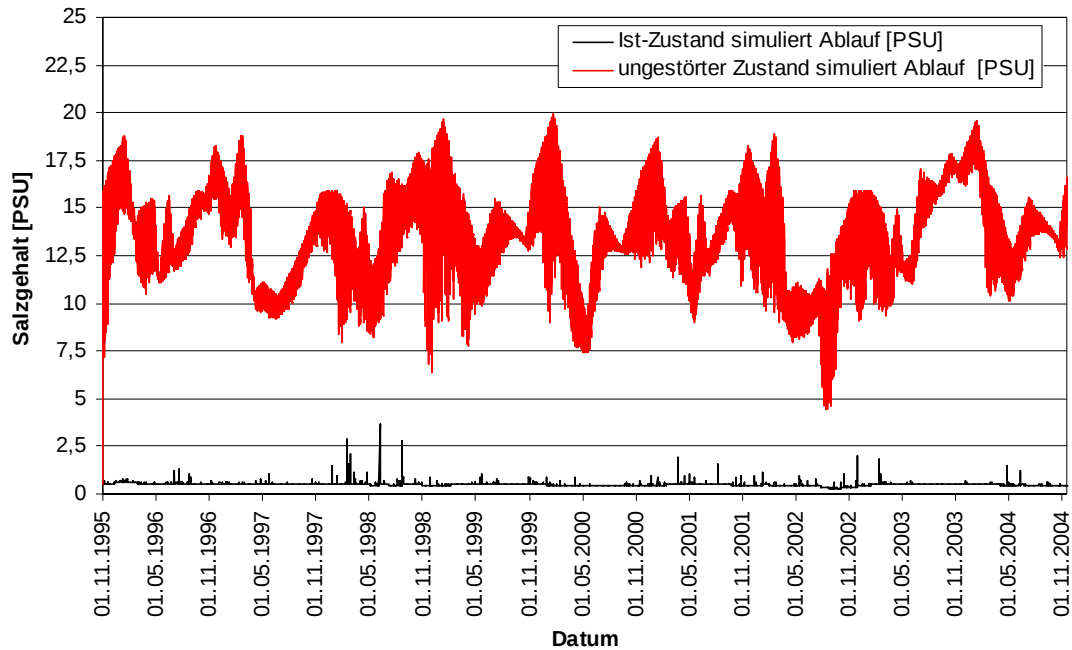


Abb. 22: Vergleich der Salzgehalt ungestörter- (Ablauf) und Ist-Zustand (Ablauf) (Gr. Binnensee)

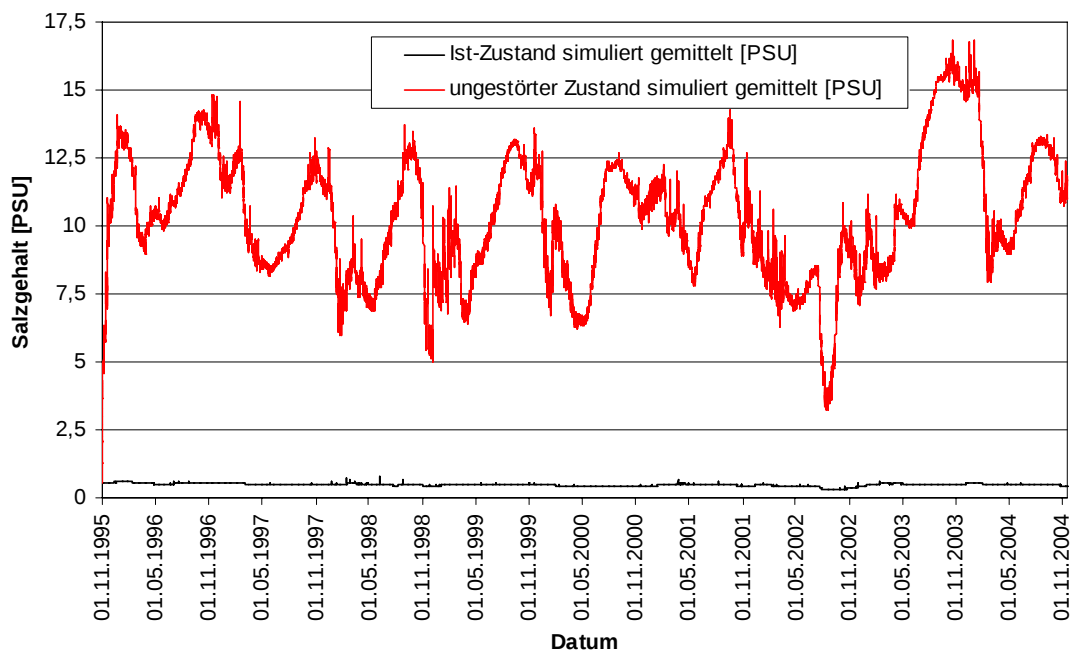


Abb. 23: Vergleich der Salzgehalt ungestörter- (gemittelt) und Ist-Zustand (gemittelt) (Gr. Binnensee)

Der Tab. 3 ist zu entnehmen, dass sich der Salzgehalt im Großen Binnensee unter ungestörten Bedingungen wieder an den Ostsee Salzgehalt anpasst und die Versüßung des Großen Binnensees wieder aufgehoben wird. Dieser Prozess ist an allen Auswertepunkten zu erkennen. So steigt der mittlere Salzgehalt an der tiefsten Stelle von 0,48 PSU auf 10,82 PSU an und es wird ein maximaler Wert an der tiefsten Stelle im See von 17,07 PSU erreicht. Die generelle

Anhebung des Salzgehaltes ist ebenfalls den Abb. 20 bis Abb. 23 zu entnehmen. Die Widerversalzung ist ungefähr nach zwei Monaten abgeschlossen.

Tab. 3: *Vergleich der mittleren und maximalen Salzgehalte für den Ist- und ungestörten Zustand (Gr. Binnensee)*

	Variante	Mittelwert [PSU]	Maximalwert [PSU]
tiefste Stelle	Ist-Zustand	0,48	0,60
	ungestörter Zustand	10,82	17,07
Zulauf	Ist-Zustand	0,46	0,67
	ungestörter Zustand	3,52	15,34
Ablauf	Ist-Zustand	0,50	3,65
	ungestörter Zustand	13,07	19,95
gemittelt	Ist-Zustand	0,48	0,78
	ungestörter Zustand	10,32	16,84

3.5 Simulation optimierter Sielbetrieb

Beim optimierten Sielbetrieb wurde die Steuerung dahingehend verändert, dass die Öffnungszeiten des Wehres in Abhängigkeit zu den Seewasserständen gesetzt wurden. Da die Optimierung unter Berücksichtigung der jetzigen Nutzung erfolgen sollte, wurden Seewasserstände festgelegt, die nicht überschritten werden sollten. Für den Großen Binnensee sollten von November bis April die Seewasserstände nicht über 0,25 mNN liegen und in der Zeit von Mai bis Oktober nicht über 0,20 mNN. In der Variante I wurden daher diese Wasserstände als Regelwasserstände verwendet.

Die Wehranlage war daher immer geöffnet, solange der Seewasserstand die Grenzwerte unterschritt. Somit war ein maximaler Salzgehaltsaustausch unter Berücksichtigung der jetzigen Nutzung möglich.

Das Ergebnis ist in Abb. 24 (Var. I), Abb. 29 (Var. II) und Tab. 4 dargestellt. Zu erkennen ist, dass für die Variante I die Grenzwerte zu häufig überschritten wurden. Daher wurde eine zweite Variante berechnet, die von November bis April Regelwasserstände von -0,05 mNN und in der Zeit von Mai bis Oktober Regelwasserstände von -0,10 mNN vorsah. Bei der Auswertung ist klar ersichtlich, dass die Nutzungswasserstände bis auf einige Ausnahmen eingehalten wurden. Die Überschreitung der Wasserstände fand jedoch auch im Referenzzustand statt, so dass von einer Einhaltung der Optimierungsbedingung gesprochen werden kann.

Bei der Betrachtung der Salzgehalte wird aus oben genannten Gründen nur auf die Variante zwei eingegangen. Die Ergebnisse der Variante I sind jedoch den Abb. 25 bis Abb. 28, Tab. 4 und Tab. 5 zu entnehmen.

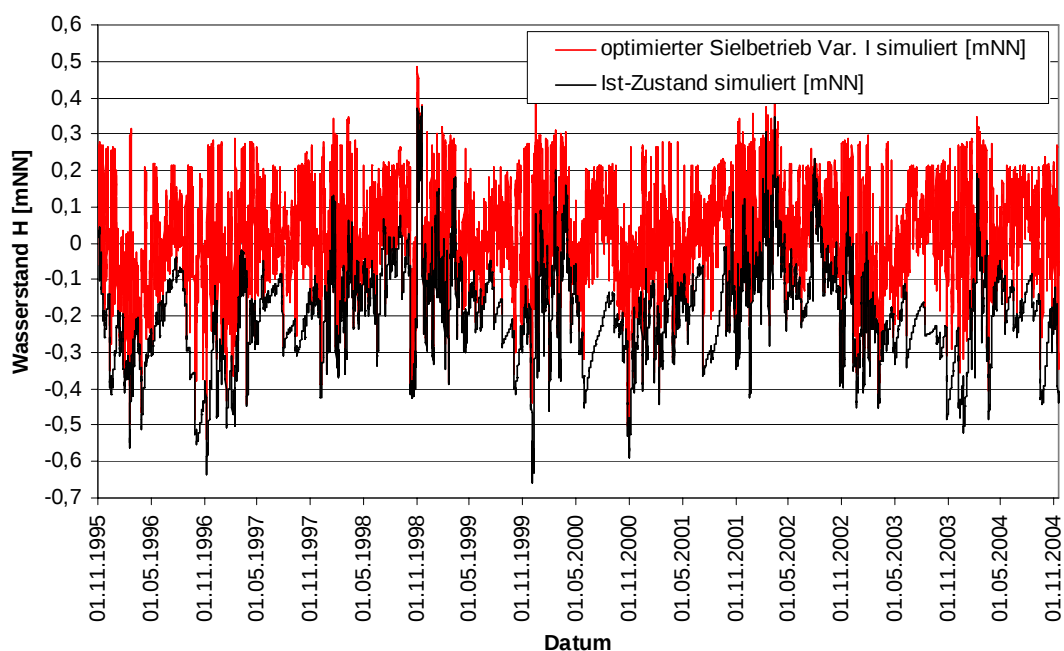


Abb. 24: Vergleich der Wasserstände optimierter Sielbetrieb Var. I und Ist-Zustand (Gr. Binnensee)

Tab. 4: Wasserstandsentwicklung für die Variantenrechnung (Gr. Binnensee)

	Mittelwert Wasserstand [mNN]	Maximalwert Wasserstand [mNN]
Ist-Zustand	-0,19	0,38
ungestörter Zustand	-0,13	1,74
optimierter Sielbetrieb Var. I	-0,11	0,48
optimierter Sielbetrieb Var. II	-0,18	0,43

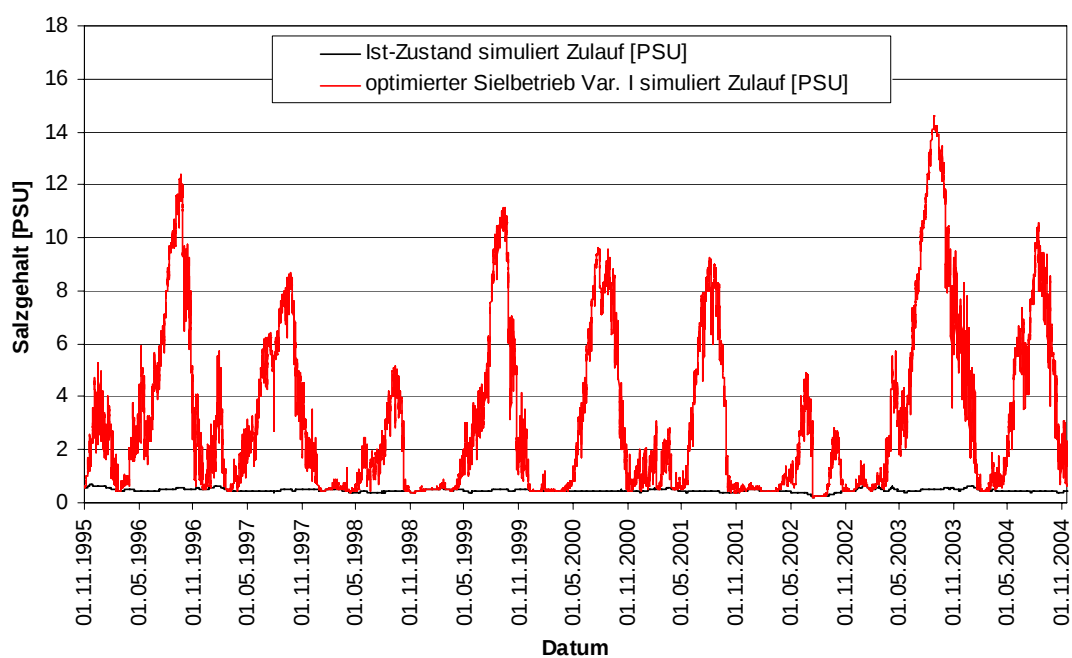


Abb. 25: Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (Zulauf) und Ist-Zustand (Zulauf) (Gr. Binnensee)

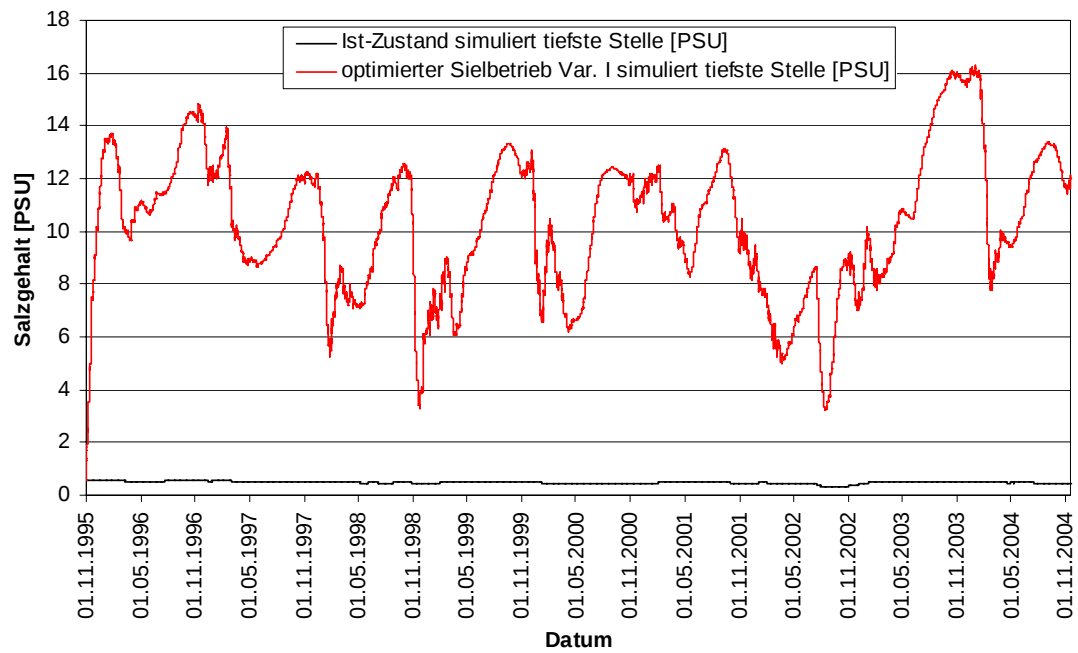


Abb. 26: Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (tiefste Stelle) und Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Gr. Binnensee)

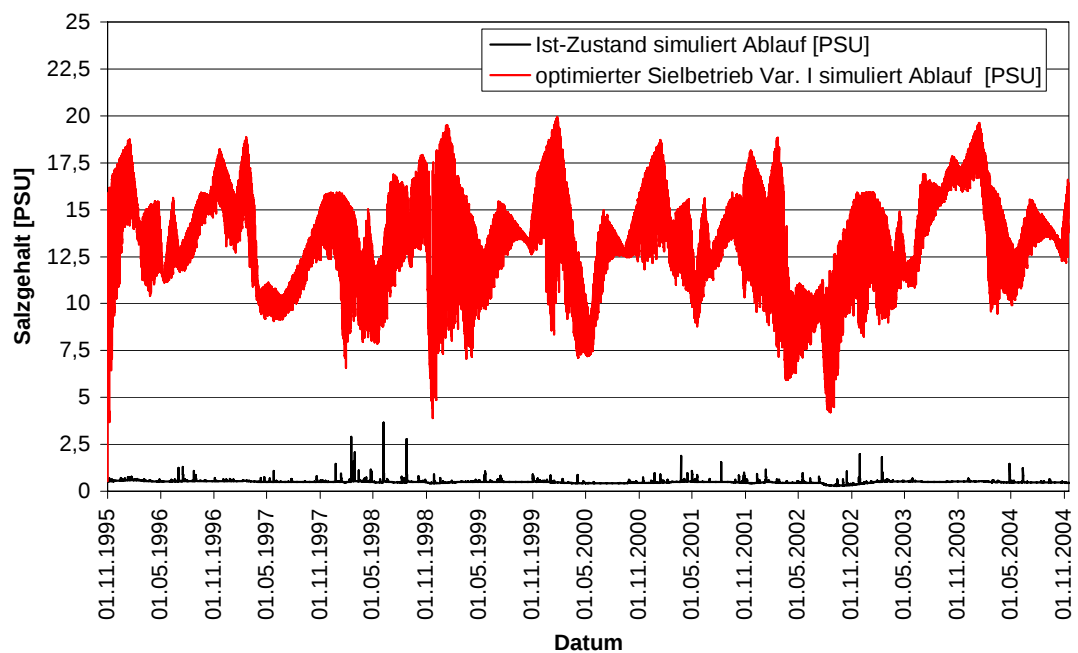


Abb. 27: Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (Ablauf) und Ist-Zustand (Ablauf) (Gr. Binnensee)

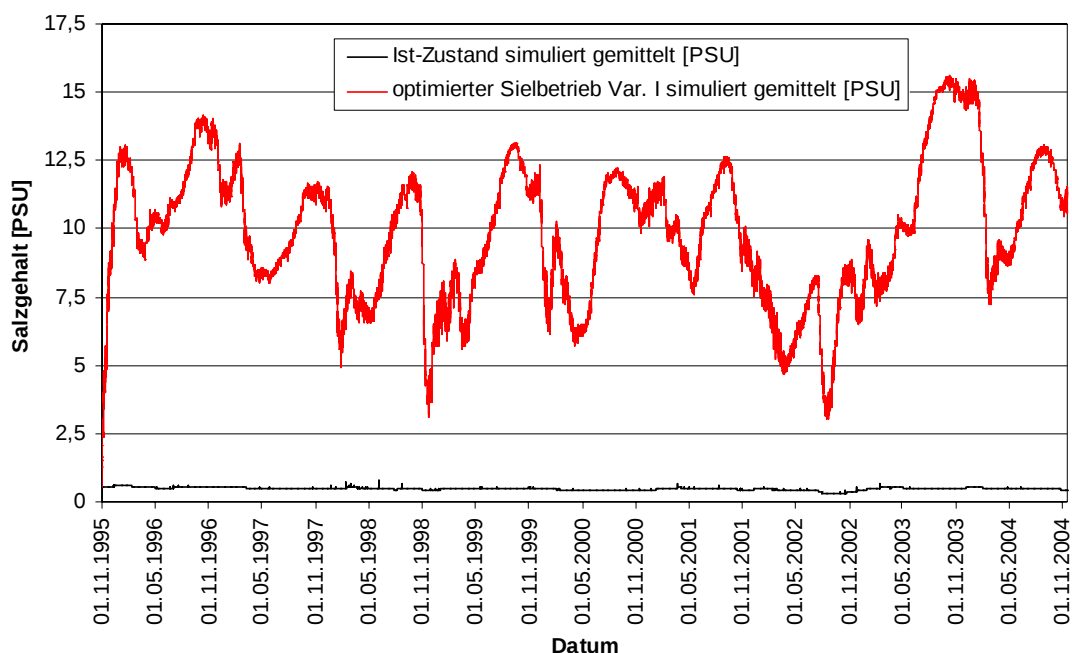


Abb. 28: Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (gemittelt) und Ist-Zustand (gemittelt) (Gr. Binnensee)

Bei der Auswertung der Tab. 5 und den Abb. 30 bis Abb. 33 wird deutlich, dass durch eine optimierte Bauwerkssteuerung der Salzgehalt im See wieder angehoben werden kann. An der tiefsten Stelle werden im Mittel 7,08 PSU erreicht und in der Spitze 14,43 PSU. Die Anhebung des Salzgehaltes wurde in der Variante II nach ca. 3 Monaten erreicht. Ist die Wehranlage jedoch über einen längeren Zeitraum geschlossen oder findet nur ein Ausströmen aus dem See statt, kann es wiederum zu einer Versüßung kommen. Am Zulauf des Sees ist weiterhin zu erkennen, dass der Zulauf auch in der optimierten Steuervariante stark vom Salzgehalt des Zulaufs geprägt ist und nur zu Zeiten des Einstroms in den See sich der Ostseesalzgehalt auch bis in die Kossau hin ausbreitet.

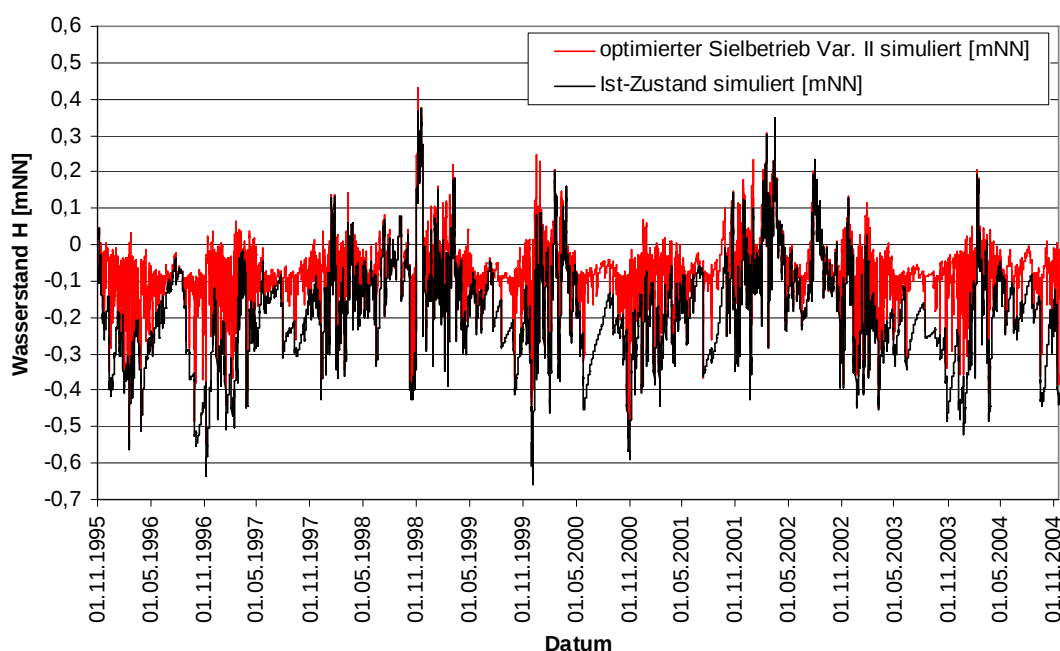


Abb. 29: Vergleich der Wasserstände optimierter Sielbetrieb Var. II und Ist-Zustand (Gr. Binnensee)

Tab. 5: *Vergleich der mittleren und maximalen Salzgehalte für die verschiedenen Variantenrechnungen (Gr. Binnensee)*

	Variante	Mittelwert [PSU]	Maximalwert [PSU]
tiefste Stelle	Ist-Zustand	0,48	0,60
	ungestörter Zustand	10,82	17,07
	optimierter Sielbetrieb Var. I	10,29	16,31
	optimierter Sielbetrieb Var. II	7,08	14,34
Zulauf	Ist-Zustand	0,46	0,67
	ungestörter Zustand	3,52	15,34
	optimierter Sielbetrieb Var. I	3,25	14,61
	optimierter Sielbetrieb Var. II	2,01	9,33
Ablauf	Ist-Zustand	0,50	3,65
	ungestörter Zustand	13,07	19,95
	optimierter Sielbetrieb Var. I	12,60	19,95
	optimierter Sielbetrieb Var. II	8,73	19,62
gemittelt	Ist-Zustand	0,48	0,78
	ungestörter Zustand	10,32	16,84
	optimierter Sielbetrieb Var. I	9,82	15,59
	optimierter Sielbetrieb Var. II	6,74	13,59

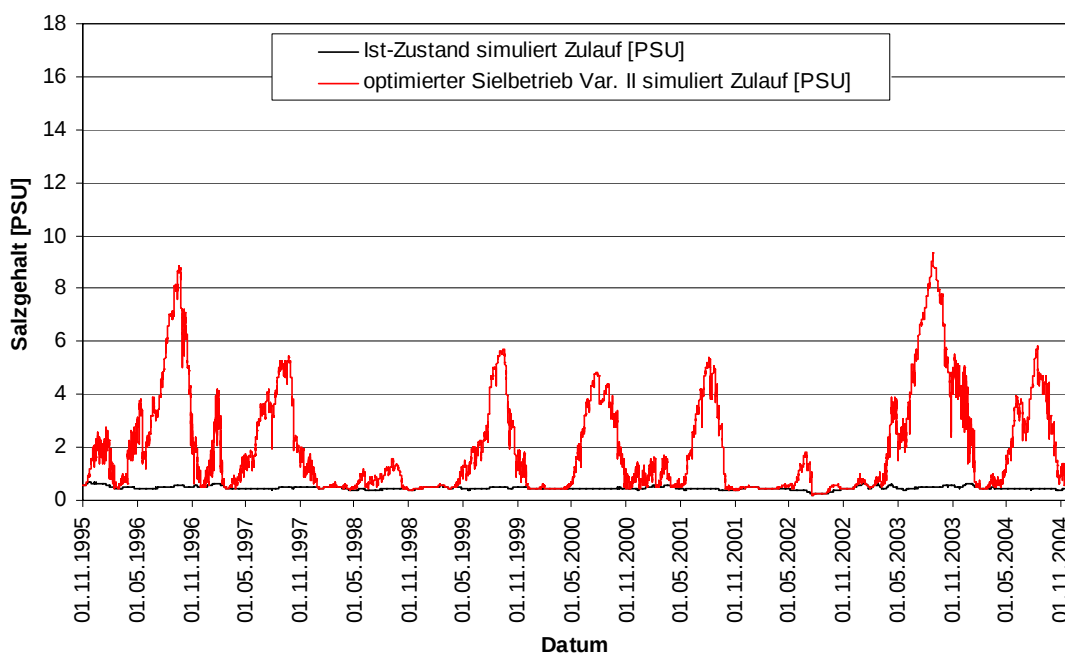


Abb. 30: *Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (Zulauf) und Ist-Zustand (Zulauf) (Gr. Binnensee)*

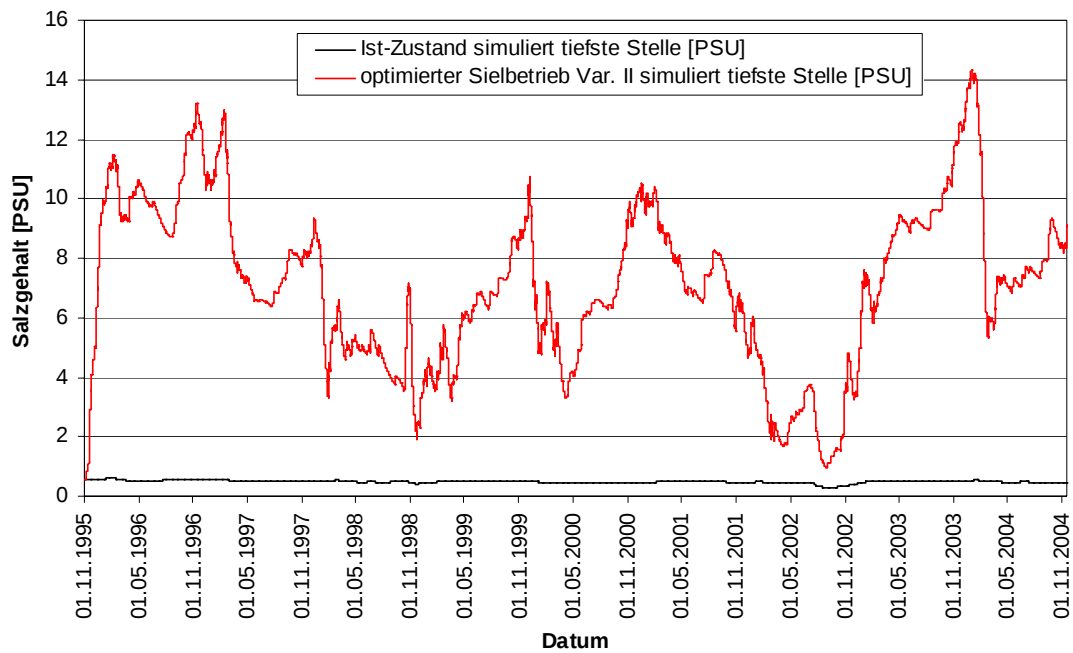


Abb. 31: Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (tiefste Stelle) und Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Gr. Binnensee)

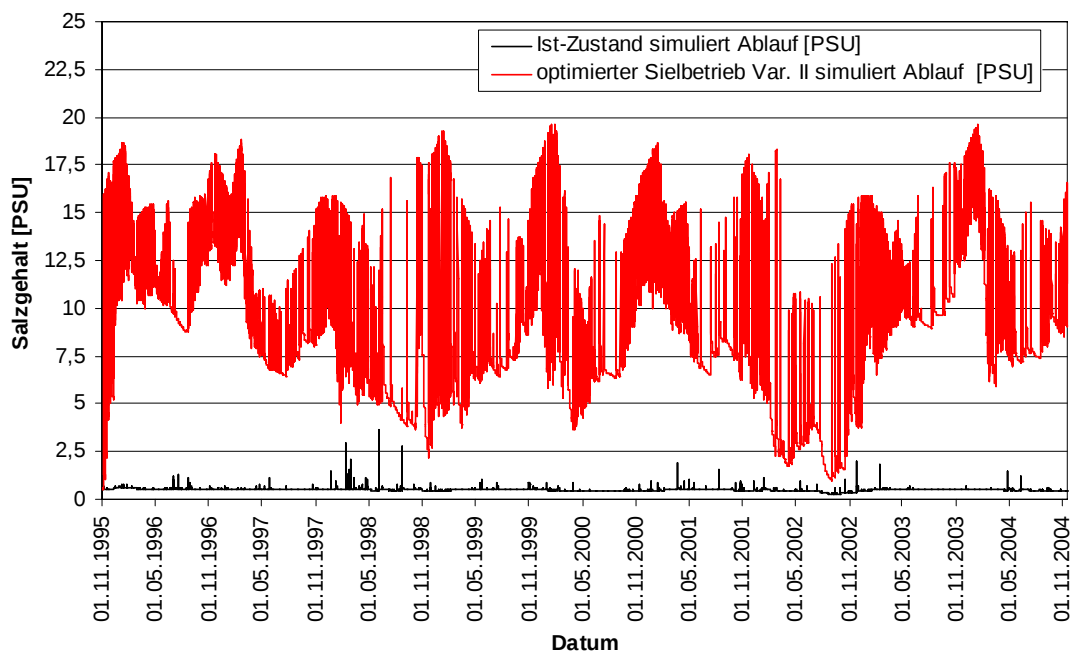


Abb. 32: Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (Ablauf) und Ist-Zustand (Ablauf) (Gr. Binnensee)

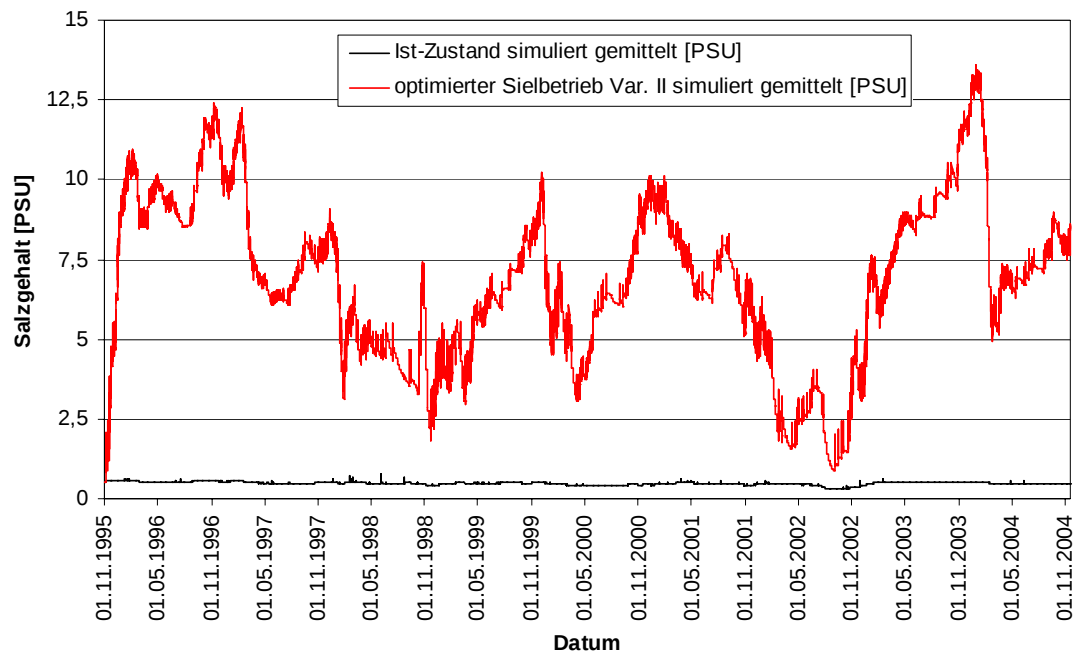


Abb. 33: Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (gemittelt) und Ist-Zustand (gemittelt) (Gr. Binnensee)



4 HEMMELMARKER SEE

4.1 Allgemein

Das Modell Hemmelmarker See wurde anhand der in Kapitel 2 beschriebenen Arbeitsschritte erstellt. Der See hat eine Fläche von 0,85 km² und ein Volumen von 2.450.000 m³ bei 0,30 mNN laut Bericht „Seen an der Nord- und Ostseeküste“. Bei der Volumenkontrolle des auf Basis des in Abb. 35 dargestellten Tiefenplans erstellten Geländemodells ergibt ein Volumen von 2.572.903 m³. Das entspricht einer Abweichung von rund 5,2 %. Für den Betrieb des Modells ist das eine ausreichend genaue Abbildung der Geometrie.

Als Regelungsbauwerk dient ein Rohrdurchlass mit einer Rückstauklappe, die eine Rückströmung in den See verhindert (Abb. 34). Ein weiterer Durchlass im Ablauf ist ebenfalls im Modell enthalten.



Abb. 34: links Brücke mit Rohrdurchlass; rechts Rohrdurchlass mit Rückstauklappe

Die Abmessungen der Bauwerke sind in Tab. 6 aufgeführt.

Tab. 6: Bauwerksabmessungen Hemmelmarker See

Bauwerksart	Anzahl Öffnungen	Länge [m]	Sohlhöhe Einstrom [mNN]	Sohlhöhe Ausstrom [mNN]	Durchmesser [m]
Durchlass	1	5,00	0,00 See	- 0,10 Ostsee	1,00
Durchlass	1	81,00	- 0,25 See	- 0,31 Ostsee	0,80

Ein altes Wehr, das nur noch aus zwei Holzpfehlen besteht, wurde bei der Modellierung nicht berücksichtigt. Es hat keine Regelwirkung mehr und beeinflusst das Abflussgeschehen nicht entscheidend.

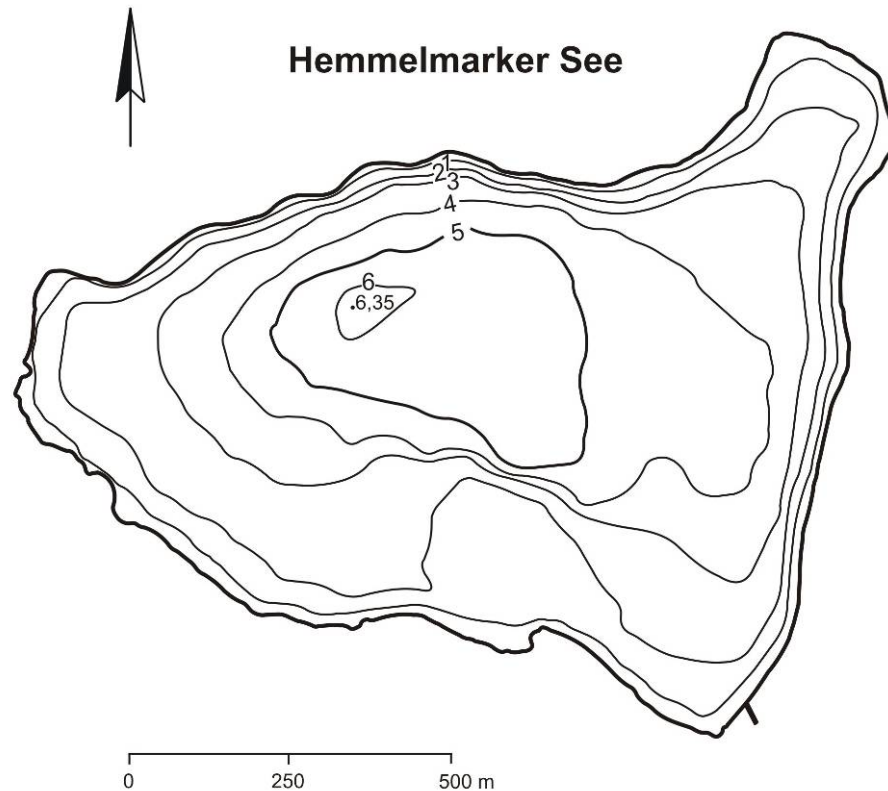


Abb. 35: Tiefenplan Hemmelmarker See

4.2 Randbedingungen Hemmelmarker See

Die Randbedingungen für den Hemmelmarker See wurden, wie in Kapitel 2 beschrieben, in Zeitreihen für die obere und untere Modellgrenze unterteilt. Am oberen Modellrand wurde eine Zufluss- und eine Salzgehaltszeitreihe benötigt, am unteren eine Wasserstands- und ebenfalls eine Salzgehaltsganglinie. Aus der Regionalisierung der Abflüsse lassen sich für jedes Teileinzugsgebiet, und somit auch für den Pegelstandort und den Zufluss, die statistischen Hauptwerte MNQ, MQ, MHQ angeben. Anhand dieser Hauptwerte findet eine Übertragung der Ganglinie des Pegels Kossau auf den Zufluss anhand der vom LANU zur Verfügung gestellten Formeln statt. Die Formeln zur Berechnung der Zuflussganglinien lauten:

Für $Q \geq MQ$:

$$Q_2 = \frac{(Q_K - MQ_K)}{(MHQ_K - MQ_K)} \cdot (MHQ_2 - MQ_2) + MQ_2$$

Für $MNQ < Q < MQ$:

$$Q_2 = MQ_2 - \frac{(MQ_K - Q_K)}{(MQ_K - MNQ_K)} \cdot (MQ_2 - MNQ_2)$$

Für $Q < MNQ$:

$$Q_2 = Q_K \cdot \frac{MNQ_2}{MNQ_K}$$



Die Formeln wurden vom LANU geliefert und die damit erzeugten Randbedingungen geprüft. Der Zufluss zum Hemmelmarker See wurde aus der Zuflussganglinie des Großen Binnensees und somit aus dem Pegel der Kossau ermittelt. Hierzu wurde die Zuflussganglinie anhand der Einzugsgebietsgröße und den Hauptwerten des Hemmelmarker Sees skaliert, da keine Zuflussmessungen für den See vorliegen. Dies stellt eine gewisse Unsicherheit dar, ist aber für die zu untersuchende Aufgabenstellung ein ausreichend genauer Ansatz (Primär werden die Salzgehalte und nicht die Wasserstände betrachtet). Am unteren Rand wurde die Wasserstandsganglinie und die Salzgehaltsganglinie des nächstliegenden Ostseepegels verwendet.

Des Weiteren musste die Salzgehaltsmessung an der Messstelle Booknieseck verlängert werden, da die gelieferten Daten nicht den kompletten Simulationszeitraum abdeckten. Für die Verlängerung wurden in Absprache mit dem LANU die Salzgehaltmessungen mit den an der Messstelle vorhandenen Daten ergänzt. Dies zeichnet sich in einer Periodizität der Zeitreihe ab (Abb. 37). Eine direkte Auswirkung hat diese Verlängerung auf die Simulation des Ist-Zustandes, der dadurch vom gemessenen Ist-Zustand abweichen kann. Im Weiteren Verlauf werden die Berechnungsergebnisse immer in Relation zum simulierten Ist-Zustandes gesetzt. Da alle Simulationen auf den gleichen Randbedingungen basieren und sich nur durch die Steuervarianten unterscheiden, kann direkt die Auswirkung der Steuerung auf den Salzgehalt als Ergebnis entnommen werden.

Die nachfolgenden Abb. 36 bis Abb. 39 sind die für das Modell Hemmelmarker See verwendeten Zeitreihen.

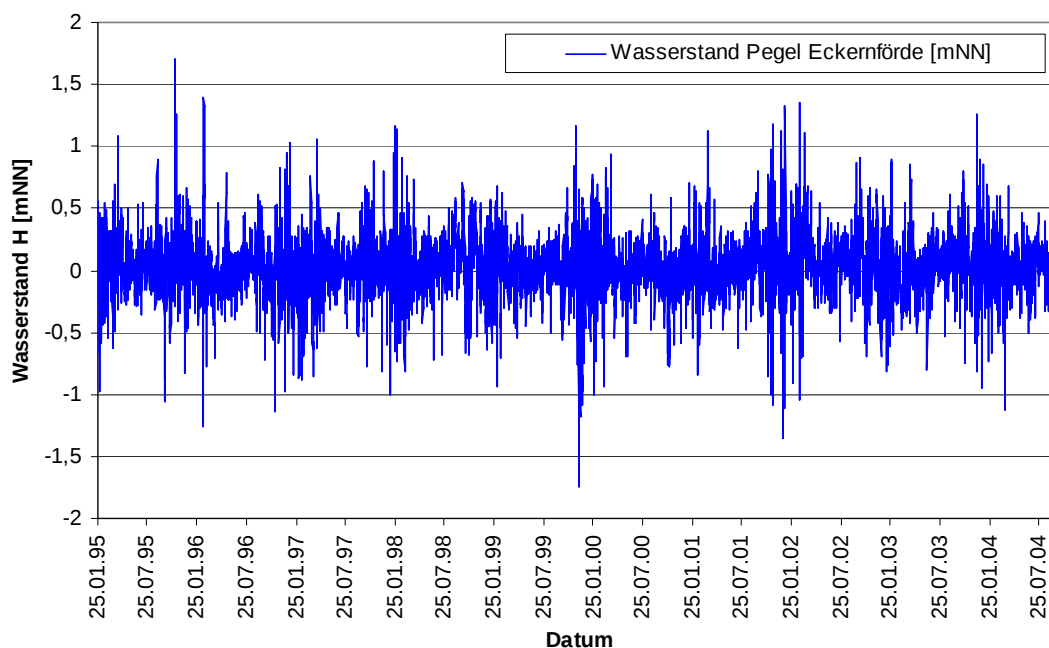


Abb. 36: Untere Randbedingung Hemmelmarker See Wasserstand Pegel Eckernförde

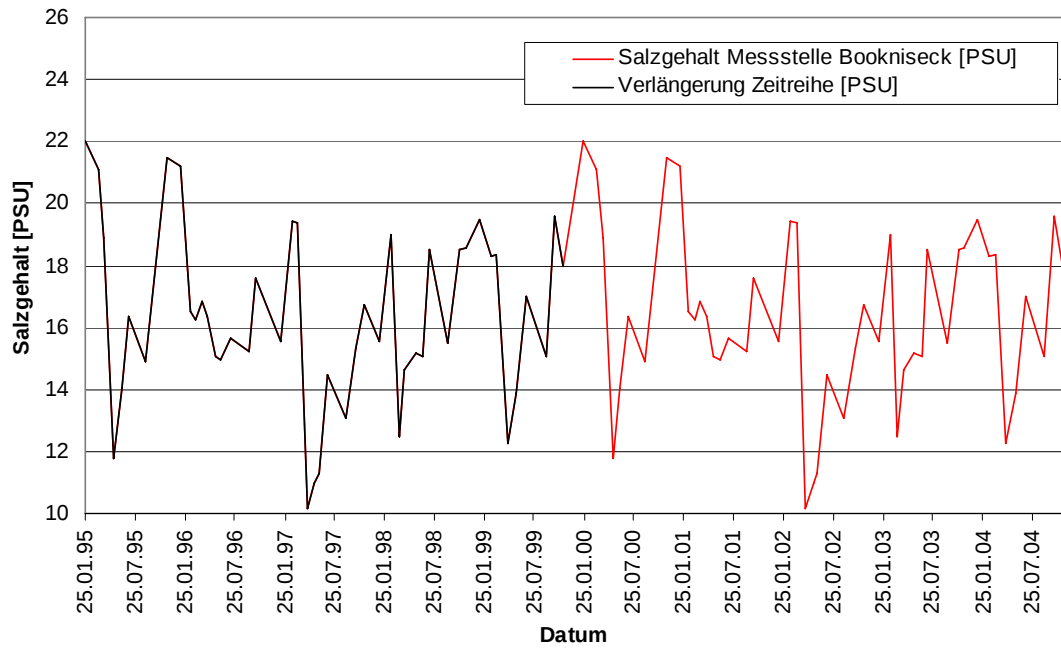


Abb. 37: Untere Randbedingung Hemmelmarker See Salzgehalt Messstelle Bookniseck

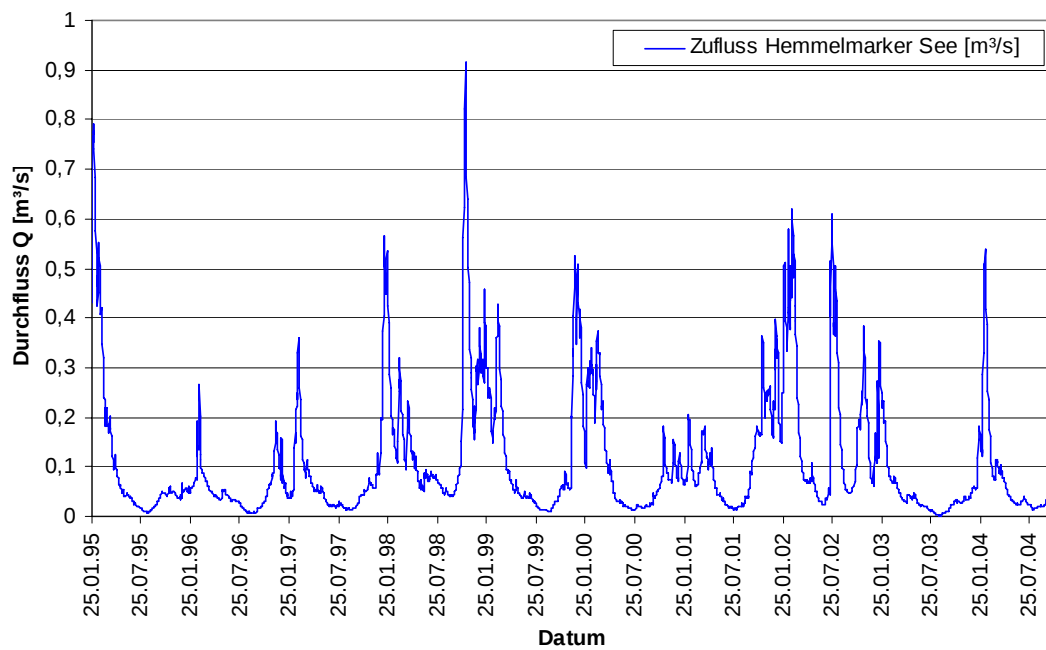


Abb. 38: Obere Randbedingung Zufluss Hemmelmarker See

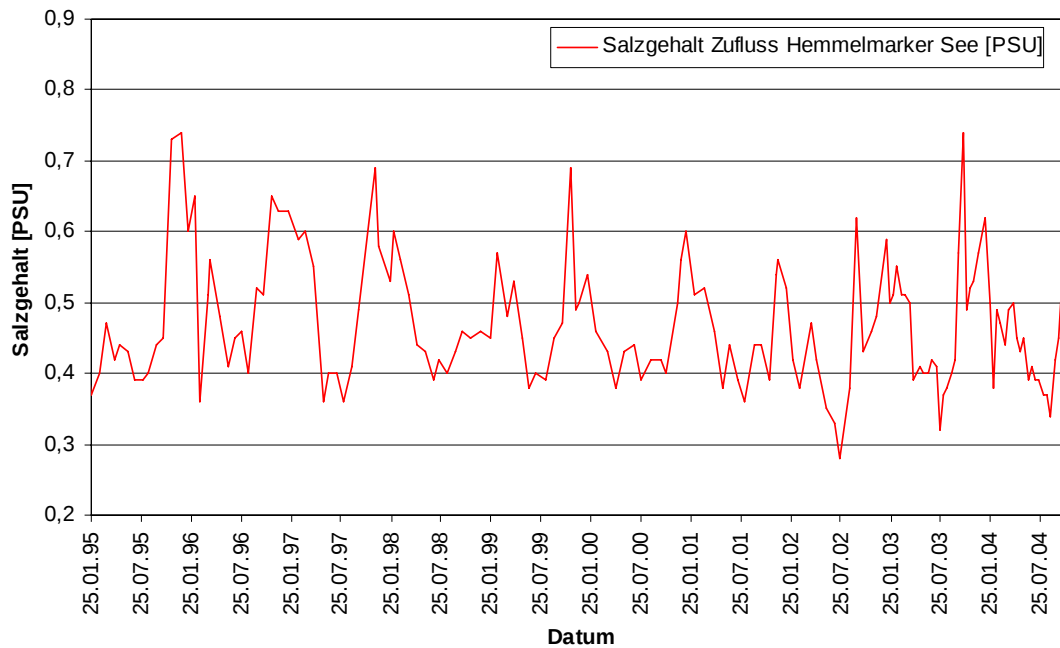


Abb. 39: Obere Randbedingung Salzgehalt Zufluss zum Hemmelmarker See

4.3 Simulation Ist-Zustand

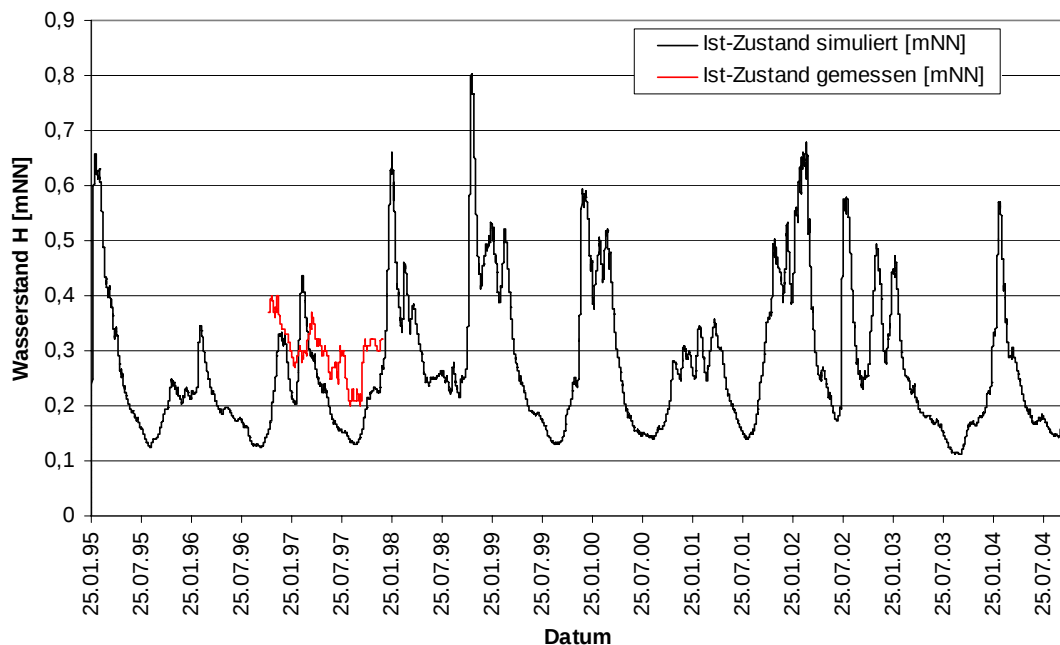


Abb. 40: Vergleich gemessener und simulierter Wasserstand (Hemmelmarker See)

Für die Simulation des Ist-Zustandes wurde der in Kap. 4.1 beschriebene Rohrdurchlass mit der Rückstauklappe eingebaut. Diese lässt nur eine positive Strömung aus dem Hemmelmarker See Richtung Ostsee zu und verhindert somit auch einen Salzeintrag in den See. Die durch diese Steuerung simulierte Wasserstandsganglinie ist in Abb. 40 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die simulierten Wasserstände den ungefähren Verlauf der gemessenen Wasserstände abbilden, jedoch um etwa 5 – 10 cm zu hoch ausfallen. Dies resultiert aus einem nicht ganz

korrekten Startwasserstand (nicht aufgezeichnet) und kann zusätzlichen durch die nicht abgesicherte Zuflussrandbedingung mit verursacht worden sein, die einen zu geringen oder zu großen Zufluss liefert. Wären genaue Steuerpläne mit exakten Öffnungszeiten der Siele bekannt, könnten die Berechnungen dahingehend optimiert werden.

Die Simulation der Optimierung basiert auf den gleichen Rand- und Startbedingungen wie der modellierte Ist-Zustand. Im Simulationsverlauf der Optimierung gleicht sich der Wasserstand im See an die vorgegebenen Grenzwerte (Steuerwasserstände) an. Diese werden durch die Steuerstrategie vorgegeben.

Würde als Ausgangssituation der aufgetretene Ist-Zustand zugrunde gelegt werden und der Steuerstrategie (der Optimierung) unterworfen, so würde sich auch hier der Wasserstand im See an die vorgegebenen Grenzwerte annähern.

Der simulierte und gemessene Ist-Zustand verhält sich hier anders. Die Steuerung ist auf eine maximale Sielleistung ausgelegt. Ein zu niedriger Startwasserstand kann nur durch einen erhöhten Zufluss ausgeglichen werden, da ein Einstrom in den Strandsee durch die vorgegebene Steuerung nicht möglich ist.

Abweichungen zwischen simulierten Wasserstand und Ist-Wasserstand haben keine Auswirkungen auf die Salzgehaltsberechnung in der Optimierung. Für diese Szenarien erfolgt die Steuerung anhand von Wasserstandsgrenzwerten in den Seen. Die Bauwerkssteuerung anhand dieser Werte führen dazu, dass sich der Seewasserstand an die Grenzwerte angleicht. Der Zeitpunkt des Erreichens des Optimierungswasserstandes hängt davon ab, wie weit die Ausgangszustände davon entfernt sind.

Salzgehalte benötigen länger für die Angleichung, da hierfür entsprechend häufig, größere salzhaltige Ostseewassermengen zufließen müssen.

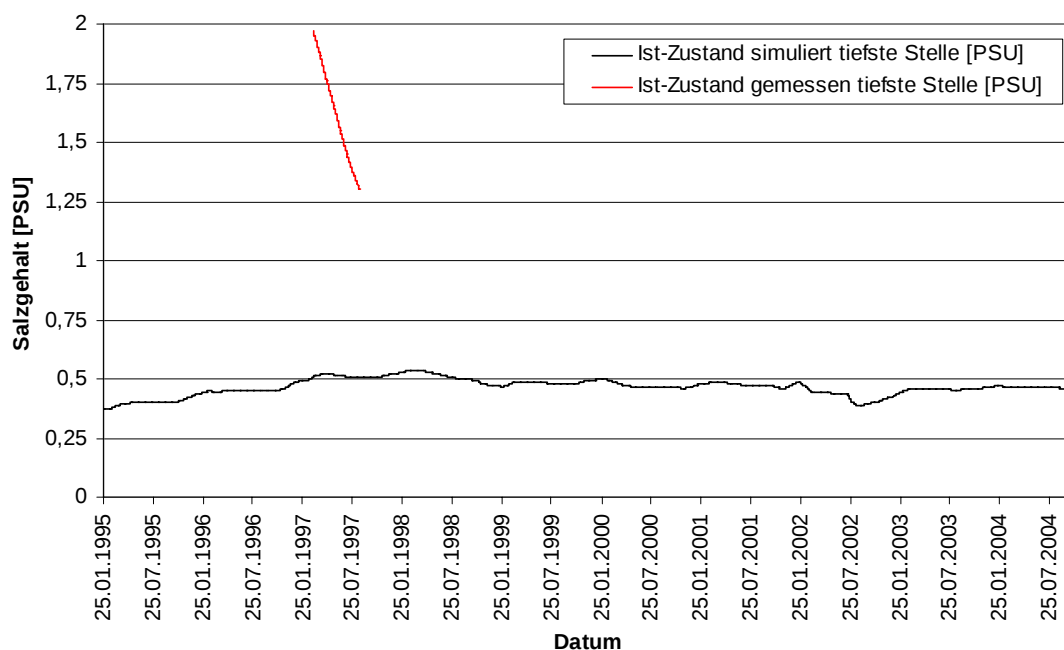


Abb. 41: *Simulierter Salzgehalt Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Hemmelmarker See)*



Der simulierte Salzgehalt im Ist-Zustand und die gemessenen Werte weisen größere Abweichungen auf. Dies kann zum einen aus der Startrandbedingung resultieren, liegt aber wahrscheinlich an der abweichenden Steuerung des Sielbauwerkes. In diesem Fall wurde bekannt, dass die Sielklappe nicht mehr voll funktionsfähig ist und daher an einer Stelle aufgetrennt wurde, so dass salzhaltiges Ostseewasser in den See einströmen kann. Bei der Simulation des Ist-Zustandes wurde jedoch von der vollen Funktionstüchtigkeit ausgegangen.

4.4 Simulation ungestörte Bedingungen

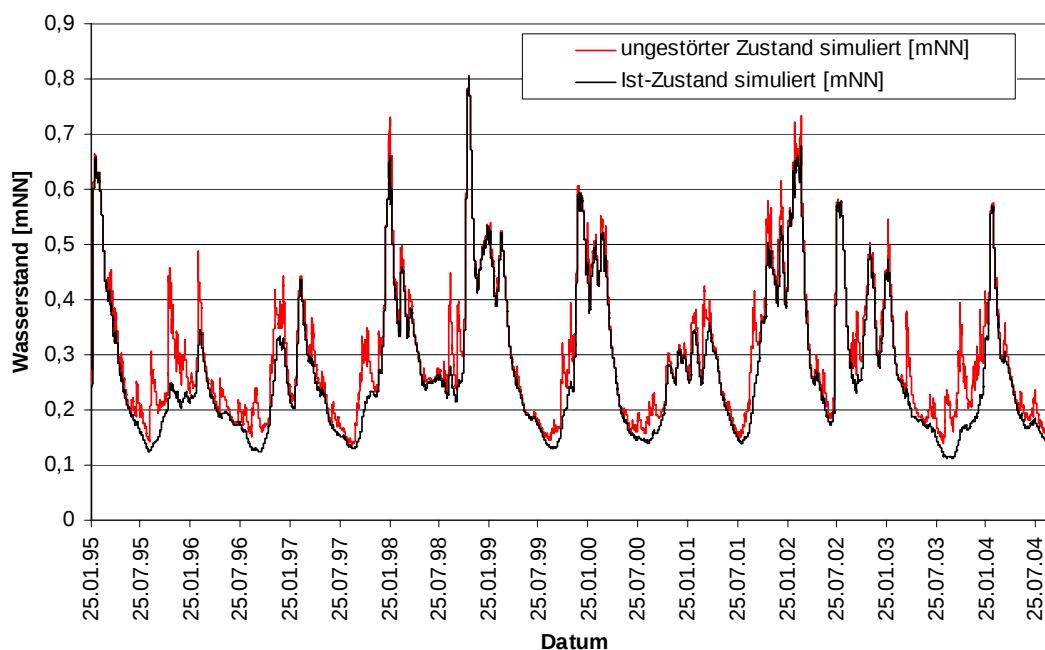


Abb. 42: Vergleich der Wasserstände ungestörter- und Ist-Zustand (Hemmelmärker See)

Bei der Berechnung des ungestörten Zustandes wurden alle Bauwerke als komplett geöffnet angesehen, da die Geometrie der Bauwerke als limitierender Faktor dienen sollte. Wären die Bauwerke komplett entnommen worden so wäre die Entwicklung des Salzgehaltes nicht direkt auf die Steuerung zurückzuführen.

In Tab. 7 sind die mittleren und maximalen Wasserstände aufgeführt. Es ist zu erkennen, dass durch die komplette Öffnung des Bauwerkes der Seewasserstand im Mittel um 3 cm ansteigt. Dies ist auch dem Verlauf der Wasserstandsganglinie in Abb. 42 zu entnehmen.

Der maximale Wasserstand, der im Simulationszeitraum erreicht wurde, beträgt 0,81 mNN und liegt somit um 0,01 m höher als der maximale Wasserstand im simulierten Ist-Zustand. Hieraus ist ersichtlich, dass die Geometrie des Bauwerkes der limitierende Faktor ist und nicht die Rückstauklappe selbst. Die Druckverhältnisse in der Rohrleitung sind so groß, dass es zu fast keiner Rückströmung in den Hemmelmärker See kommt.

Tab. 7: Wasserstandsentwicklung im Ist- und ungestörten Zustand (Hemmelmärker See)

Variante	Mittelwert Wasserstand [mNN]	Maximalwert Wasserstand [mNN]
Ist-Zustand	0,27	0,80
ungestörter Zustand	0,30	0,81

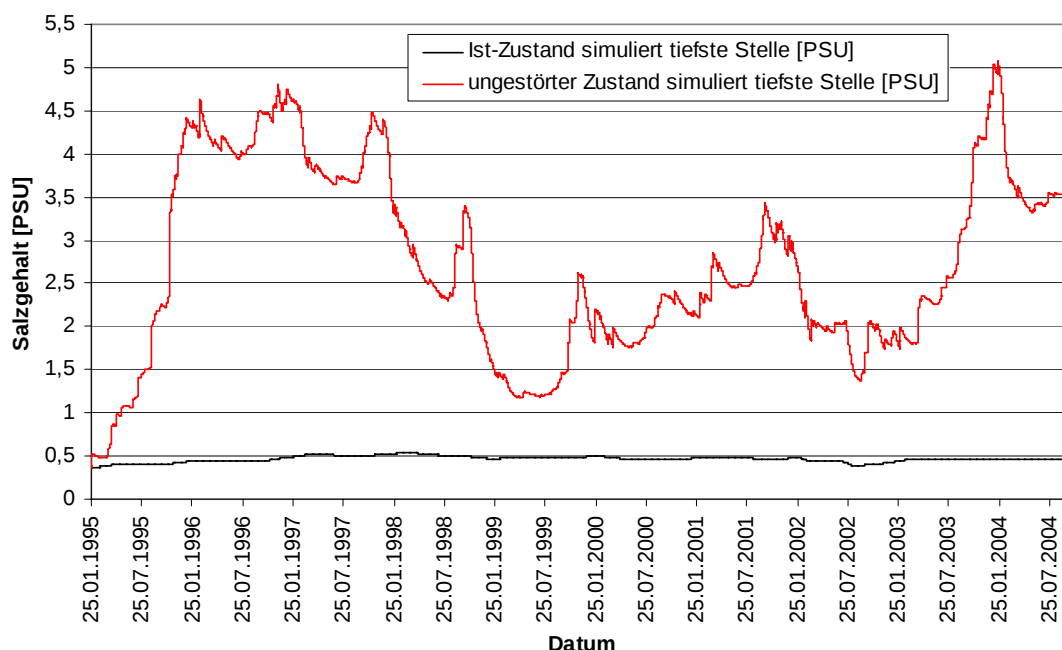


Abb. 43: Vergleich der Salzgehalte ungestörter- (tiefste Stelle) und Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Hemmelmarker See)

Der Tab. 8 ist zu entnehmen, dass sich der Salzgehalt im Hemmelmarker See unter ungestörten Bedingungen anhebt. Dieser Prozess ist an allen Auswertepunkten zu erkennen. So steigt der mittlere Salzgehalt an der tiefsten Stelle von 0,47 PSU auf 2,72 PSU an und es wird ein maximaler Wert an der tiefsten Stelle im See von 5,07 PSU erreicht. Die Anhebung des Salzgehaltes ist ebenfalls der Abb. 43 und den Abb.-A. 4 bis Abb.-A. 6 im Anhang zu entnehmen. Die Widerversalzung ist ungefähr nach einem Jahr abgeschlossen.

Tab. 8: Vergleich der mittleren und maximalen Salzgehalte für den Ist- und ungestörten Zustand (Hemmelmarker See)

	Variante	Mittelwert [PSU]	Maximalwert [PSU]
tiefste Stelle	Ist-Zustand	0,47	0,54
	ungestörter Zustand	2,72	5,07
Zulauf	Ist-Zustand	0,47	0,54
	ungestörter Zustand	2,56	4,84
Ablauf	Ist-Zustand	0,47	0,54
	ungestörter Zustand	2,77	6,39
gemittelt	Ist-Zustand	0,47	0,54
	ungestörter Zustand	2,60	4,88



4.5 Simulation optimierter Sielbetrieb

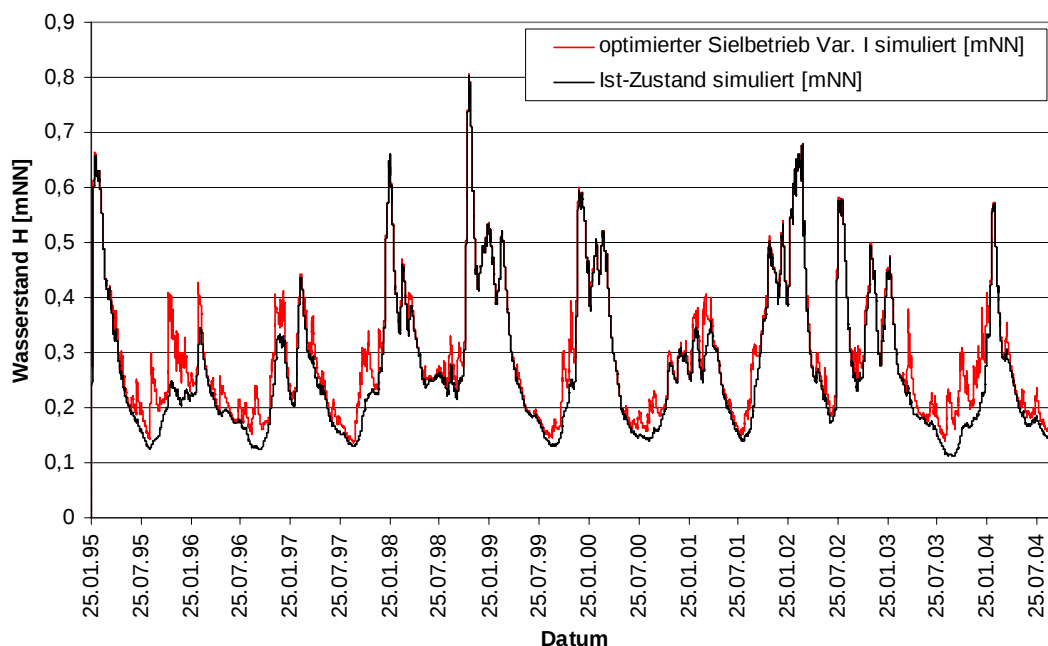


Abb. 44: Vergleich der Wasserstände optimierter Sielbetrieb Var. I und Ist-Zustand (Hemmelmarker See)

Beim optimierten Sielbetrieb am Hemmelmarker See wurde zusätzlich ein Wehr eingebaut, um die Steuerung anhand von Regelwasserständen durchführen zu können. Die Steuerung sah vor, dass die Öffnungszeiten des Wehres in Abhängigkeit zu den Seewasserständen gesetzt wurden. Da die Optimierung unter Berücksichtigung der jetzigen Nutzung erfolgen sollte, wurden Seewasserstände festgelegt, die nicht überschritten werden sollten. Für den Hemmelmarker See sollten von November bis April die Seewasserstände nicht über 0,40 mNN liegen und in der Zeit von Mai bis Oktober nicht über 0,30 mNN. In der Variante I wurden daher diese Wasserstände als Regelwasserstände verwendet.

Die Wehranlage war daher immer geöffnet, solange der Seewasserstand die Grenzwerte unterschritt. Somit war ein maximaler Salzgehaltsaustausch unter Berücksichtigung der jetzigen Nutzung möglich.

Tab. 9: Wasserstandsentwicklung für die Variantenrechnung (Hemmelmarker See)

Variante	Mittelwert Wasserstand [mNN]	Maximalwert Wasserstand [mNN]
Ist-Zustand	0,27	0,80
ungestörter Zustand	0,30	0,81
optimierter Sielbetrieb Var. I	0,30	0,81
optimierter Sielbetrieb Var. II	0,28	0,80

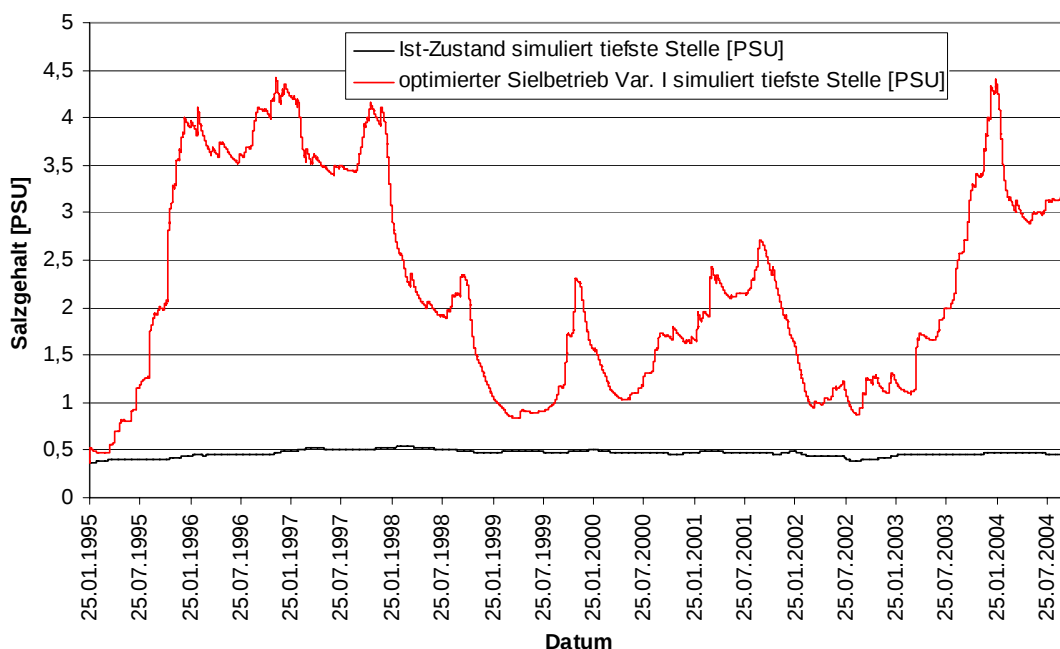


Abb. 45: Vergleich der Salzgehalte ungestörter- (tiefste Stelle) und optimierter Sielbetrieb Var. I (tiefste Stelle) (Hemmelmarker See)

Das Ergebnis ist in Abb. 44 (Var. I), Abb. 46 (Var. II) und Tab. 9 dargestellt. Zu erkennen ist, dass für die Variante I die simulierte Ist-Zustands-Wasserstandsganglinie und auch die limitierenden Regelungswasserstände überschritten wurden. Daher wurde eine zweite Variante berechnet, die von November bis April Regelwasserstände von 0,20 mNN und in der Zeit von Mai bis Oktober Regelwasserstände von 0,00 mNN vorsah. Bei der Auswertung ist klar ersichtlich, dass sich die Ganglinie der Wasserstände für den simulierten Ist-Zustand und die Variantenrechnung II bis auf eine Ausnahme decken. Die Überschreitung der Regelungswasserstände ist auch in der Variante II zu erkennen, fand jedoch auch im Referenzzustand zu den gleichen Zeitpunkten und mit der gleichen Intensität statt, so dass von einer Einhaltung der Optimierungsbedingung gesprochen werden kann.

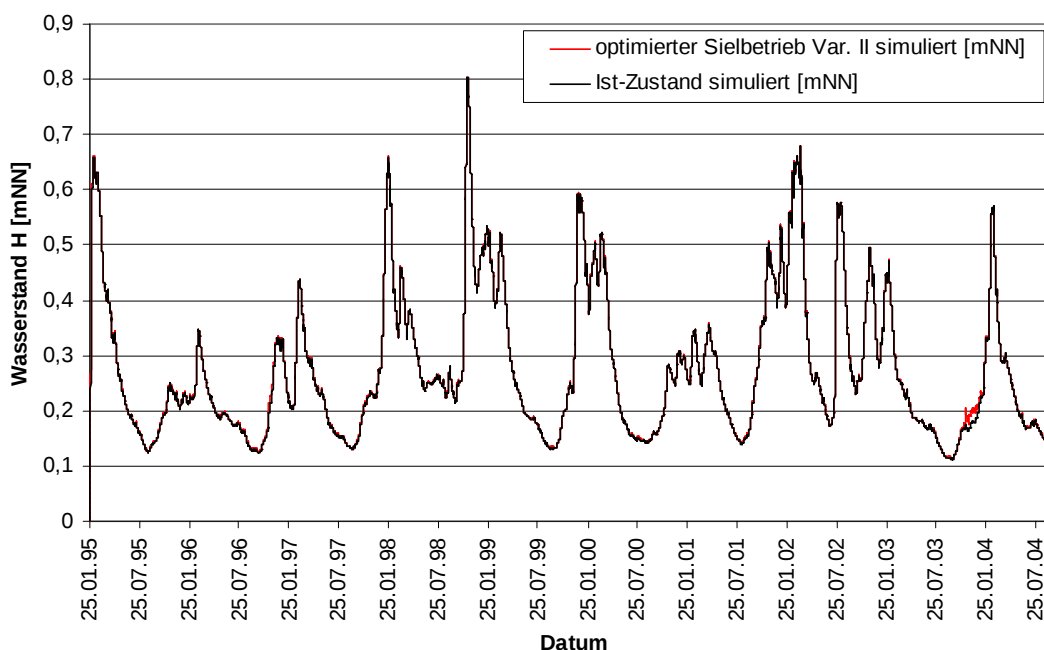


Abb. 46: Vergleich der Wasserstände optimierter Sielbetrieb Var. II und Ist-Zustand (Hemmelmarker See)



Die Ergebnisse der Variante I sind den Abb. 45, Abb.-A. 7 bis Abb.-A. 9 (im Anhang), Tab. 9 und Tab. 10 zu entnehmen. Bei der Auswertung der Tab. 10, der Abb. 47 und Abb.-A. 7 bis Abb.-A. 12 wird deutlich, dass durch eine optimierte Bauwerkssteuerung der Salzgehalt im See wieder angehoben werden kann. An der tiefsten Stelle werden im Mittel 0,53 PSU erreicht und in der Spitze 0,80 PSU. Die Anhebung des Salzgehaltes wurde in der Variante II nach ca. einem Monat erreicht. Da sich die Wasserstände von Variante II und dem Ist-Zustand nur minimal unterscheiden, kommt es auch nur zu einer minimalen Anhebung des Salzgehaltes. Da die Wasserstände in Variante I nicht wesentlich ansteigen, wäre dies auch eine Steuervariante für die Anhebung des Salzgehaltes. Mit der Variante I könnten an der tiefsten Stelle im Mittel 2,22 PSU und in der Spitze 4,43 PSU erreicht werden. Die Anhebung des Salzgehaltes wurde in der Variante I nach ca. einem Jahr erreicht.

Tab. 10: *Vergleich der mittleren und maximalen Salzgehalte für die Variantenrechnung (Hemmelmarker See)*

	Variante	Mittelwert [PSU]	Maximalwert [PSU]
tiefste Stelle	Ist-Zustand	0,47	0,54
	ungestörter Zustand	2,72	5,07
	optimierter Sielbetrieb Var. I	2,22	4,43
	optimierter Sielbetrieb Var. II	0,53	0,80
Zulauf	Ist-Zustand	0,47	0,54
	ungestörter Zustand	2,56	4,84
	optimierter Sielbetrieb Var. I	2,11	4,17
	optimierter Sielbetrieb Var. II	0,52	0,78
Ablauf	Ist-Zustand	0,47	0,54
	ungestörter Zustand	2,77	6,39
	optimierter Sielbetrieb Var. I	2,26	5,74
	optimierter Sielbetrieb Var. II	0,53	1,80
gemittelt	Ist-Zustand	0,47	0,54
	ungestörter Zustand	2,60	4,88
	optimierter Sielbetrieb Var. I	2,13	4,24
	optimierter Sielbetrieb Var. II	0,52	0,83

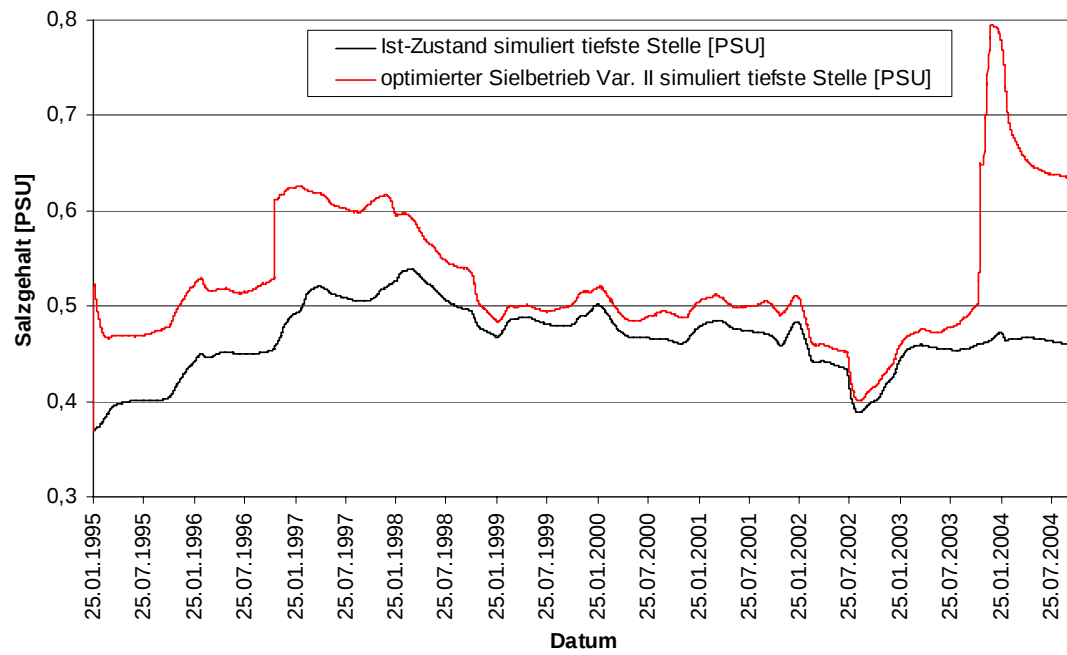


Abb. 47: Vergleich der Salzgehalte ungestörter- (tiefste Stelle) und optimierter Sielbetrieb Var. II (tiefste Stelle) (Hemmelmarker See)



5 HEMMELSDORFER SEE

5.1 Allgemein

Das Modell Hemmelsdorfer See wurde anhand der in Kapitel 2 beschriebenen Arbeitsschritte erstellt. Der See hat eine Fläche von 4,48 km² und ein Volumen von 23.900.000 m³ bei 0,00 mNN laut Bericht „Seen an der Nord- und Ostseeküste“. Bei der Volumenkontrolle des auf Basis des in Abb. 50 dargestellten Tiefenplans erstellten Geländemodells ergibt ein Volumen von 22.872.612 m³. Das entspricht einer Abweichung von rund 4,3 %. Für den Betrieb des Modells ist das eine ausreichend genaue Abbildung der Geometrie.

Als Regelungsbauwerke dienen eine Wehranlage und zwei Rückschlag Tore (Abb. 49). Weitere drei Bauwerke werden berücksichtigt. Dabei handelt es sich um Brückenbauwerke, die als Durchlässe modelliert werden. Zwei Holzbrücken werden vernachlässigt, da ihre Abmessungen und ihre Bauart das Abflussgeschehen nicht beeinflussen. Eine der Brücken ohne Einfluss auf das Abflussgeschehen ist in Abb. 49 dargestellt. Eine Brücke, die durch ihre Bauart und Abmessungen Einfluss auf das Abflussgeschehen nimmt, ist in Abb. 48 dargestellt. Die Steuerung der Wehranlage erfolgt anhand einer Steuerstrategie. Danach wird die Wehranlage geöffnet, sobald der Wasserstand im Aalbek unter der B76 sechs Zentimeter höher ist als in der Ostsee. Ist dies nicht der Fall, so bleibt die Wehranlage geschlossen. Bei der Steuerung gibt es nur zwei Wehrstellungen; vollkommen offen oder geschlossen. Die Rückschlag Tore dienen nur gegen den Wellenschlag aus der Ostsee.



Abb. 48: links: Stemmtore mit hinterliegendem Wehr, rechts: Querschnittseingende Brücke



Abb. 49: links: Wehranlage ohne Funktion ; rechts: vernachlässigbare Brücke

Die Abmessungen der Bauwerke sind in Tab. 11 und Tab. 12 aufgeführt. Die Geometrie der Brücken ist der Querschnittsdatei zu entnehmen, da es sich nicht um regelmäßige Durchlässe handelt. Die lichte Höhe wurde aus den Messungen des LANU übernommen. Sie bezieht sich auf den bei der Vermessung vorherrschenden Wasserstand und stellt somit den noch zur Verfügung stehenden Freibord dar.

Tab. 11: Wehrsabmessungen Hemmelsdorfer See

Bauwerksart	Anzahl Öffnungen	Breite [m]	Höhe [m]	Sohlhöhe [mNN]
Unterströmtes Wehr	2	1 x 2,15 1 x 2,45	2,00	- 1,17

Tab. 12: Durchlassabmessungen Hemmelsdorfer See

Bauwerksart	Anzahl Öffnungen	Lichte Breite [m]	Licht Höhe [m]	Geometrie
Durchlass Brücke	1	10,90	1,19	siehe *.xns-Datei
Durchlass Brücke	1	6,10	1,41	siehe *.xns-Datei
Durchlass Brücke	1	4,06	0,92	siehe *.xns-Datei

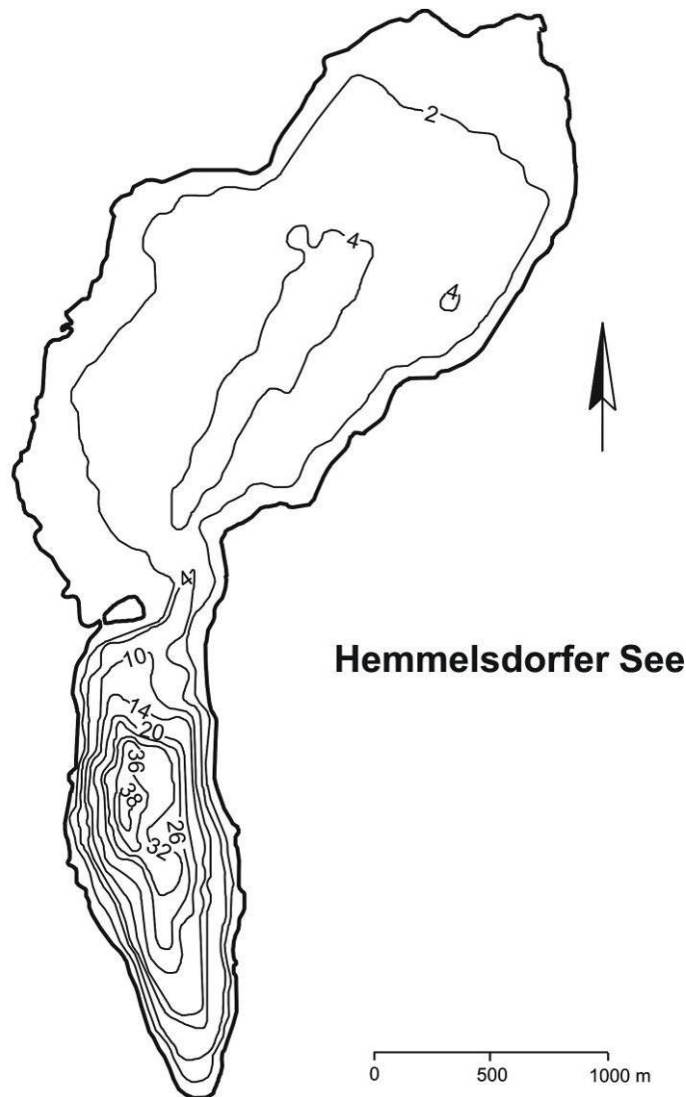


Abb. 50: Tiefenplan Hemmelsdorfer See

5.2 Randbedingungen Hemmelsdorfer See

Die Randbedingungen für den Hemmelsdorfer See wurden, wie in Kapitel 2 beschrieben in Zeitreihen für die obere und untere Modellgrenze unterteilt. Am oberen Modellrand wurde eine Zufluss- und eine Salzgehaltszeitreihe benötigt, am unteren eine Wasserstands- und ebenfalls eine Salzgehaltsganglinie. Aus der Regionalisierung der Abflüsse lassen sich für jedes Teileinzugsgebiet, und somit auch für den Pegelstandort und den Zufluss, die statistischen Hauptwerte MNQ, MQ, MHQ angeben. Anhand dieser Hauptwerte findet eine Übertragung der Ganglinie des Pegels Kossau auf den Zufluss anhand der vom LANU zur Verfügung gestellten Formeln statt. Die Formeln zur Berechnung der Zuflussganglinien lauten:

Für $Q \geq MQ$:

$$Q_2 = \frac{(Q_K - MQ_K)}{(MHQ_K - MQ_K)} \cdot (MHQ_2 - MQ_2) + MQ_2$$

Für $MNQ < Q < MQ$:

$$Q_2 = MQ_2 - \frac{(MQ_K - Q_K)}{(MQ_K - MNQ_K)} \cdot (MQ_2 - MNQ_2)$$

Für $Q < MNQ$:

$$Q_2 = Q_K \cdot \frac{MNQ_2}{MNQ_K}$$

Die Formeln wurden vom LANU geliefert und die damit erzeugten Randbedingungen geprüft. Der Zufluss zum Hemmelsdorfer See wurde aus der Zuflussganglinie des Großen Binnensees und somit aus dem Pegel der Kossau ermittelt. Hierzu wurde die Zuflussganglinie anhand der Einzugsgebietsgröße und den Hauptwerten des Hemmelsdorfer Sees skaliert, da keine Zuflussmessungen für den See vorliegen. Dies stellt eine gewisse Unsicherheit dar, ist aber für die zu untersuchende Aufgabenstellung ein ausreichend genauer Ansatz (Primär werden die Salzgehalte und nicht die Wasserstände betrachtet). Am unteren Rand wurde die Wasserstands- und die Salzgehaltsganglinie des nächstliegenden Ostseepegels verwendet.

Des Weiteren musste die Salzgehaltsmessung an der Messstelle Neustadt verlängert werden, da die gelieferten Daten nicht den kompletten Simulationszeitraum abdeckten. Für die Verlängerung wurden in Absprache mit dem LANU die Salzgehaltmessungen mit den an der Messstelle vorhandenen Daten ergänzt. Dies zeichnet sich in einer Periodizität der Zeitreihe ab (Abb. 52). Eine direkte Auswirkung hat diese Verlängerung auf die Simulation des Ist-Zustandes, der dadurch vom gemessenen Ist-Zustand abweichen kann. Im Weiteren Verlauf werden die Berechnungsergebnisse immer in Relation zum simulierten Ist-Zustandes gesetzt. Da alle Simulationen auf den gleichen Randbedingungen basieren und sich nur durch die Steuervarianten unterscheiden, kann direkt die Auswirkung der Steuerung auf den Salzgehalt als Ergebnis entnommen werden.

Die nachfolgenden Abb. 51 bis Abb. 54 sind die für das Modell Hemmelsdorfer See verwendeten Zeitreihen.

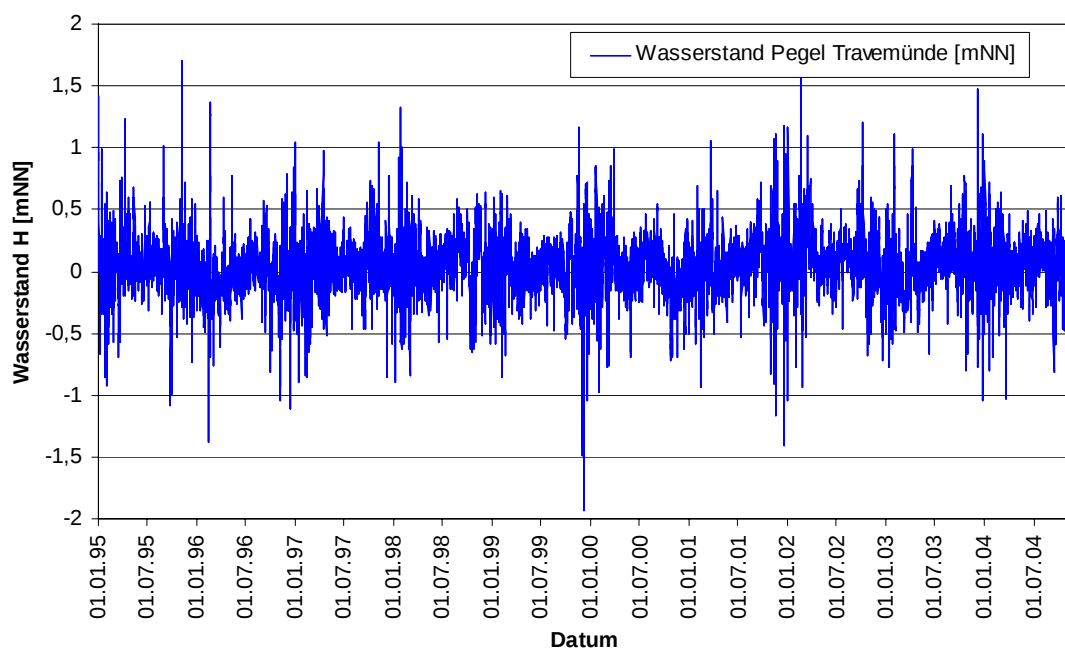


Abb. 51: Untere Randbedingung Hemmelsdorfer See Wasserstand Pegel Travemünde

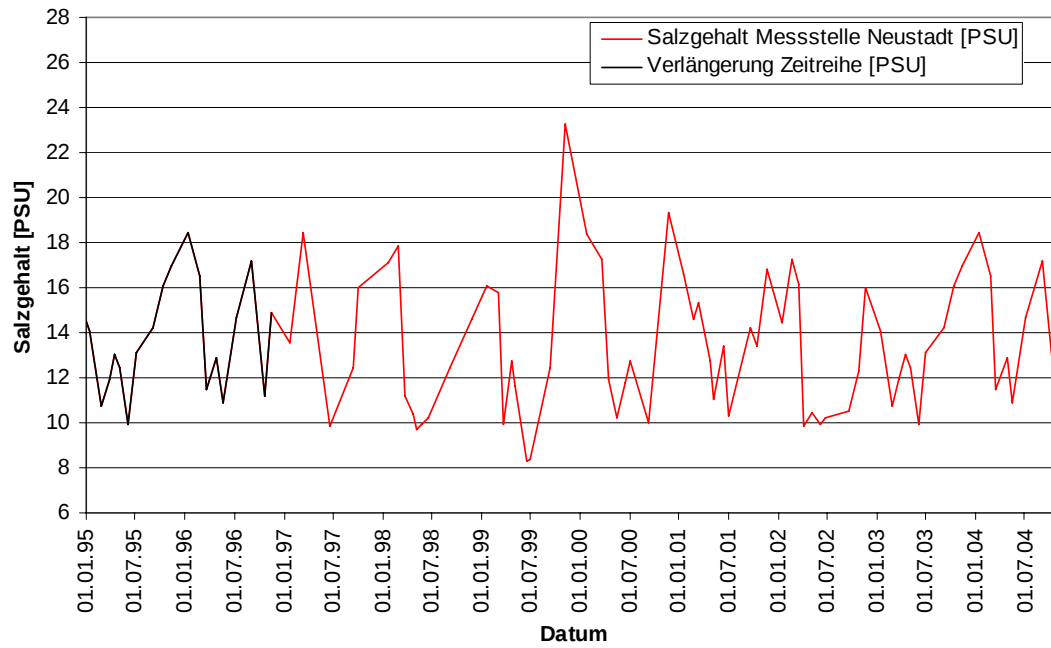


Abb. 52: Untere Randbedingung Hemmelsdorfer See Salzgehalt Messsstelle Neustadt

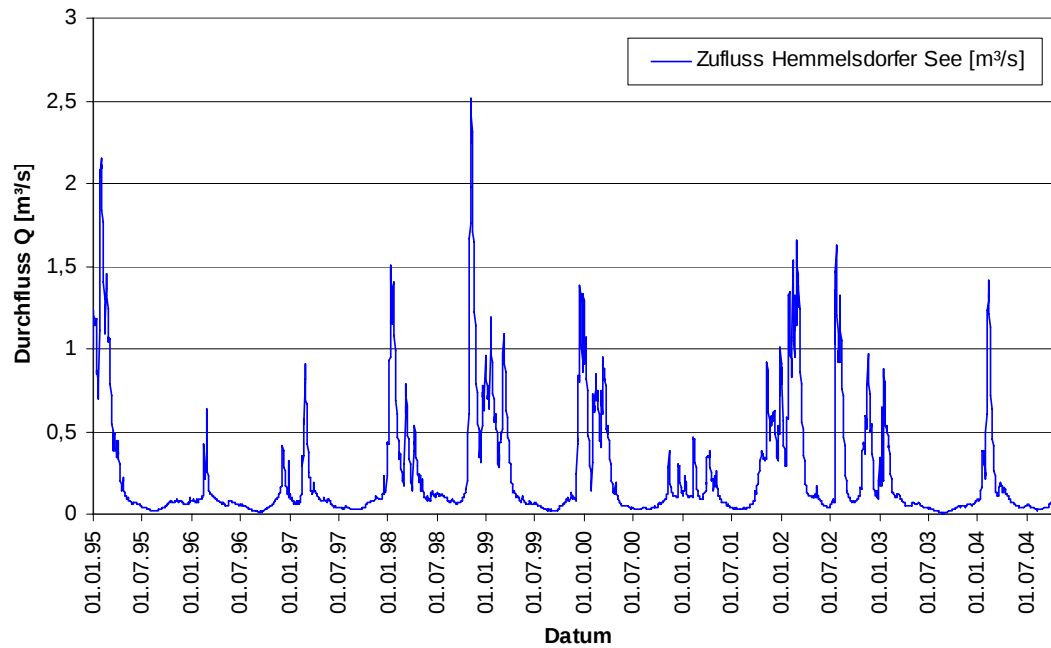


Abb. 53: Obere Randbedingung Zufluss Hemmelsdorfer See

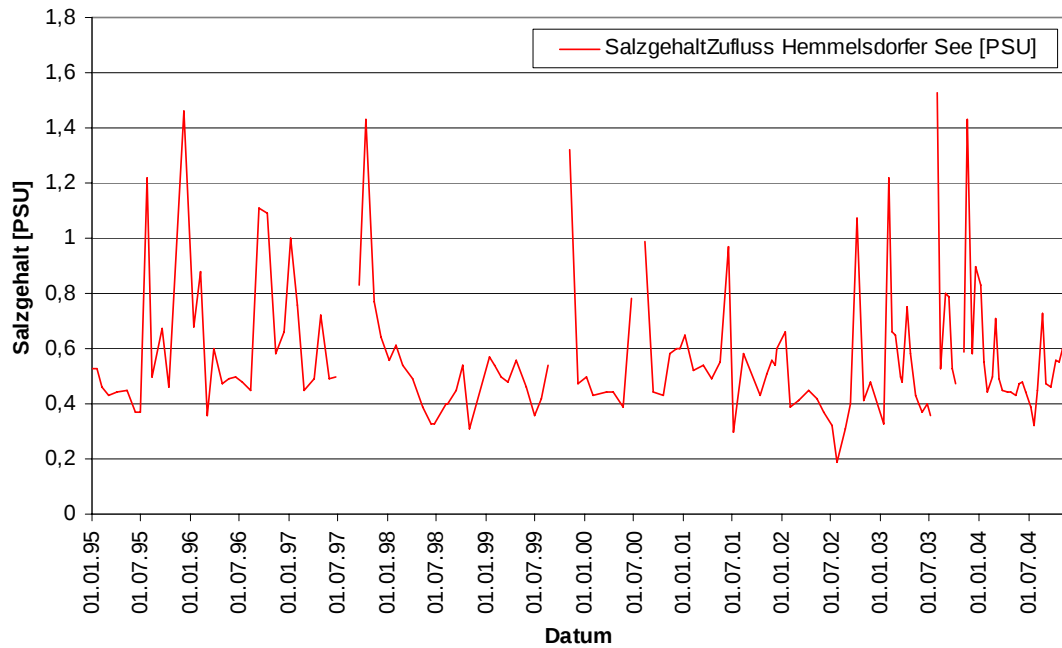


Abb. 54: Obere Randbedingung Salzgehalt Zufluss zum Hemmelsdorfer See

5.3 Simulation Ist-Zustand

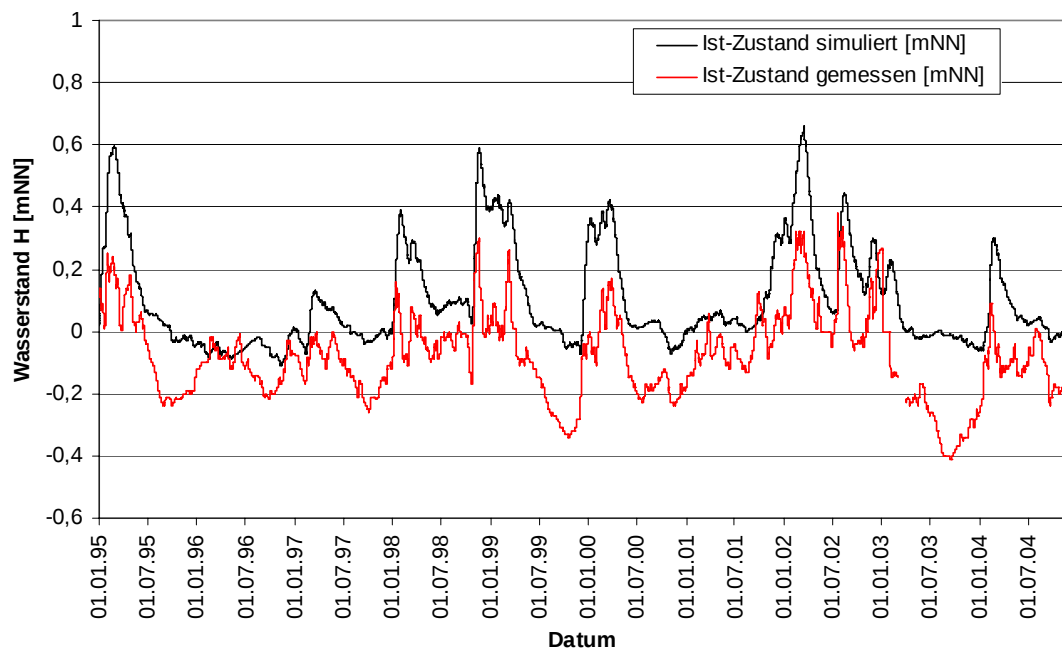


Abb. 55: Vergleich gemessener und simulierter Wasserstand (Hemmelsdorfer See)

Für die Simulation des Ist-Zustandes wurde die bestehende Wehranlage wie in Kap. 5.1 beschrieben gesteuert. Die durch diese Steuerung simulierte Wasserstandsganglinie ist in Abb. 55 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die simulierten Wasserstände den gleichen charakteristischen Verlauf aufweisen, wie die gemessenen Wasserstände. Bei den Abweichungen handelt es sich um den Bereich von 5 – 20 cm. Da es jedoch einige Deckungsbereiche der Kurven



gibt, ist davon auszugehen, dass die unsichere Zuflussrandbedingung für die Abweichungen verantwortlich ist. Es scheint, als ob der Zufluss zu groß ist und daher nicht genug Wasser in die Ostsee abfließen kann. Für die weitere Betrachtung der Ergebnisse stellt dies jedoch kein Problem dar, da das charakteristische Abflussverhalten gut nachgebildet werden konnte.

Die Simulation der Optimierung basiert auf den gleichen Rand- und Startbedingungen wie der modellierte Ist-Zustand. Im Simulationsverlauf der Optimierung gleicht sich der Wasserstand im See an die vorgegebenen Grenzwerte (Steuerwasserstände) an. Diese werden durch die Steuerstrategie vorgegeben.

Würde als Ausgangssituation der aufgetretene Ist-Zustand zugrunde gelegt werden und der Steuerstrategie (der Optimierung) unterworfen, so würde sich auch hier der Wasserstand im See an die vorgegebenen Grenzwerte annähern.

Der simulierte und gemessene Ist-Zustand verhält sich hier anders. Die Steuerung ist auf eine maximale Sielleistung ausgelegt. Ein zu niedriger Startwasserstand kann nur durch einen erhöhten Zufluss ausgeglichen werden, da ein Einstrom in den Strandsee durch die vorgegebene Steuerung nicht möglich ist.

Abweichungen zwischen simulierten Wasserstand und Ist-Wasserstand haben keine Auswirkungen auf die Salzgebhaltsberechnung in der Optimierung. Für diese Szenarien erfolgt die Steuerung anhand von Wasserstandsgrenzwerten in den Seen. Die Bauwerkssteuerung anhand dieser Werte führen dazu, dass sich der Seewasserstand an die Grenzwerte angleicht. Der Zeitpunkt des Erreichens des Optimierungswasserstandes hängt davon ab, wie weit die Ausgangszustände davon entfernt sind.

Salzgehalte benötigen länger für die Angleichung, da hierfür entsprechend häufig, größere salzhaltige Ostseewassermengen zufließen müssen.

Ein weiterer Faktor für die Abweichung könnte die Wehrsteuerung sein, da die Lage der Kontrollpunkte für die Steuerung nicht genau getroffen wurde. So könnten abweichende Öffnungs- und Schließzeiten der Wehranlage entstanden sein. Dieses kann nur durch genaue Zeitangaben der Wehrstellungen vermieden werden.

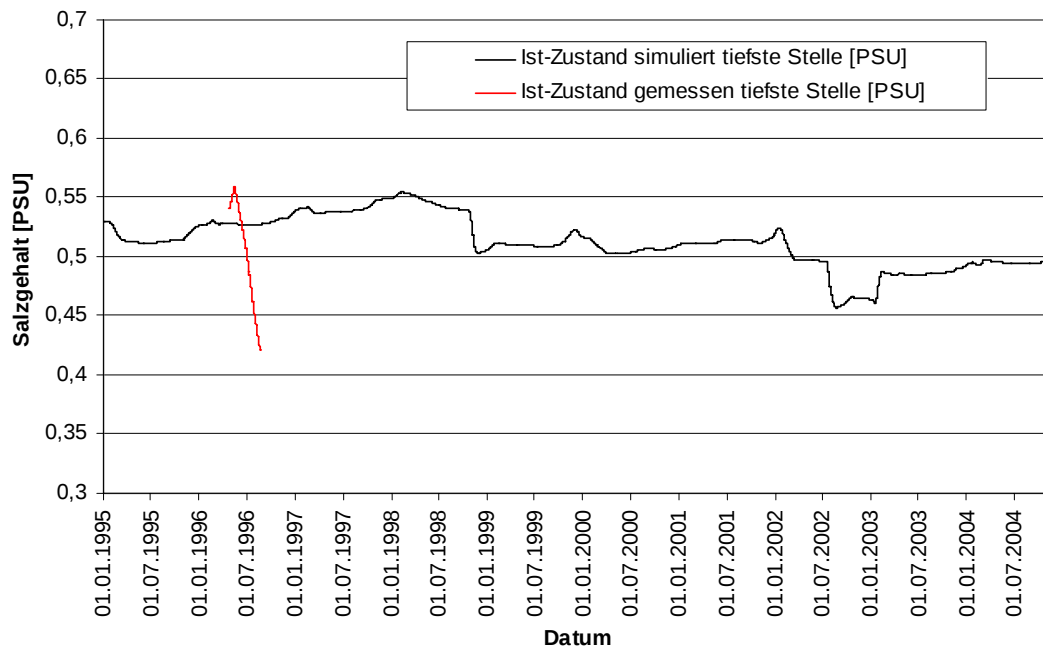


Abb. 56: Vergleich gemessener (tiefste Stelle) und simulierter (tiefste Stelle) Salzgehalt (Hemmelsdorfer See)

Bei der Simulation des Ist-Zustandes fällt auf, dass der simulierte Salzgehalt zum Teil geringer ausfällt als der Gemessene und zum Teil den Gemessenen übersteigt.

Eine genaue Aussage über die Genauigkeit der Simulation kann hier nicht getroffen werden, da für den Zeitraum der Messung die verlängerte Randbedingung der Ostsee zum Tragen kommt.

Ein weiterer Faktor für die Abweichung resultiert daraus, dass die Salzgehaltsmessungen nur an 5 Tagen durchgeführt wurden und zwischen den Stützpunkten linear interpoliert wurde. Der Vergleich findet somit zwischen einer kontinuierlich berechneten Salzgehaltsentwicklung und einer aus 5 Stützpunkten ermittelten Ganglinie statt.

Generell ist festzustellen, dass es sich um Abweichungen im Zehntel PSU-Bereich handelt, währenddessen die PSU Konzentrationen im ungestörten Zustand Werte von bis zu 22 [PSU] erreicht.



5.4 Simulation ungestörte Bedingungen

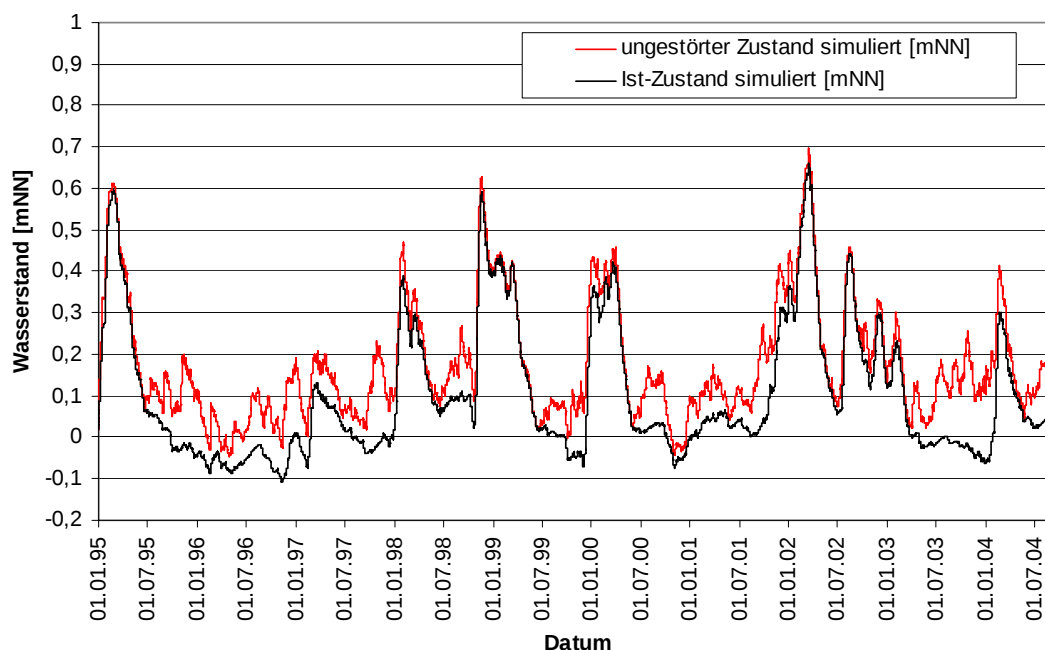


Abb. 57: Vergleich der Wasserstände ungestörter- und Ist-Zustand (Hemmelsdorfer See)

Bei der Berechnung des ungestörten Zustandes wurden alle Bauwerke als komplett geöffnet angesehen, da die Geometrie der Bauwerke als limitierender Faktor dienen sollte. Wären die Bauwerke komplett entnommen worden, so wäre die Entwicklung des Salzgehaltes nicht direkt auf die Steuerung zurückzuführen.

In Tab. 13 sind die mittleren und maximalen Wasserstände aufgeführt. Es ist zu erkennen, dass durch die komplette Öffnung des Bauwerkes der Seewasserstand im Mittel um 7 cm ansteigt. Dies ist auch dem Verlauf der Wasserstandsganglinie in Abb. 57 zu entnehmen.

Der maximale Wasserstand, der im Simulationszeitraum erreicht wurde, beträgt 0,70 mNN und liegt somit um 0,04 m höher als der maximale Wasserstand im simulierten Ist-Zustand. Hieraus ist ersichtlich, dass die Geometrie des Bauwerkes und die jetzige Steuerstrategie nahe dem ungestörten Zustand sind. Jedoch wird generell verhindert, dass Ostseewasser in den See einströmt und somit den Wasserstand im Hemmelsdorfer See anhebt.

Tab. 13: Wasserstandsentwicklung im Ist- und ungestörten Zustand (Hemmelsdorfer See)

Variante	Mittelwert Wasserstand [mNN]	Maximalwert Wasserstand [mNN]
Ist-Zustand	0,10	0,66
ungestörter Zustand	0,17	0,70

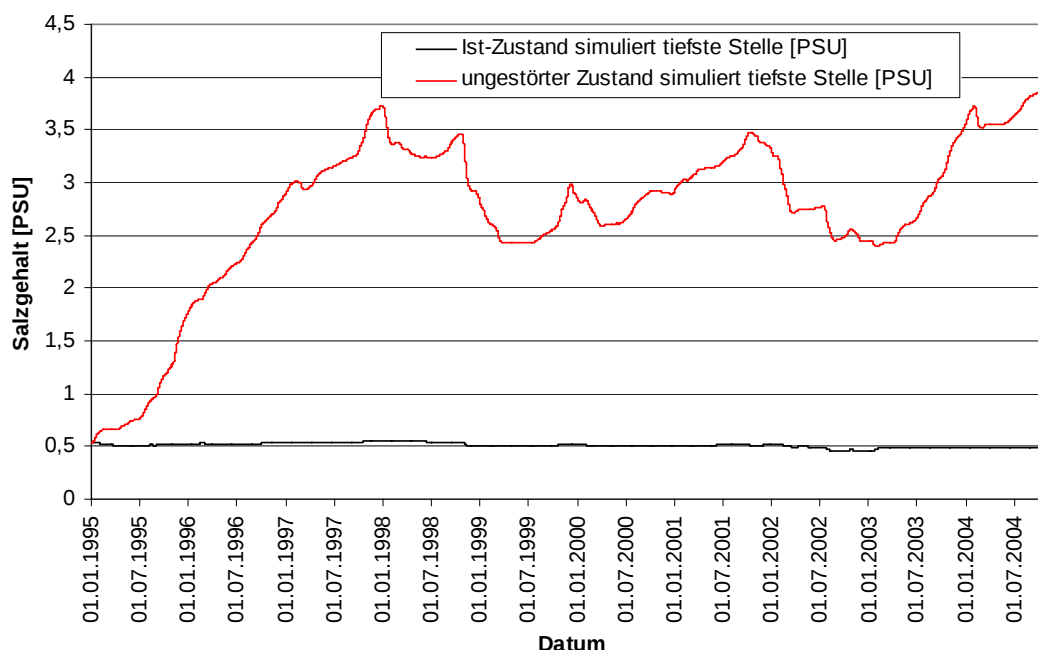


Abb. 58: Vergleich der Salzgehalte ungestörter Zustand (tiefste Stelle) und Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Hemmelsdorfer See)

Der Tab. 14 ist zu entnehmen, dass sich der Salzgehalt im Hemmelsdorfer See unter ungestörten Bedingungen anhebt. Dieser Prozess ist an allen Auswertepunkten zu erkennen. So steigt der mittlere Salzgehalt an der tiefsten Stelle von 0,51 PSU auf 2,97 PSU an und es wird ein maximaler Wert an der tiefsten Stelle im See von 4,03 PSU erreicht. Die Anhebung des Salzgehaltes ist ebenfalls der Abb. 58 und den Abb.-A. 16 bis Abb.-A. 18 im Anhang zu entnehmen. Die Widerversalzung ist ungefähr nach 2,5 Jahren abgeschlossen.

Tab. 14: Vergleich der mittleren und maximalen Salzgehalte für den Ist- und ungestörten Zustand (Hemmelsdorfer See)

	Variante	Mittelwert [PSU]	Maximalwert [PSU]
tiefste Stelle	Ist-Zustand	0,51	0,55
	ungestörter Zustand	2,97	4,03
Zulauf	Ist-Zustand	0,51	0,60
	ungestörter Zustand	2,80	3,90
Ablauf	Ist-Zustand	0,51	0,56
	ungestörter Zustand	3,91	19,79
gemittelt	Ist-Zustand	0,51	0,57
	ungestörter Zustand	2,93	4,61



5.5 Simulation optimierter Sielbetrieb

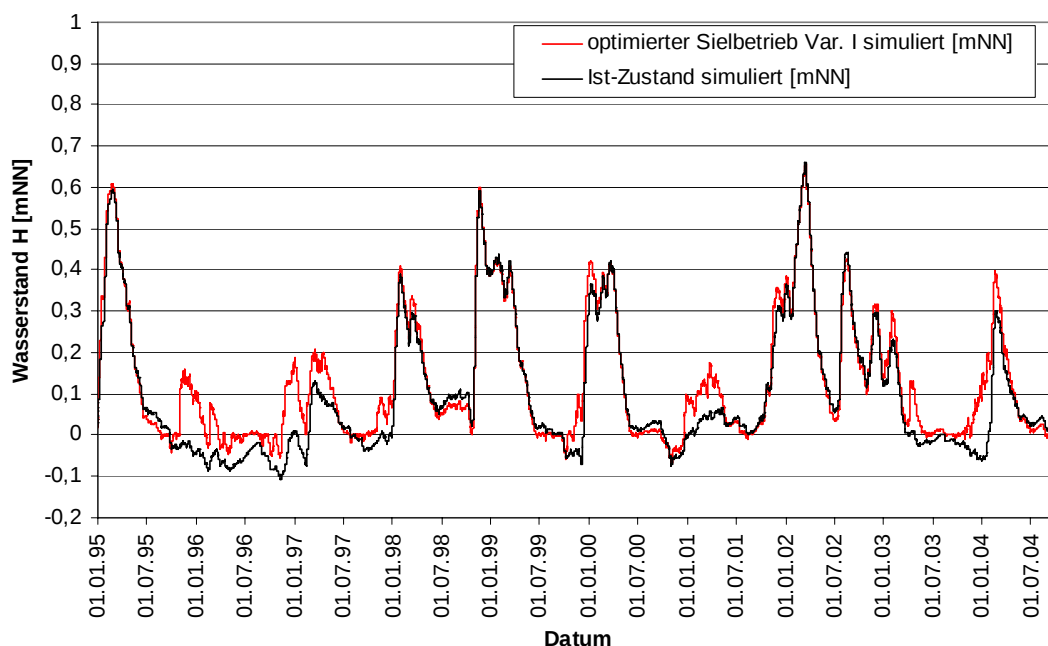


Abb. 59: Vergleich der Wasserstände optimierter Sielbetrieb Var. I und Ist-Zustand (Hemmelsdorfer See)

Beim optimierten Sielbetrieb am Hemmelsdorfer See wurde die Steuerung der Wehranlagen hinter den Rückstauklappen dahingehend geändert, dass diese sich nicht mehr auf den Wasserstand an der B 76 bezieht, sondern auf den Seewasserstand. Die Steuerung sah vor, dass die Öffnungszeiten des Wehres in Abhängigkeit von den Seewasserständen gesetzt wurden. Da die Optimierung unter Berücksichtigung der jetzigen Nutzung erfolgen sollte, wurden Seewasserstände festgelegt, die nicht überschritten werden sollten. Für den Hemmelsdorfer See sollten von November bis April die Seewasserstände nicht über 0,32 mNN liegen und in der Zeit von Mai bis Oktober nicht über 0,00 mNN. In der Variante I wurden daher diese Wasserstände als Regelwasserstände verwendet.

Die Wehranlage war daher immer geöffnet, solange der Seewasserstand die Grenzwerte unterschritt. Somit war ein maximaler Salzgehaltsaustausch unter Berücksichtigung der jetzigen Nutzung möglich.

Tab. 15: Wasserstandsentwicklung für die Variantenrechnungen (Hemmelsdorfer See)

Variante	Mittelwert Wasserstand [mNN]	Maximalwert Wasserstand [mNN]
Ist-Zustand	0,10	0,66
ungestörter Zustand	0,17	0,70
optimierter Sielbetrieb Var. I	0,13	0,65
optimierter Sielbetrieb Var. II	0,09	0,65

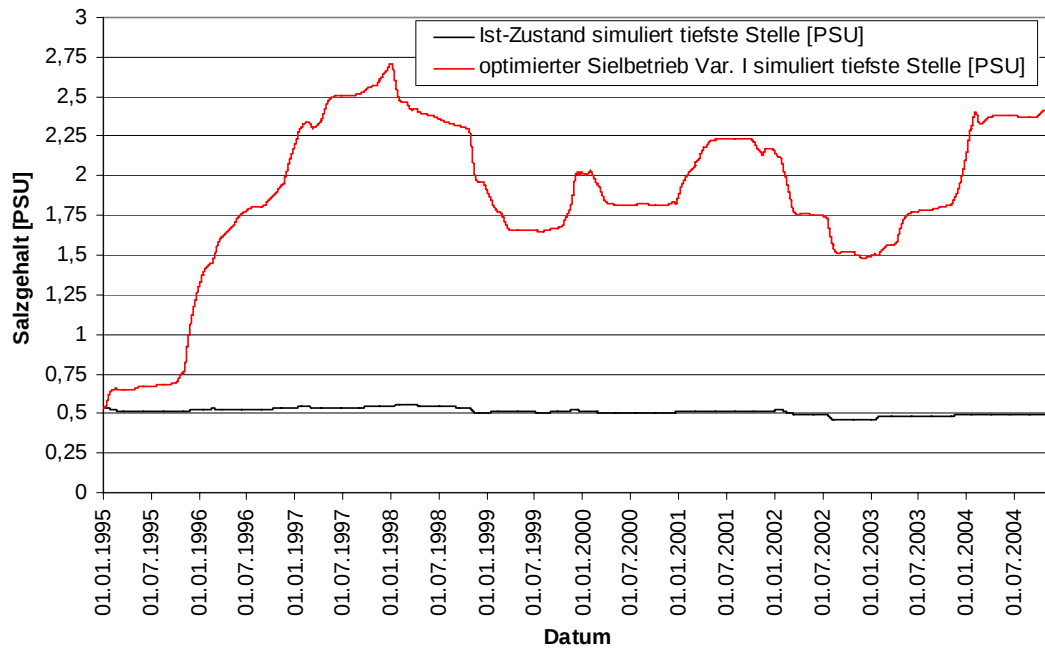


Abb. 60: Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (tiefste Stelle) und Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Hemmelsdorfer See)

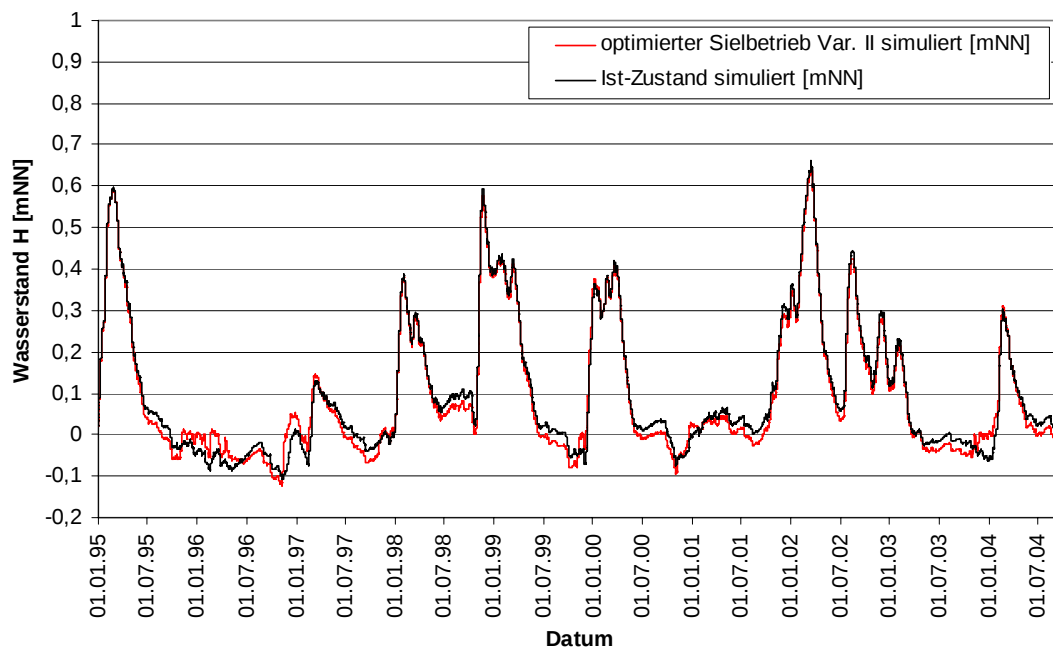


Abb. 61: Vergleich der Wasserstände optimierter Sielbetrieb Var. II und Ist-Zustand (Hemmelsdorfer See)

Das Ergebnis ist in Abb. 59 (Var. I), Abb. 61 (Var. II) und Tab. 15 dargestellt. Zu erkennen ist, dass für die Variante I die simulierte Ist-Zustands-Wasserstandsganglinie und auch die limitierenden Regelungswasserstände überschritten wurden. Daher wurde eine zweite Variante berechnet, die von November bis April Regelwasserstände von 0,00 mNN und in der Zeit von Mai bis Oktober Regelwasserstände von -0,32 mNN vorsah. Bei der Auswertung ist klar ersichtlich, dass die Wasserstandsganglinie die Regulierungswasserstände bis auf wenige



Ausnahmen einhält. Die Überschreitung der Regelungswasserstände in der Variante II fand auch im Referenzzustand zu den gleichen Zeitpunkten und mit der gleichen Intensität statt, so dass von einer Einhaltung der Optimierungsbedingung gesprochen werden kann.

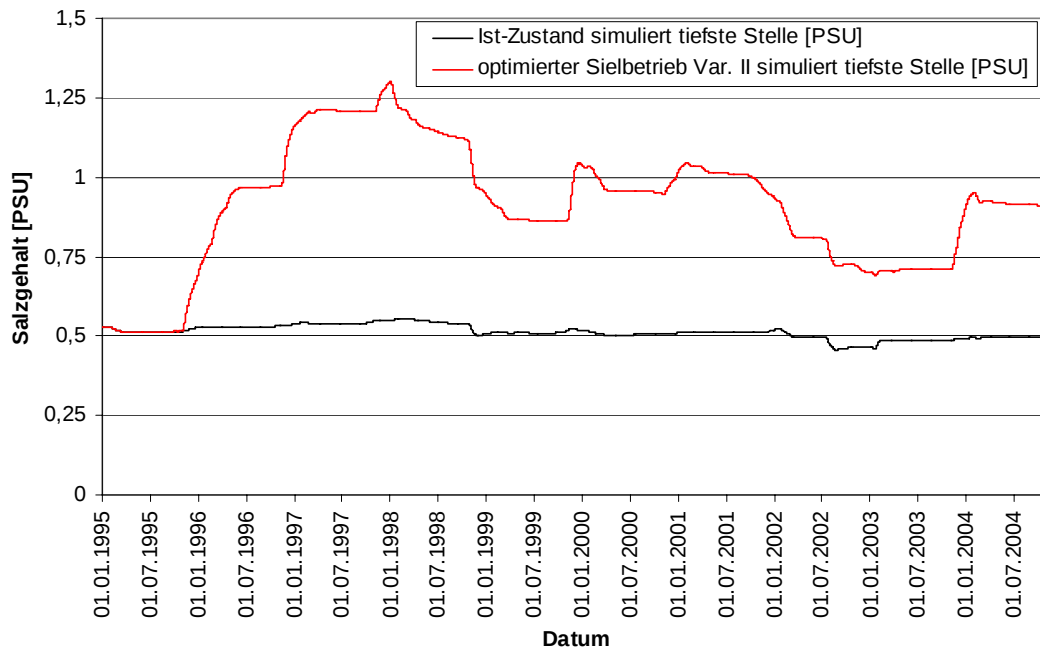


Abb. 62: *Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (tiefste Stelle) und Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Hemmelsdorfer See)*

Die Ergebnisse der Variante I sind den Abb. 60, Abb.-A. 19 bis Abb.-A. 21 (im Anhang), Tab. 15 und Tab. 16 zu entnehmen.

Bei der Auswertung der Tab. 16, der Abb. 62 und Abb.-A. 22 bis Abb.-A. 24 wird deutlich, dass durch eine optimierte Bauwerkssteuerung der Salzgehalt im See wieder angehoben werden kann. An der tiefsten Stelle werden im Mittel 0,96 PSU erreicht und in der Spitze 1,30 PSU. Die Anhebung des Salzgehaltes wurde in der Variante II nach ca. 1,5 Jahren erreicht. Da sich die Wasserstände von Variante II und dem Ist-Zustand nur wenig unterscheiden, kommt es auch nur zu einer geringen Anhebung des Salzgehaltes. Da die Wasserstände in Variante I nicht wesentlich höher ansteigen als in Variante II (in den extremen Wasserständen kommt es zu fast keinen Abweichungen), wäre dies auch eine Steuervariante für die Anhebung des Salzgehaltes. Mit der Variante I könnten an der tiefsten Stelle im Mittel 2,02 PSU und in der Spitze 2,71 PSU erreicht werden. Die Anhebung des Salzgehaltes wurde in der Variante I ebenfalls nach ca. 1,5 Jahren erreicht.

Tab. 16: *Vergleich der mittleren und maximalen Salzgehalte für die Variantenrechnungen (Hemmeldorfer See)*

	Variante	Mittelwert [PSU]	Maximalwert [PSU]
tiefste Stelle	Ist-Zustand	0,51	0,55
	ungestörter Zustand	2,97	4,03
	optimierter Sielbetrieb Var. I	2,02	2,71
	optimierter Sielbetrieb Var. II	0,96	1,30
Zulauf	Ist-Zustand	0,51	0,60
	ungestörter Zustand	2,80	3,90
	optimierter Sielbetrieb Var. I	1,91	2,58
	optimierter Sielbetrieb Var. II	0,92	1,25
Ablauf	Ist-Zustand	0,51	0,56
	ungestörter Zustand	3,91	19,79
	optimierter Sielbetrieb Var. I	2,69	21,13
	optimierter Sielbetrieb Var. II	1,22	22,30
gemittelt	Ist-Zustand	0,51	0,57
	ungestörter Zustand	2,93	4,61
	optimierter Sielbetrieb Var. I	2,00	3,78
	optimierter Sielbetrieb Var. II	0,96	3,03



6 NEUSTÄDTER BINNENWASSER

6.1 Allgemein

Das Modell Neustädter Binnenwasser wurde anhand der in Kapitel 2 beschriebenen Arbeitsschritte erstellt. Der See hat eine Fläche von 1,46 km² und ein Volumen von 1.350.000 m³ bei 0,00 mNN laut Bericht „Seen an der Nord- und Ostseeküste“. Bei der Volumenkontrolle des auf Basis des in Abb. 64 dargestellten Tiefenplans erstellten Geländemodells ergibt ein Volumen von 1.291.950 m³. Das entspricht einer Abweichung von rund 4,7 %. Für den Betrieb des Modells ist das eine ausreichend genaue Abbildung der Geometrie.

Der See ist nicht von der Ostsee abgekoppelt. Daher ist er auch nicht versüßt. Die einzigen Bauwerke im See stellen drei Brückendurchlässe dar. Zwei von ihnen teilen den See in drei Teile. Die Dritte stellt die Abgrenzung in Richtung Ostsee dar. Diese ist nicht Bestandteil des Berechnungsmodells.



Abb. 63: Neustädter Binnenwasser

Die Abmessungen der Brücken sind Tab. 17 zu entnehmen.

Tab. 17: Durchlassabmessungen Neustädter Binnenwasser

Bauwerksart	Anzahl Öffnungen	Länge [m]	Breite [m]	Geometrie
Durchlass Brücke	1	20,00	4,50	siehe *.xns-Datei
Durchlass Brücke	1	26,00	22,00	siehe *.xns-Datei

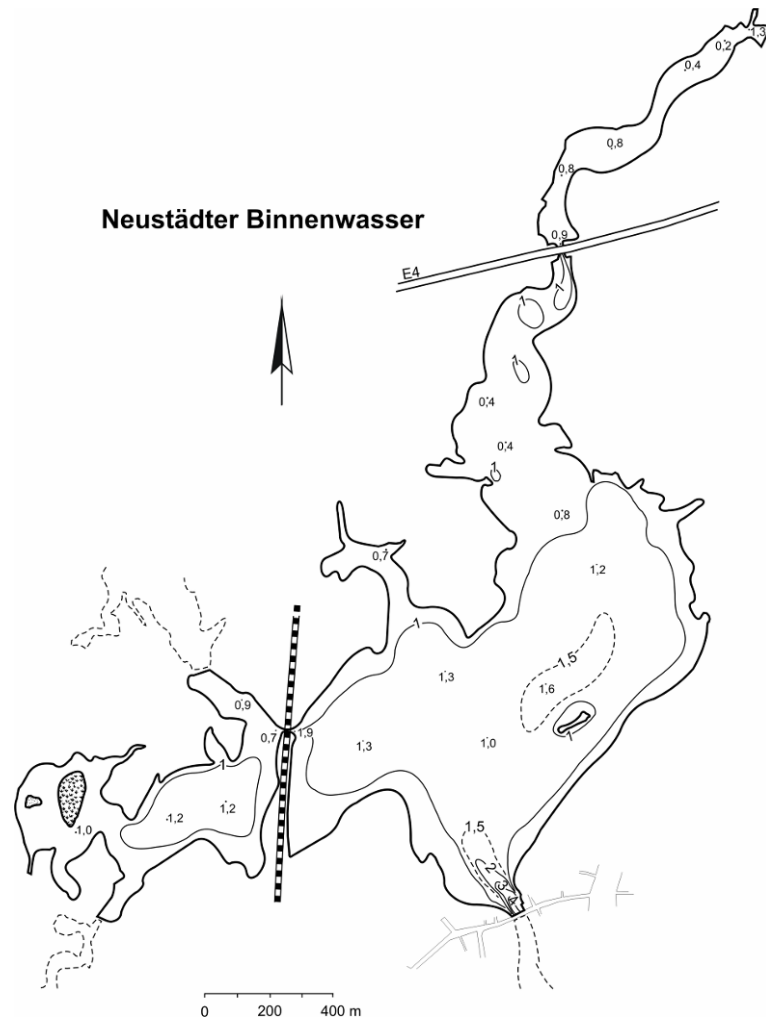


Abb. 64: Tiefenplan Neustädter Binnenwasser

6.2 Randbedingungen Neustädter Binnenwasser

Die Randbedingungen für das Neustädter Binnenwasser wurden, wie in Kapitel 2 beschrieben, in Zeitreihen für die obere und untere Modellgrenze unterteilt. An den oberen Modellrändern wurden Zufluss- und Salzgehaltszeitreihen benötigt, am unteren eine Wasserstands- und ebenfalls eine Salzgehaltsganglinie. Aus der Regionalisierung der Abflüsse lassen sich für jedes Teileinzugsgebiet, und somit auch für den Pegelstandort und den Zufluss, die statistischen Hauptwerte MNQ, MQ, MHQ angeben. Anhand dieser Hauptwerte findet eine Übertragung der Ganglinie des Pegels Kossau auf den Zufluss anhand der vom LANU zur Verfügung gestellten Formeln statt. Die Formeln zur Berechnung der Zuflussganglinien lauten:

Für $Q \geq MQ$:

$$Q_2 = \frac{(Q_K - MQ_K)}{(MHQ_K - MQ_K)} \cdot (MHQ_2 - MQ_2) + MQ_2$$

Für $MNQ < Q < MQ$:

$$Q_2 = MQ_2 - \frac{(MQ_K - Q_K)}{(MQ_K - MNQ_K)} \cdot (MQ_2 - MNQ_2)$$



Für $Q < MNQ$:

$$Q_2 = Q_K \cdot \frac{MNQ_2}{MNQ_K}$$

Die Formeln wurden vom LANU geliefert und die damit erzeugten Randbedingungen geprüft. Der Zufluss zum Neustädter Binnenwasser wurde aus der Zuflussganglinie des Großen Binnensees und somit aus dem Pegel der Kossau ermittelt. Hierzu wurde die Zuflussganglinie anhand der Einzugsgebietsgröße und den Hauptwerten des Neustädter Binnenwassers skaliert, da keine Zuflussmessungen für den See vorliegen. Dies stellt eine gewisse Unsicherheit dar, ist aber für die zu untersuchende Aufgabenstellung ein ausreichend genauer Ansatz (Primär werden die Salzgehalte und nicht die Wasserstände betrachtet). Am unteren Rand wurde die Wasserstandsganglinie und die Salzgehaltsganglinie des nächstliegenden Ostseepegels verwendet.

Des Weiteren musste die Salzgehaltmessung an der Messstelle Neustadt verlängert werden, da die gelieferten Daten nicht den kompletten Simulationszeitraum abdeckten. Für die Verlängerung wurden in Absprache mit dem LANU die Salzgehaltmessungen mit den an der Messstelle vorhandenen Daten ergänzt. Dies zeichnet sich in einer Periodizität der Zeitreihe ab (Abb. 66). Eine direkte Auswirkung hat diese Verlängerung auf die Simulation des Ist-Zustandes, der dadurch vom gemessenen Ist-Zustand abweichen kann.

Die nachfolgenden Abb. 65 bis Abb. 68 sind die für das Modell Neustädter Binnenwasser verwendeten Zeitreihen.

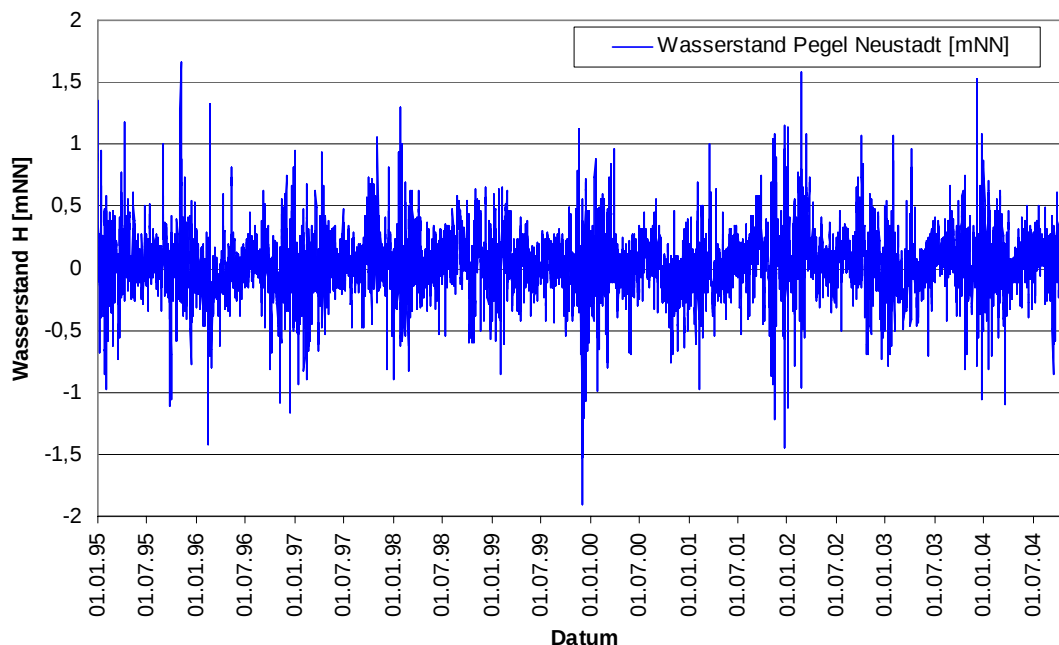


Abb. 65: Untere Randbedingung Neustädter Binnenwasser Wasserstand Pegel Neustadt

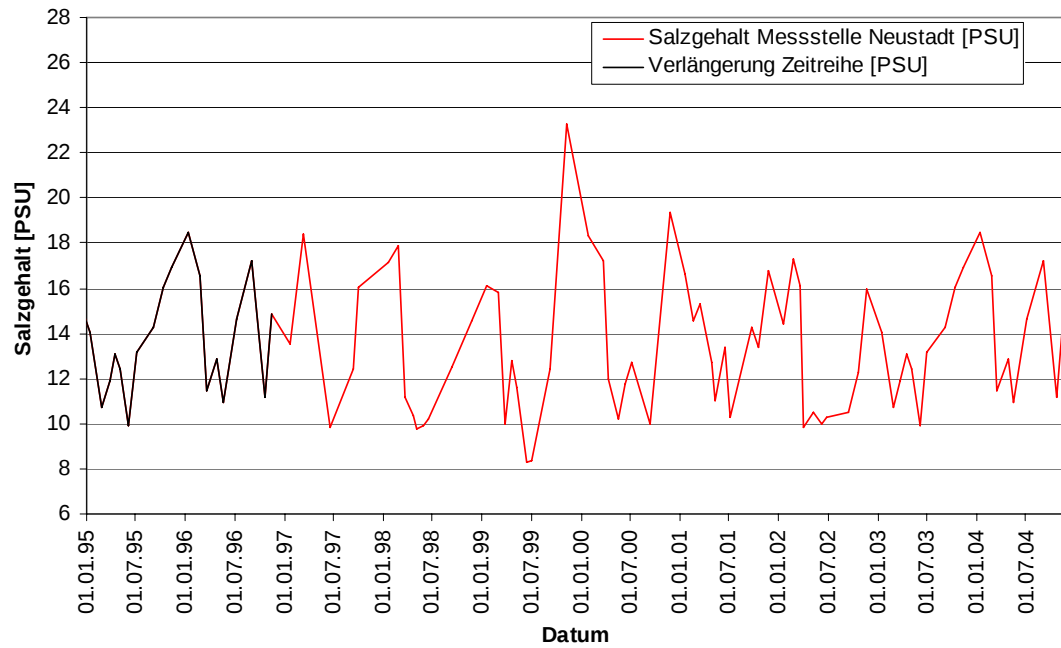


Abb. 66: Untere Randbedingung Neustädter Binnenwasser Salzgehalt Messstelle Neustadt

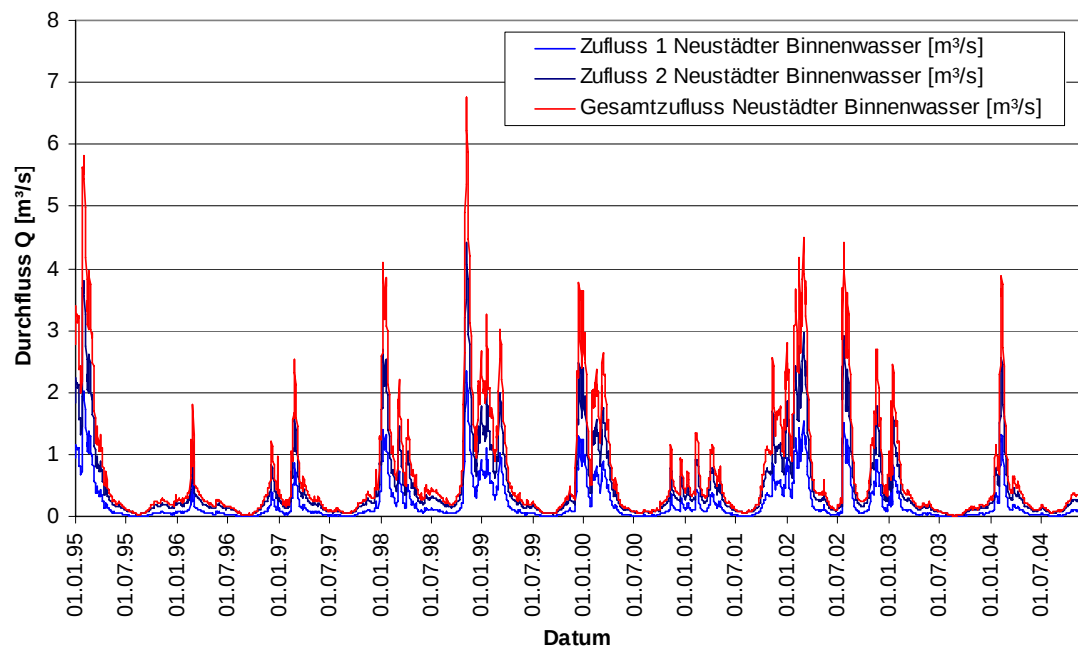


Abb. 67: Obere Randbedingung Zufluss Neustädter Binnenwasser

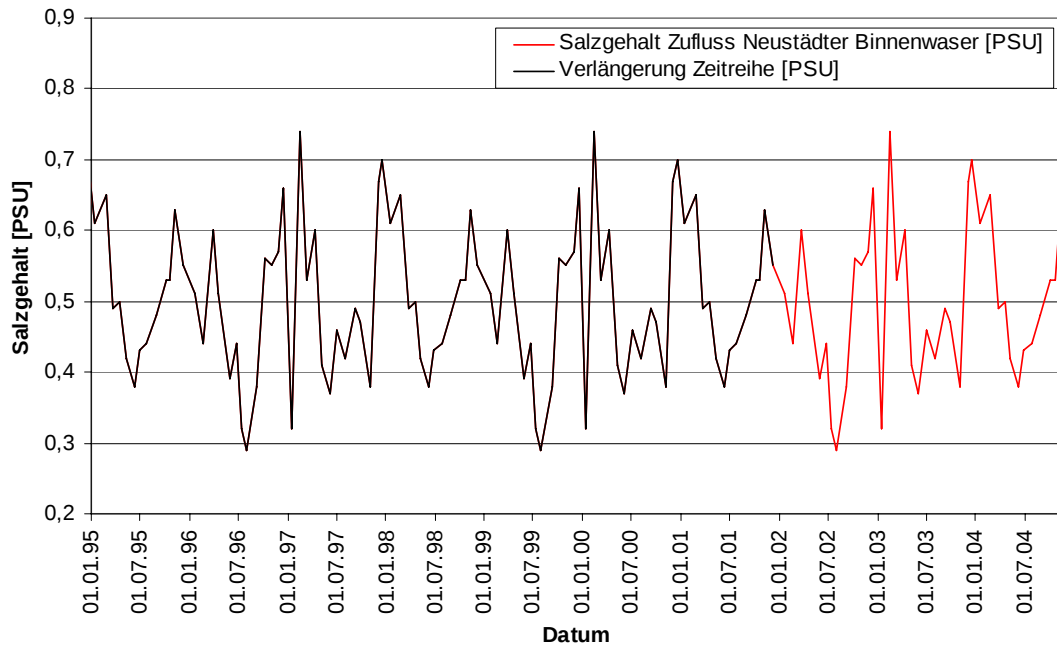


Abb. 68: Obere Randbedingung Salzgehalt Zufluss zum Neustädter Binnensee

6.3 Simulation Ist-Zustand

Bei der Berechnung des durch Bauwerke unbeeinflussten Neustädter Binnenwassers ist zu erkennen, dass sich die simulierten und gemessenen Wasserstände weitestgehend decken (Tab. 18). Die Abweichungen, die in der Detailansicht Abb. 70 erkennbar sind, ergeben sich dabei aus der unsicheren Zuflussrandbedingung die aus dem Zufluss zum Gr. Binnensee abgeleitet wurde. Weiterhin ist erkennbar, dass im Zeitraum vom 22.09.04 22.00 Uhr – 27.09.04 10.00 Uhr der Pegel nicht aufgezeichnet hat.

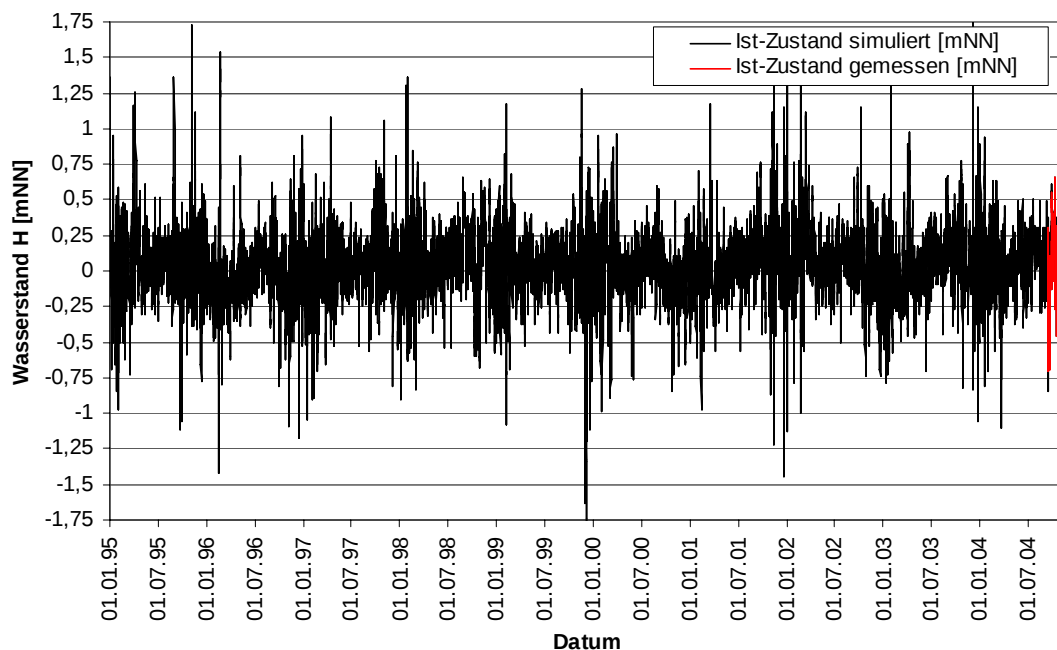


Abb. 69: Vergleich gemessener und simulierter Wasserstand (Neustädter Binnenwasser)

Tab. 18: Wasserstände im Ist- Zustand (Neustädter Binnenwasser)

Variante	Mittelwert Wasserstand [mNN]	Maximalwert Wasserstand [mNN]
Ist-Zustand gemessen	0,04	0,66
Ist-Zustand simuliert	0,04	0,66

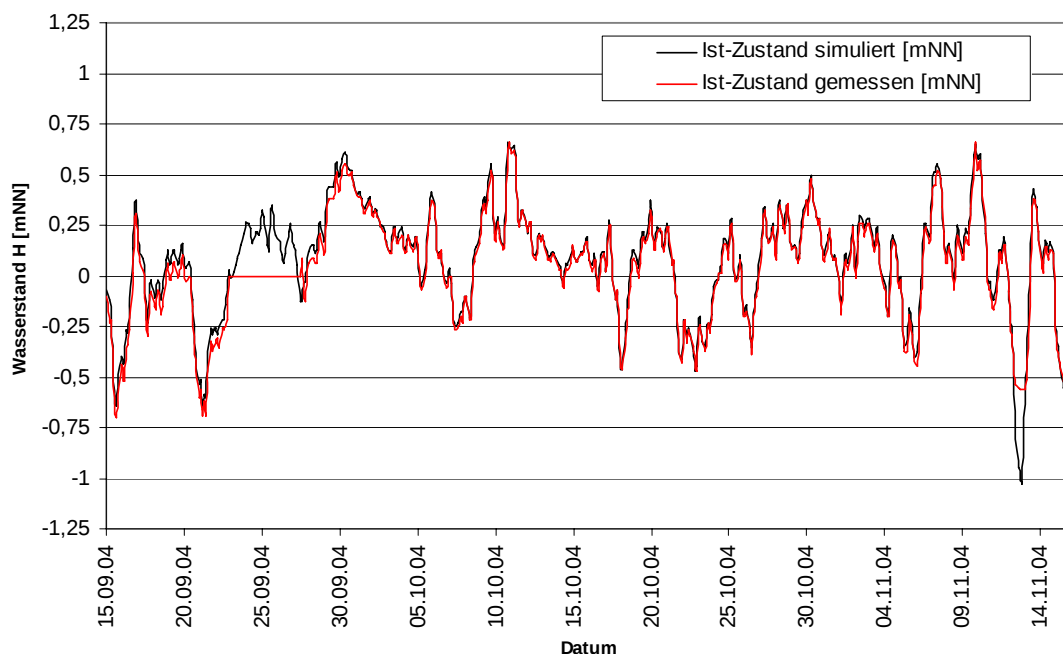


Abb. 70: Detailansicht: Vergleich gemessener und simulierter Wasserstand (Neustädter Binnenwasser)

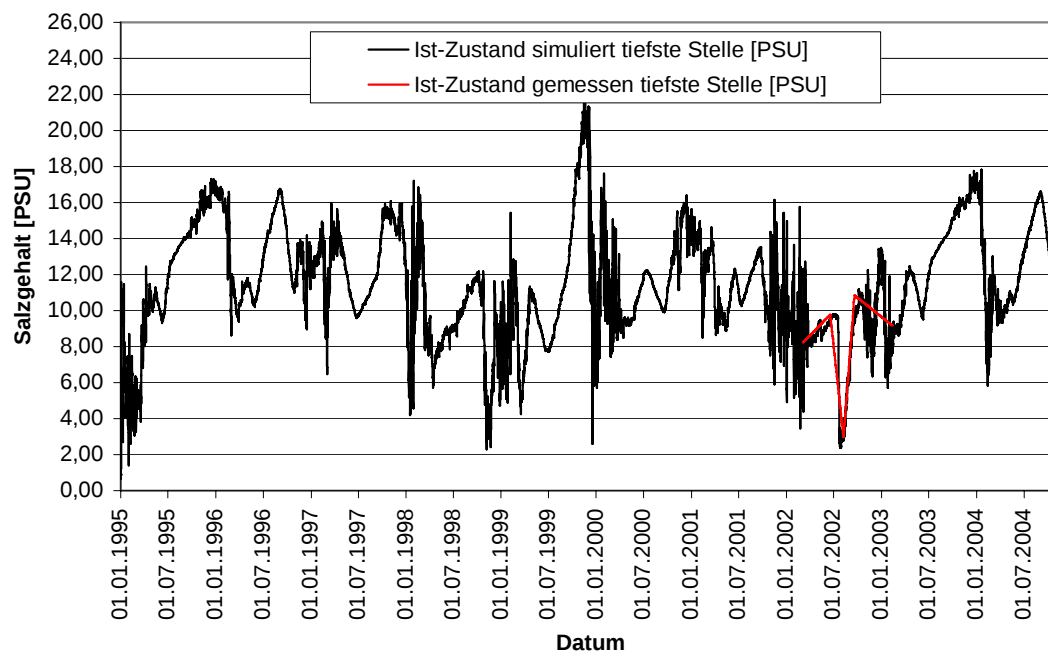


Abb. 71: Vergleich gemessener (tiefste Stelle) und simulierter (tiefste Stelle) Salzgehalt (Neustädter Binnenwasser)



Bei der Berechnung des Salzgehaltes ist zu erkennen, dass sich bei ungestörten Bedingungen die Salzgehalte im See genau berechnen lassen. Die Schwingungen in der Zeitreihe resultieren aus dem letzten Querschnitt, der den Ausstromrand darstellt und an dem es zu Reflexionen kommt.

Da die zum Vergleich dienende Salzgehaltsganglinie nur aus 5 Stützpunkten erzeugt wurde, konnten die zwei errechneten Spitzen aus Abb. 71 nicht mit Messwerten belegt werden.

Tab. 19: Salzgehalte im Ist- Zustand (Neustädter Binnenwasser)

	Variante	Mittelwert [PSU]	Maximalwert [PSU]
tiefste Stelle	Ist-Zustand gemittelt tiefste Stelle	8,78	10,85
	Ist-Zustand simuliert	11,41	22,25
Zulauf 1	Ist-Zustand gemittelt tiefste Stelle	8,78	10,85
	Ist-Zustand simuliert	4,56	17,61
Zulauf 2	Ist-Zustand gemittelt tiefste Stelle	8,78	10,85
	Ist-Zustand simuliert	4,40	16,65
Ablauf	Ist-Zustand gemittelt tiefste Stelle	8,78	10,85
	Ist-Zustand simuliert	12,88	23,21
gemittelt	Ist-Zustand gemittelt tiefste Stelle	8,78	10,85
	Ist-Zustand simuliert	10,86	21,56

Die Darstellung zeigt, dass die Modellqualität für die Berechnung der Salzgehalte bei der Verwendung von guten Randbedingungen auch genaue Ergebnisse liefert. Sind alle Daten verlässlich oder wie in diesem Fall ausreichend genau genähert, so lassen sich gute Ergebnisse erzielen. Die Ergebnisse für die Auswertung des Ist-Zustandes sind in diesem Fall optimal. Da jedoch die Entwicklung des Salzgehaltes im Vordergrund steht, sind bei der Auswertung der anderen Strandseen die simulierten Referenz Ist-Zustände von größerer Bedeutung, da diese in Bezug zu den anderen Steuervarianten gestellt werden, die von gleichen Startrandbedingungen ausgehen.

7 SCHWANSENER SEE

7.1 Allgemein

Das Modell Schwansener See wurde anhand der in Kapitel 2 beschriebenen Arbeitsschritte erstellt. Der See hat eine Fläche von 1,11 km² und ein Volumen von 920.000 m³ bei 0,00 mNN laut Bericht „Seen an der Nord- und Ostseeküste“. Bei der Volumenkontrolle des auf Basis des in Abb. 73 dargestellten Tiefenplans erstellten Geländemodells ergibt ein Volumen von 875.859 m³. Das entspricht einer Abweichung von rund 4,8 %. Für den Betrieb des Modells ist das eine ausreichend genaue Abbildung der Geometrie.

Der See ist durch eine unterirdische Schleuse mit anschließendem Rohrdurchlass von der Ostsee abgekoppelt (Abb. 72). In der Schleuse befinden sich Stemmtore, die eine Rückströmung in den See verhindern.



Abb. 72: links: Einlauf unterirdische Schleuse; rechts: Auslaufbauwerk Ostsee

Die Bauwerke haben die in Tab. 20 aufgeführten Abmessungen. In das Modell wurde nur ein Bauwerk mit den reglementierenden Abmessungen (Tab. 20 3 Zeile 2) eingebaut.

Tab. 20: Durchlassabmessungen Schwansener See

Bauwerksart	Anzahl Öffnungen	Länge [m]	Höhe [m]	Breite [m]	Geometrie
Schleuse	1	6,00	2,95	3,20	siehe *.xns-Datei
Durchlass	1	85,00	1,61	2,00	siehe *.xns-Datei



Schwansener See

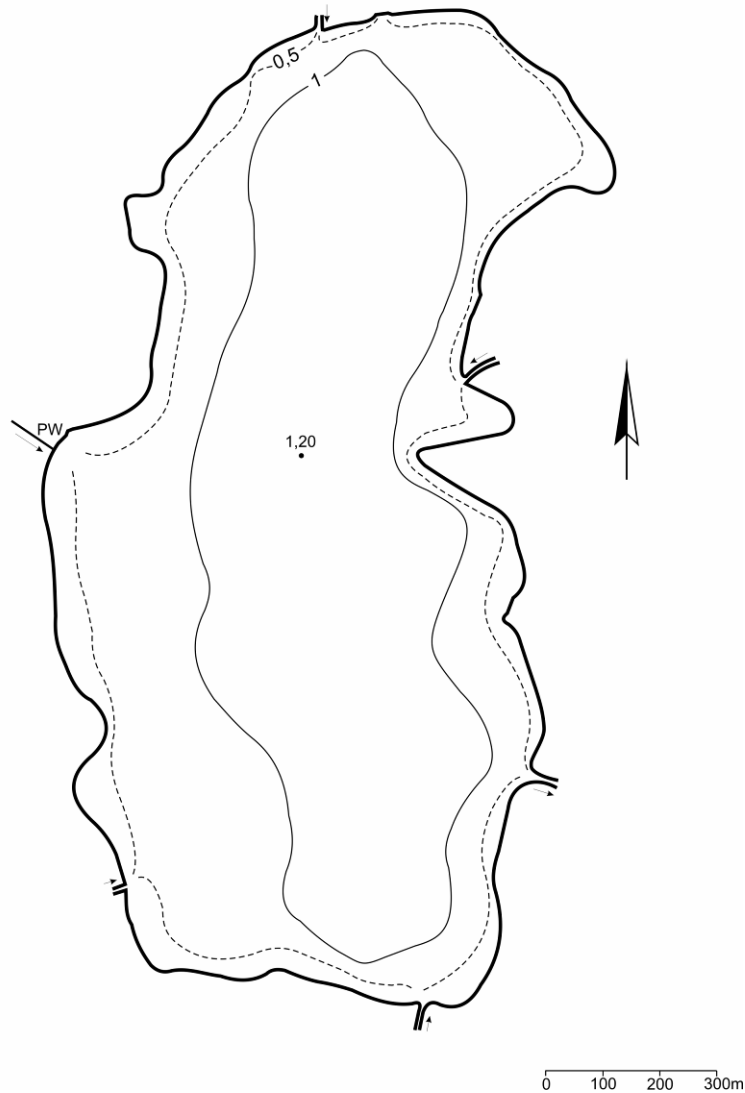


Abb. 73: Tiefenplan Schwansener See

7.2 Randbedingungen Schwansener See

Die Randbedingungen für den Schwansener See wurden, wie in Kapitel 2 beschrieben, in Zeitreihen für die obere und untere Modellgrenze unterteilt. Am oberen Modellrand wurden eine Zufluss- und eine Salzgehaltszeitreihe benötigt, am unteren eine Wasserstands- und ebenfalls eine Salzgehaltsganglinie. Aus der Regionalisierung der Abflüsse lassen sich für jedes Teileinzugsgebiet, und somit auch für den Pegelstandort und den Zufluss, die statistischen Hauptwerte MNQ, MQ, MHQ angeben. Anhand dieser Hauptwerte findet eine Übertragung der Ganglinie des Pegels Kossau auf den Zufluss anhand der vom LANU zur Verfügung gestellten Formeln statt. Die Formeln zur Berechnung der Zuflussganglinien lauten:

Für $Q \geq MQ$:

$$Q_2 = \frac{(Q_K - MQ_K)}{(MHQ_K - MQ_K)} \cdot (MHQ_2 - MQ_2) + MQ_2$$

Für $MNQ < Q < MQ$:

$$Q_2 = MQ_2 - \frac{(MQ_K - Q_K)}{(MQ_K - MNQ_K)} \cdot (MQ_2 - MNQ_2)$$

Für $Q < MNQ$:

$$Q_2 = Q_K \cdot \frac{MNQ_2}{MNQ_K}$$

Die Formeln wurden vom LANU geliefert und die damit erzeugten Randbedingungen geprüft. Der Zufluss zum Schwansener See wurde aus der Zuflussganglinie des Großen Binnensees und somit aus dem Pegel der Kossau ermittelt. Hierzu wurde die Zuflussganglinie anhand der Einzugsgebietsgröße und den Hauptwerten des Schwansener Sees skaliert, da keine Zuflussmessungen für den See vorliegen. Dies stellt eine gewisse Unsicherheit dar, ist aber für die zu untersuchende Aufgabenstellung ein ausreichend genauer Ansatz (Primär werden die Salzgehalte und nicht die Wasserstände betrachtet). Am unteren Rand wurde die Wasserstandsganglinie und die Salzgehaltsganglinie des nächstliegenden Ostseepegels verwendet.

Die nachfolgenden Abb. 74 bis Abb. 77 sind die für das Modell Schwansener See verwendeten Zeitreihen.

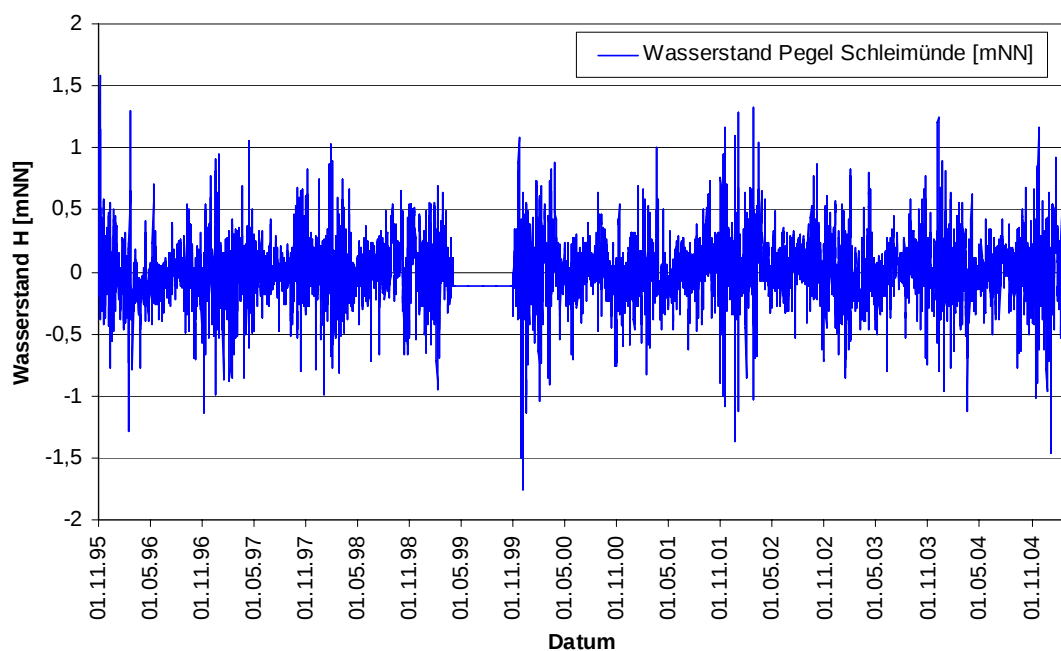


Abb. 74: Untere Randbedingung Schwansener See Wasserstand Pegel Schleimünde

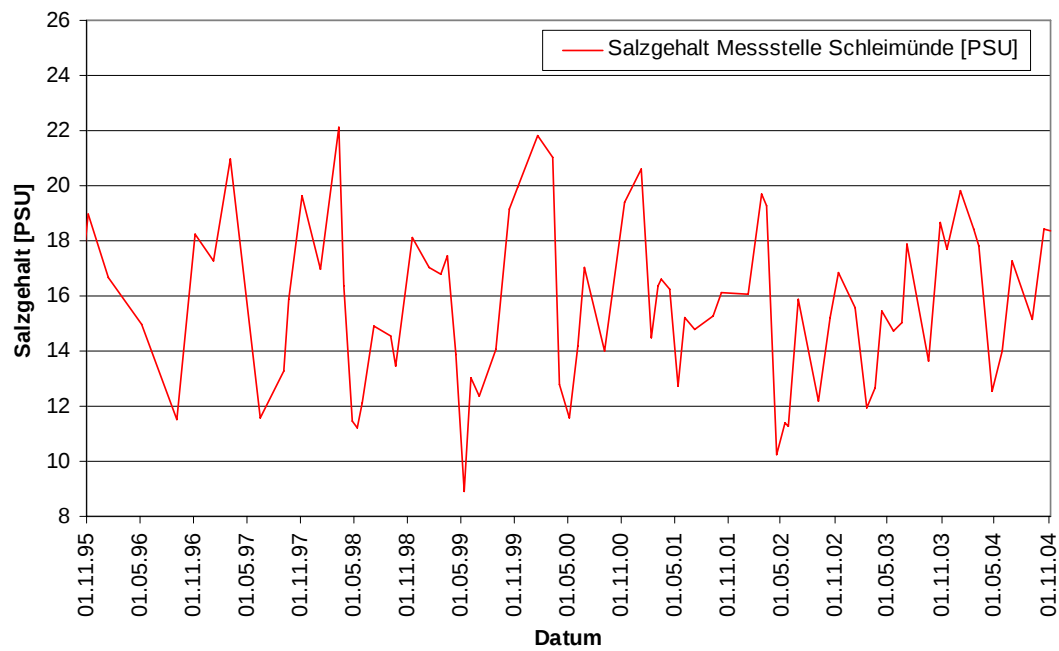


Abb. 75: Untere Randbedingung Schwansener See Salzgehalt Messstelle Schleimünde

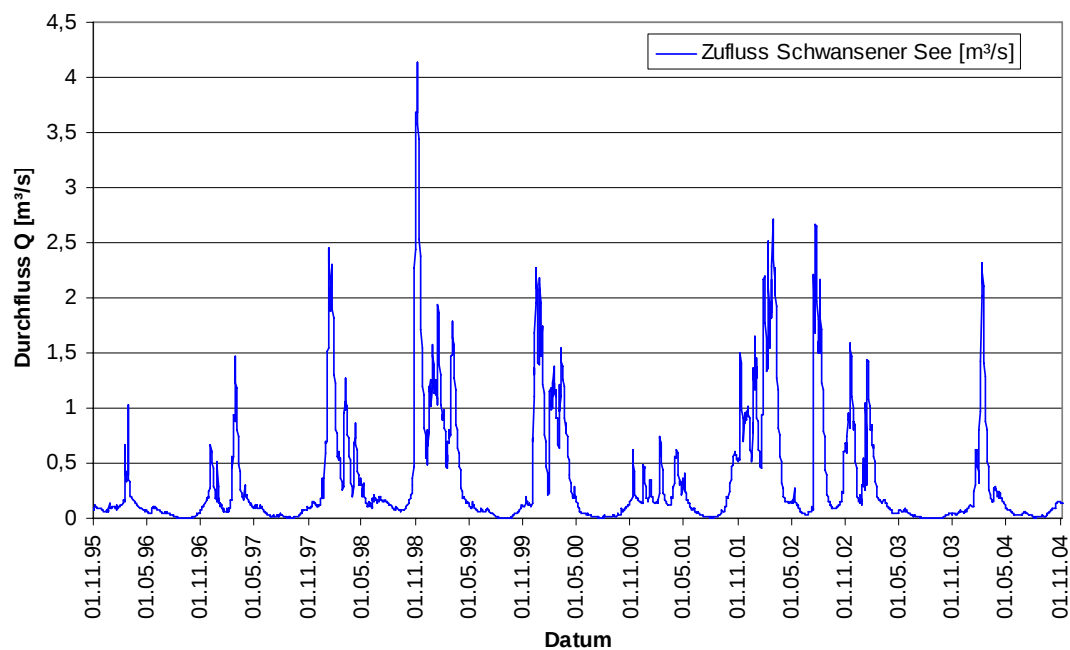


Abb. 76: Obere Randbedingung Zufluss Schwansener See

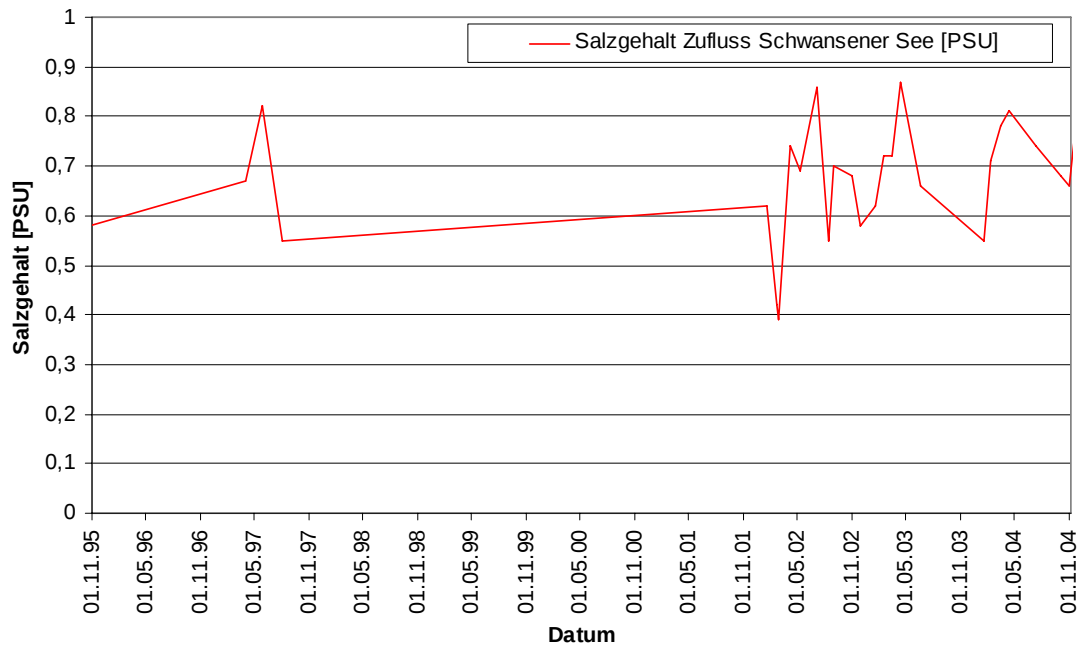


Abb. 77: Obere Randbedingung Salzgehalt Zufluss zum Schwansener See

7.3 Simulation Ist-Zustand

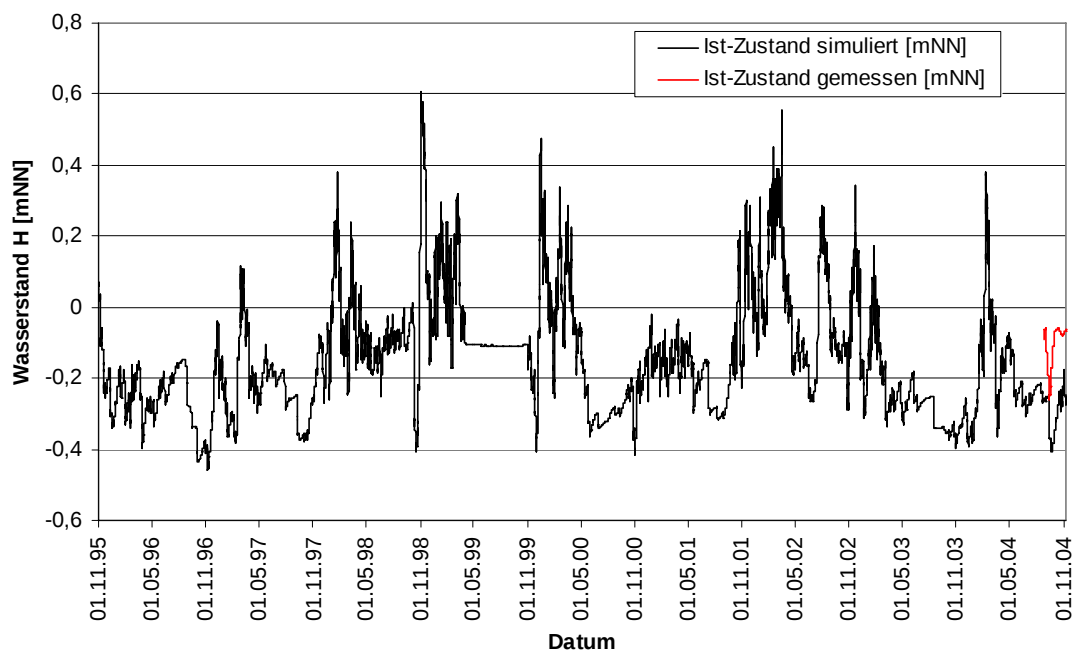


Abb. 78: Vergleich gemessener und simulierter Wasserstand (Schwansener See)

Für die Simulation des Ist-Zustandes wurde der in Kap. 7.1 beschriebene Rohrdurchlass eingebaut. Dieser beinhaltet die in der Schleuse eingebauten Rückstauklappen. Diese lassen nur eine positive Strömung aus dem Schwansener See Richtung Ostsee zu und verhindern somit auch einen Salzeintrag in den See. Die durch diese Steuerung simulierte Wasserstandsganglinie ist in Abb. 78 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die simulierten Wasserstände den ungefähren Verlauf der gemessenen Wasserstände abbilden jedoch um etwa 5 – 10 cm zu niedrig ausfallen. Dies resultiert aus der nicht abgesicherten Zuflussrandbedingung, die in diesem Fall



anscheinend zu klein ist. Zusätzlich kann es mit dem Startwasserstand zusammenhängen, der nicht bekannt war. Dieser wurde zu Simulationsbeginn dem Ostseewasserstand gleichgesetzt.

Die Simulation der Optimierung basiert auf den gleichen Rand- und Startbedingungen wie der modellierte Ist-Zustand. Im Simulationsverlauf der Optimierung gleicht sich der Wasserstand im See an die vorgegebenen Grenzwerte (Steuerwasserstände) an. Diese werden durch die Steuerstrategie vorgegeben.

Würde als Ausgangssituation der aufgetretene Ist-Zustand zugrunde gelegt werden und der Steuerstrategie (der Optimierung) unterworfen, so würde sich auch hier der Wasserstand im See an die vorgegebenen Grenzwerte annähern.

Der simulierte und gemessene Ist-Zustand verhält sich hier anders. Die Steuerung ist auf eine maximale Sielleistung ausgelegt. Ein zu niedriger Startwasserstand kann nur durch einen erhöhten Zufluss ausgeglichen werden, da ein Einstrom in den Strandsee durch die vorgegebene Steuerung nicht möglich ist.

Abweichungen zwischen simulierten Wasserstand und Ist-Wasserstand haben keine Auswirkungen auf die Salzgebhaltsberechnung in der Optimierung. Für diese Szenarien erfolgt die Steuerung anhand von Wasserstandsgrenzwerten in den Seen. Die Bauwerkssteuerung anhand dieser Werte führen dazu, dass sich der Seewasserstand an die Grenzwerte angleicht. Der Zeitpunkt des Erreichens des Optimierungswasserstandes hängt davon ab, wie weit die Ausgangszustände davon entfernt sind.

Salzgehalte benötigen länger für die Angleichung, da hierfür entsprechend häufig, größere salzhaltige Ostseewassermengen zufließen müssen.

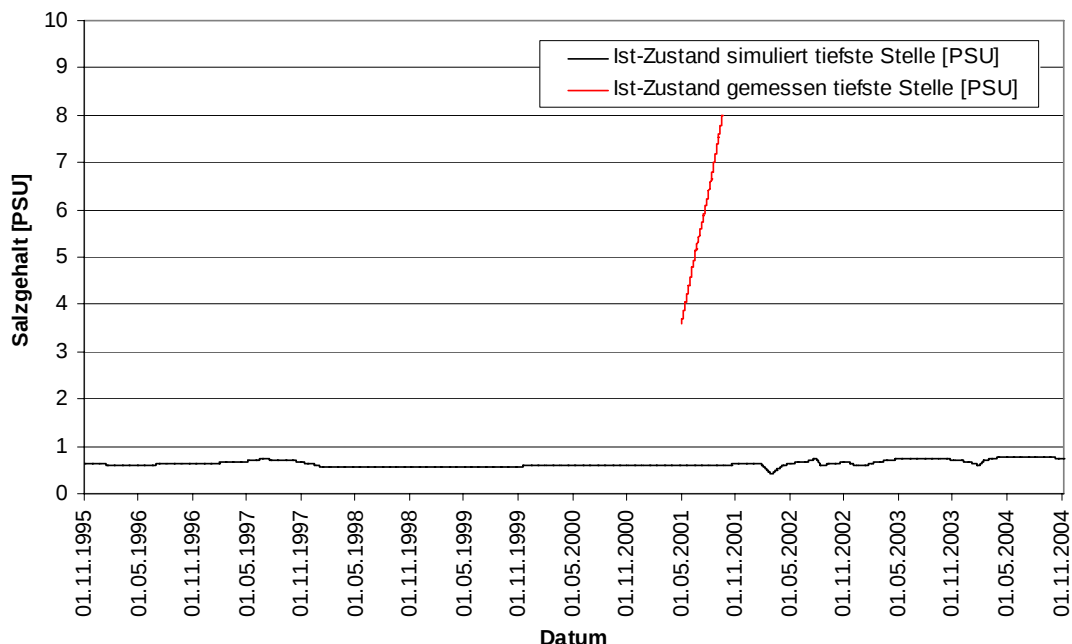


Abb. 79: Vergleich der Salzgehalte Ist-Zustand gemessen (tiefste Stelle) und simuliert (tiefste Stelle) (Schwansener See)

Beim Vergleich des Salzgehaltes im simulierten und gemessenen Ist-Zustand fällt auf, dass der gemessene Wert über dem simulierten liegt. Bei der Suche nach der Ursache wurde festgestellt, dass entgegen der ursprünglichen Annahme, das Siel zusätzlich geöffnet wurde. Das

heißt, im Anschluss an die Untersuchungen stellte sich heraus, dass in den Sommermonaten das Siel künstlich (mit einer Dachlatte) offen gehalten wird. Zusätzlich wurde ein Reifen an der Klappe installiert, der ein komplettes Schließen verhindert, da es sonst zu einer Geräuschbelastung des nahe gelegenen Campingplatzes kommt. Wären die genauen Öffnungszeiten und der Öffnungsquerschnitt (ständig durch den Reifen verursacht) bekannt, so könnte der Salzgehalt genauer nachgebildet werden. Für die weitere Bewertung der Salzgehaltsentwicklung ist dies nicht von Bedeutung, da der Bezug zur festgelegten und somit simulierten Steuerung gezogen wird.

7.4 Simulation ungestörte Bedingungen

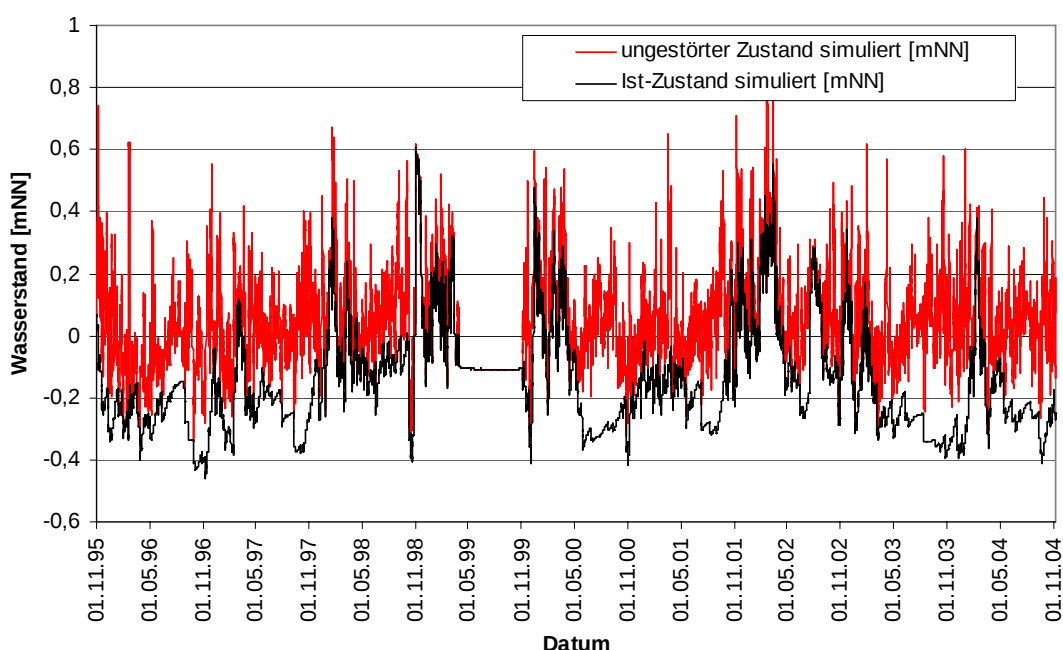


Abb. 80: Vergleich der Wasserstände ungestörter- und Ist-Zustand (Schwansener See)

Bei der Berechnung des ungestörten Zustandes wurden alle Bauwerke als komplett geöffnet angesehen, da die Geometrie der Bauwerke als limitierender Faktor dienen sollte. Wären die Bauwerke komplett entnommen worden, so wäre die Entwicklung des Salzgehaltes nicht direkt auf die Steuerung zurückzuführen.

In Tab. 21 sind die mittleren und maximalen Wasserstände aufgeführt. Es ist zu erkennen, dass durch die komplette Öffnung des Bauwerkes der Seewasserstand im Mittel um 7 cm ansteigt. Dies ist auch dem Verlauf der Wasserstandsganglinie in Abb. 80 zu entnehmen.

Der maximale Wasserstand, der im Simulationszeitraum erreicht wurde, beträgt 0,81 mNN und liegt somit um 0,21 m höher als der maximale Wasserstand im simulierten Ist-Zustand. Hieraus ist ersichtlich, dass die Geometrie des Bauwerkes und die jetzige Steuerstrategie das Binnenland vor einem erhöhten Seewasserstand bewahren.

Tab. 21: Wasserstandsentwicklung im Ist- und ungestörten Zustand (Schwansener See)

Variante	Mittelwert Wasserstand [mNN]	Maximalwert Wasserstand [mNN]
Ist-Zustand	-0,15	0,60
ungestörter Zustand	0,05	0,81

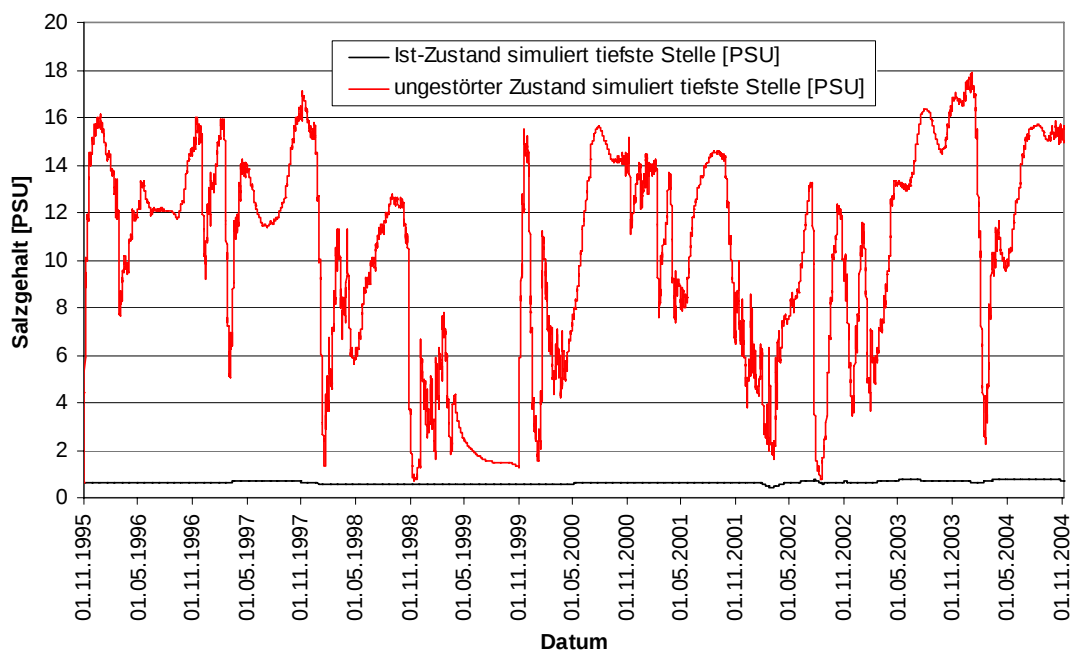


Abb. 81: Vergleich der Salzgehalte ungestörter- (tiefste Stelle) und Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Schwansener See)

Der Tab. 22 ist zu entnehmen, dass sich der Salzgehalt im Schwansener See unter ungestörten Bedingungen anhebt. Dieser Prozess ist an allen Auswertepunkten zu erkennen. So steigt der mittlere Salzgehalt an der tiefsten Stelle von 0,63 PSU auf 10,23 PSU an und es wird ein maximaler Wert an der tiefsten Stelle im See von 17,89 PSU erreicht. Die Anhebung des Salzgehaltes ist ebenfalls der Abb. 81 und den Abb.-A. 32 bis Abb.-A. 34 im Anhang zu entnehmen. Die Widerversalzung ist ungefähr nach einem Monat abgeschlossen.

Tab. 22: Vergleich der mittleren und maximalen Salzgehalte für den Ist- und ungestörten Zustand (Schwansener See)

	Variante	Mittelwert [PSU]	Maximalwert [PSU]
tiefste Stelle	Ist-Zustand	0,63	0,79
	ungestörter Zustand	10,23	17,89
Zulauf	Ist-Zustand	0,63	0,79
	ungestörter Zustand	9,18	16,85
Ablauf	Ist-Zustand	0,63	0,81
	ungestörter Zustand	11,07	18,94
gemittelt	Ist-Zustand	0,63	0,79
	ungestörter Zustand	10,21	17,86

7.5 Simulation optimierter Sielbetrieb

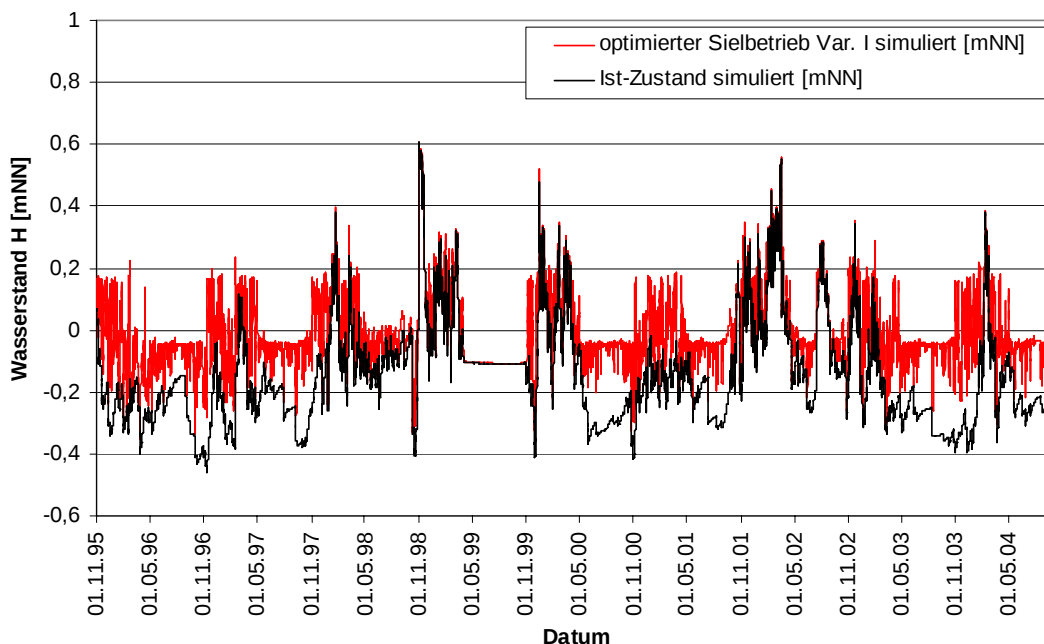


Abb. 82: Vergleich der Wasserstände optimierter Sielbetrieb Var. I und Ist-Zustand (Schwansener See)

Beim optimierten Sielbetrieb am Schwansener See wurde zusätzlich ein Wehr eingebaut, um die Steuerung anhand von Regelwasserständen durchführen zu können. Die Steuerung sah vor, dass die Öffnungszeiten des Wehres in Abhängigkeit von den Seewasserständen gesetzt wurden. Da die Optimierung unter Berücksichtigung der jetzigen Nutzung erfolgen sollte, wurden Seewasserstände festgelegt, die nicht überschritten werden sollten. Für den Schwansener See sollten von November bis April die Seewasserstände nicht über 0,15 mNN liegen und in der Zeit von Mai bis Oktober nicht über -0,05 mNN. In der Variante I wurden daher diese Wasserstände als Regelwasserstände verwendet.

Die Wehranlage war daher immer geöffnet, solange der Seewasserstand die Grenzwerte unterschritt. Somit war ein maximaler Salzgehaltsaustausch unter Berücksichtigung der jetzigen Nutzung möglich.

Tab. 23: Wasserstandsentwicklung für die Variantenrechnungen (Schwansener See)

Variante	Mittelwert Wasserstand [mNN]	Maximalwert Wasserstand [mNN]
Ist-Zustand	-0,15	0,60
ungestörter Zustand	0,05	0,81
optimierter Sielbetrieb Var. I	-0,01	0,61
optimierter Sielbetrieb Var. II	-0,12	0,61

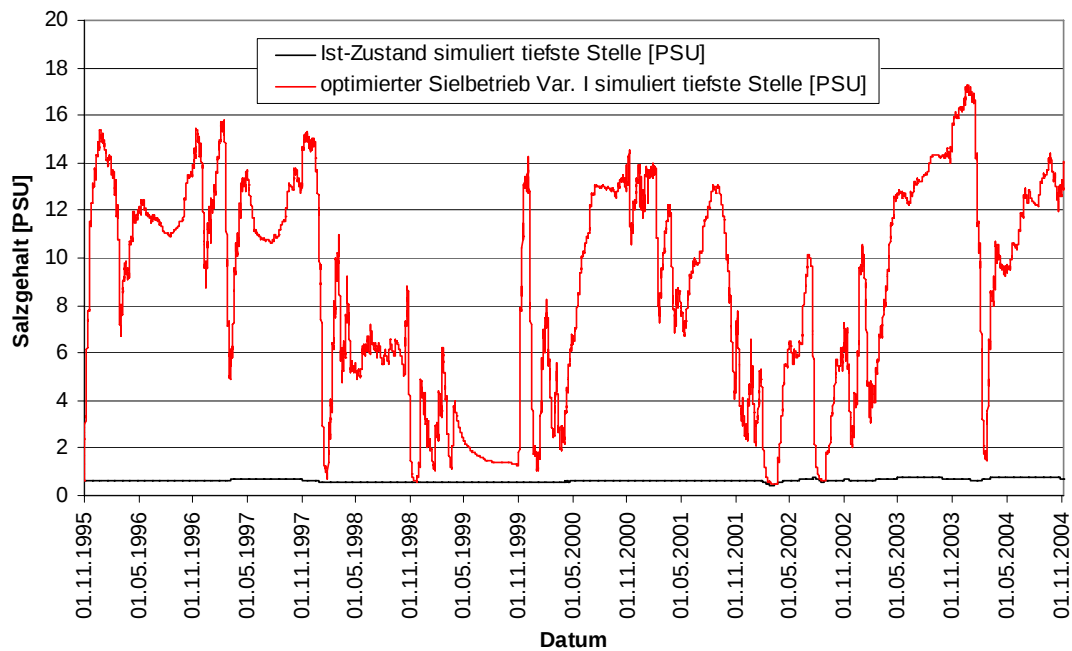


Abb. 83: Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (tiefste Stelle) und Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Schwansener See)

Das Ergebnis ist in Abb. 82 (Var. I), Abb. 84 (Var. II) und Tab. 23 dargestellt. Zu erkennen ist, dass für die Variante I die simulierte Ist-Zustands-Wasserstandsganglinie und auch die limitierenden Regelungswasserstände überschritten wurden. Daher wurde eine zweite Variante berechnet, die von November bis April Regelwasserstände von -0,15 mNN und in der Zeit von Mai bis Oktober Regelwasserstände von -0,35 mNN vorsah. Bei der Auswertung ist klar ersichtlich, dass sich die Ganglinie der Wasserstände für den simulierten Ist-Zustand und die Variantenrechnung II gut decken und in den Bereichen, in denen keine Übereinstimmung vorherrscht, die maximalen Wasserstände nicht überschritten werden. Die Überschreitung der Regelungswasserstände, die in der Variante II zu erkennen sind, fand auch im Referenzzustand zu den gleichen Zeitpunkten und mit der gleichen Intensität statt, so dass von einer Einhaltung der Optimierungsbedingung gesprochen werden kann.

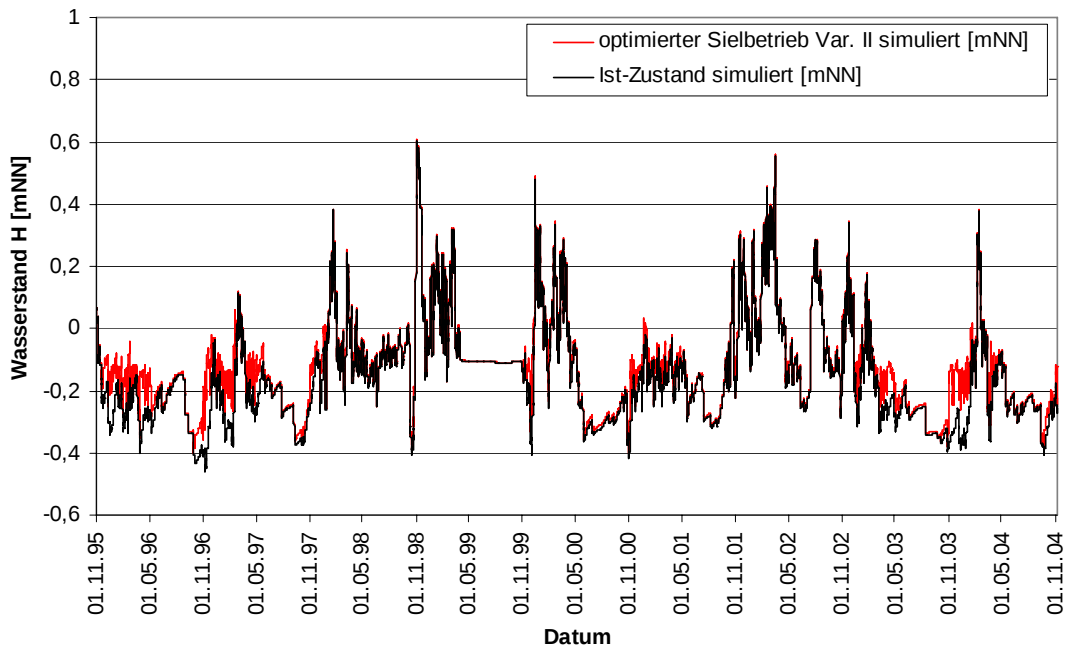


Abb. 84: Vergleich der Wasserstände optimierter Sielbetrieb Var. II und Ist-Zustand (Schwansener See)

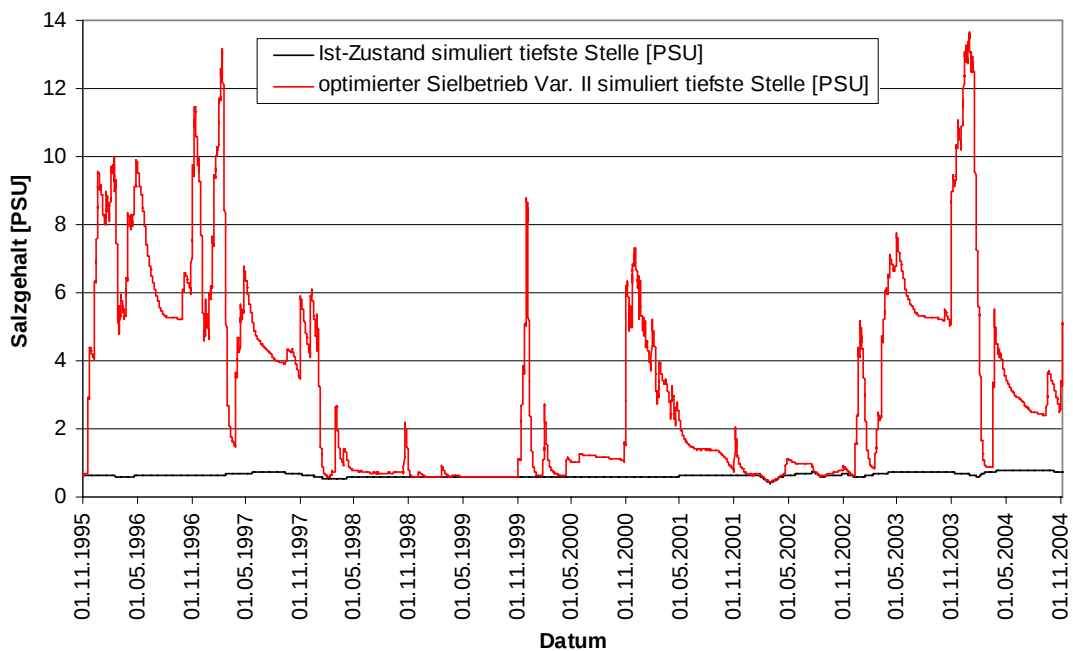


Abb. 85: Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (tiefste Stelle) und Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Schwansener See)

Die Ergebnisse der Variante I sind den Abb. 85, Abb.-A. 35 bis Abb.-A. 37 (im Anhang), Tab. 23 und Tab. 24 zu entnehmen.

Bei der Auswertung der Tab. 24, der Abb. 62 und Abb.-A. 38 bis Abb.-A. 40 wird deutlich, dass durch eine optimierte Bauwerkssteuerung der Salzgehalt im See wieder angehoben werden kann. An der tiefsten Stelle werden im Mittel 3,81 PSU erreicht und in der Spitze 13,65



PSU. Die Anhebung des Salzgehaltes wurde in der Variante II nach ca. zwei Monaten erreicht.

Tab. 24: *Vergleich der mittleren und maximalen Salzgehalte für die Variantenrechnungen (Schwansener See)*

	Variante	Mittelwert [PSU]	Maximalwert [PSU]
tiefste Stelle	Ist-Zustand	0,63	0,79
	ungestörter Zustand	10,23	17,89
	optimierter Sielbetrieb Var. I	8,76	17,30
	optimierter Sielbetrieb Var. II	3,18	13,65
Zulauf	Ist-Zustand	0,63	0,79
	ungestörter Zustand	9,18	16,85
	optimierter Sielbetrieb Var. I	7,89	16,37
	optimierter Sielbetrieb Var. II	2,89	12,45
Ablauf	Ist-Zustand	0,63	0,81
	ungestörter Zustand	11,07	18,94
	optimierter Sielbetrieb Var. I	9,43	18,58
	optimierter Sielbetrieb Var. II	3,39	16,55
gemittelt	Ist-Zustand	0,63	0,79
	ungestörter Zustand	10,21	17,86
	optimierter Sielbetrieb Var. I	8,74	17,26
	optimierter Sielbetrieb Var. II	3,17	13,63

8 SEHLENDORFER SEE

8.1 Allgemein

Das Modell Sehlendorfer See wurde anhand der in Kapitel 2 beschriebenen Arbeitsschritte erstellt. Der See hat eine Fläche von $0,78 \text{ km}^2$ und ein Volumen von 440.000 m^3 bei $-0,04 \text{ mNN}$ laut Bericht „Seen an der Nord- und Ostseeküste“. Bei der Volumenkontrolle des auf Basis des in Abb. 87 dargestellten Tiefenplans erstellten Geländemodells ergibt ein Volumen von 433.916 m^3 . Das entspricht einer Abweichung von rund $2,4 \%$. Für den Betrieb des Modells ist das eine ausreichend genaue Abbildung der Geometrie.

Der See ist nicht von der Ostsee abgekoppelt. Daher ist er auch nicht versüßt. Das einzige Bauwerk stellt eine Holzbrücke im Ablauf des Sees dar, die das Abflussgeschehen nicht beeinflusst. Die Abb. 86 zeigt zwei Fotos, die die Charakteristik des Ablaufes repräsentieren.



Abb. 86: Ablauf Sehlendorfer See

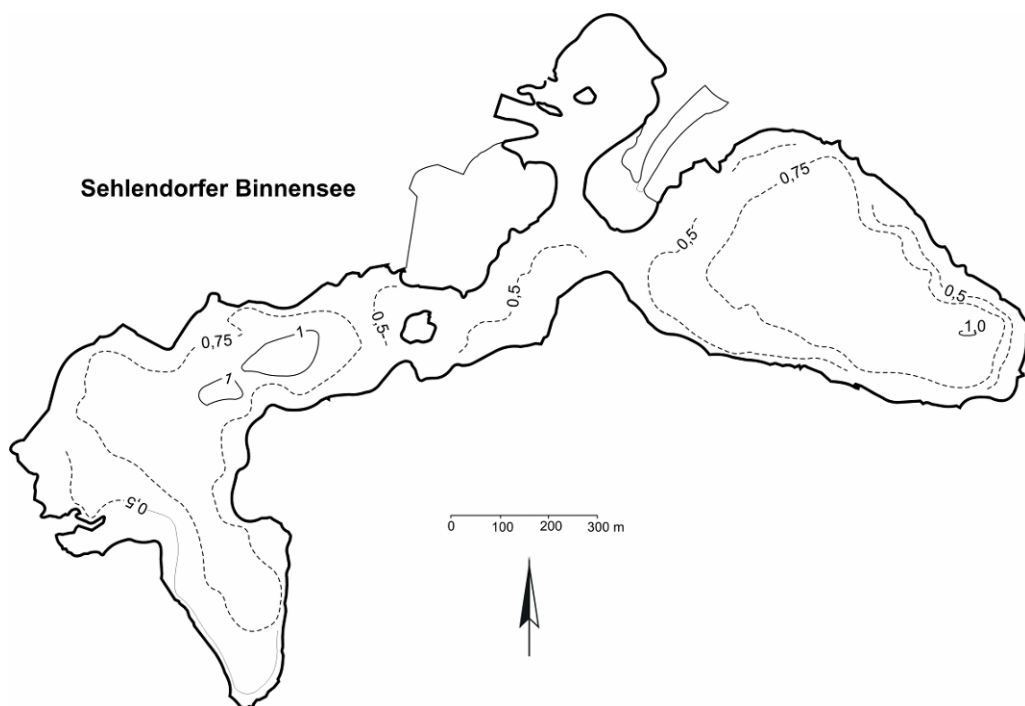


Abb. 87: Tiefenplan Sehlendorfer Binnensee



8.2 Randbedingungen Sehlendorfer See

Die Randbedingungen für den Sehlendorfer See wurden, wie in Kapitel 2 beschrieben, in Zeitreihen für die oberen und die untere Modellgrenze unterteilt. An den oberen Modellrändern wurden Zufluss und Salzgehaltszeitreihen benötigt, an der Unteren eine Wasserstandsganglinie und ebenfalls eine Salzgehaltsganglinie. Aus der Regionalisierung der Abflüsse lassen sich für jedes Teileinzugsgebiet, und somit auch für den Pegelstandort und den Zufluss, die statistischen Hauptwerte MNQ, MQ, MHQ angeben. Anhand dieser Hauptwerte findet eine Übertragung der Ganglinie des Pegels Kossau auf den Zufluss anhand der vom LANU zur Verfügung gestellten Formeln statt. Die Formeln zur Berechnung der Zuflussganglinien lauten:

Für $Q \geq MQ$:

$$Q_2 = \frac{(Q_K - MQ_K)}{(MHQ_K - MQ_K)} \cdot (MHQ_2 - MQ_2) + MQ_2$$

Für $MNQ < Q < MQ$:

$$Q_2 = MQ_2 - \frac{(MQ_K - Q_K)}{(MQ_K - MNQ_K)} \cdot (MQ_2 - MNQ_2)$$

Für $Q < MNQ$:

$$Q_2 = Q_K \cdot \frac{MNQ_2}{MNQ_K}$$

Die Formeln wurden vom LANU geliefert und die damit erzeugten Randbedingungen geprüft. Der Zufluss zum Sehlendorfer See wurde aus der Zuflussganglinie des Großen Binnensees und somit aus dem Pegel der Kossau ermittelt. Hierzu wurde die Zuflussganglinie anhand der Einzugsgebietsgröße und den Hauptwerten des Sehlendorfer Sees skaliert, da keine Zuflussmessungen für den See vorliegen. Dies stellt eine gewisse Unsicherheit dar, ist aber für die zu untersuchende Aufgabenstellung ein ausreichend genauer Ansatz (Primär werden die Salzgehalte und nicht die Wasserstände betrachtet).

Des Weiteren musste die Salzgehaltsmessung an der Messstelle Süderfahrt verlängert werden, da die gelieferten Daten nicht den kompletten Simulationszeitraum abdeckten. Für die Verlängerung wurden in Absprache mit dem LANU die Salzgehaltmessungen mit den an der Messstelle vorhandenen Daten ergänzt. Dies zeichnet sich in einer Periodizität der Zeitreihe ab (Abb. 89). Eine direkte Auswirkung hat diese Verlängerung auf die Simulation des Ist-Zustandes, der dadurch vom gemessenen Ist-Zustand abweichen kann.

Die nachfolgenden Abb. 88 bis Abb. 91 sind die für das Modell Sehlendorfer See verwendeten Zeitreihen.

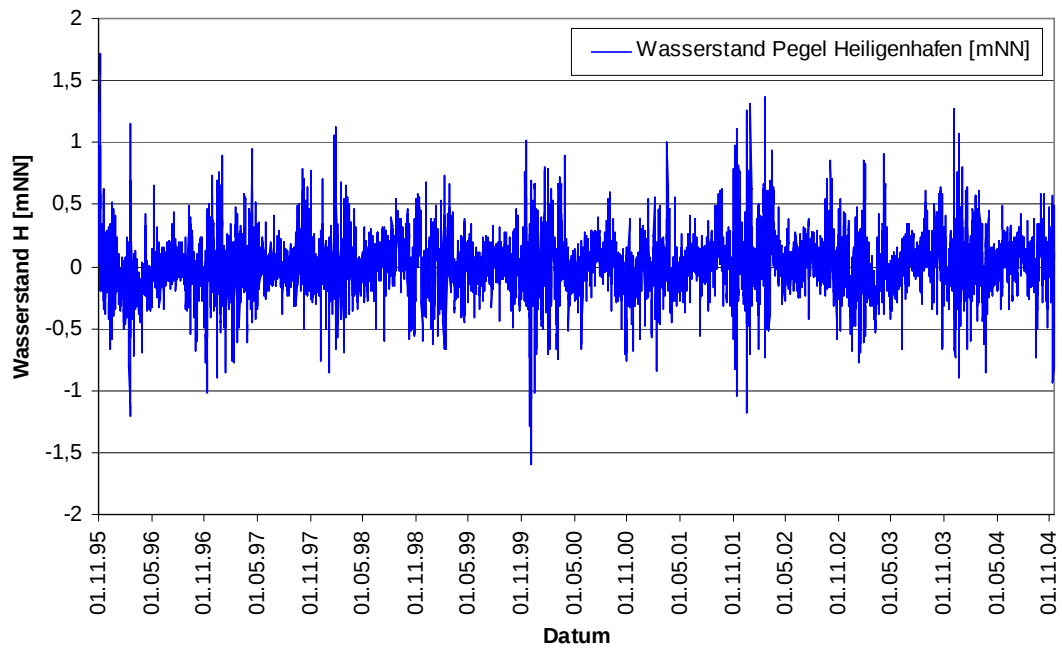


Abb. 88: Untere Randbedingung Sehlendorfer See Wasserstand Pegel Heiligenhafen

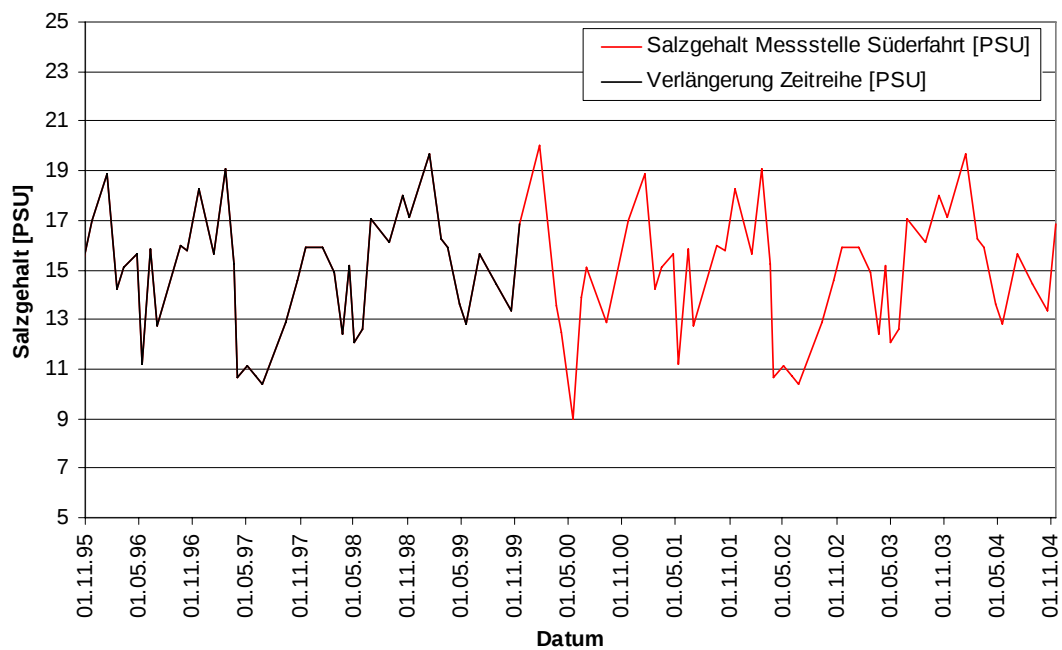


Abb. 89: Untere Randbedingung Sehlendorfer See Salzgehalt Messstelle Süderfahrt

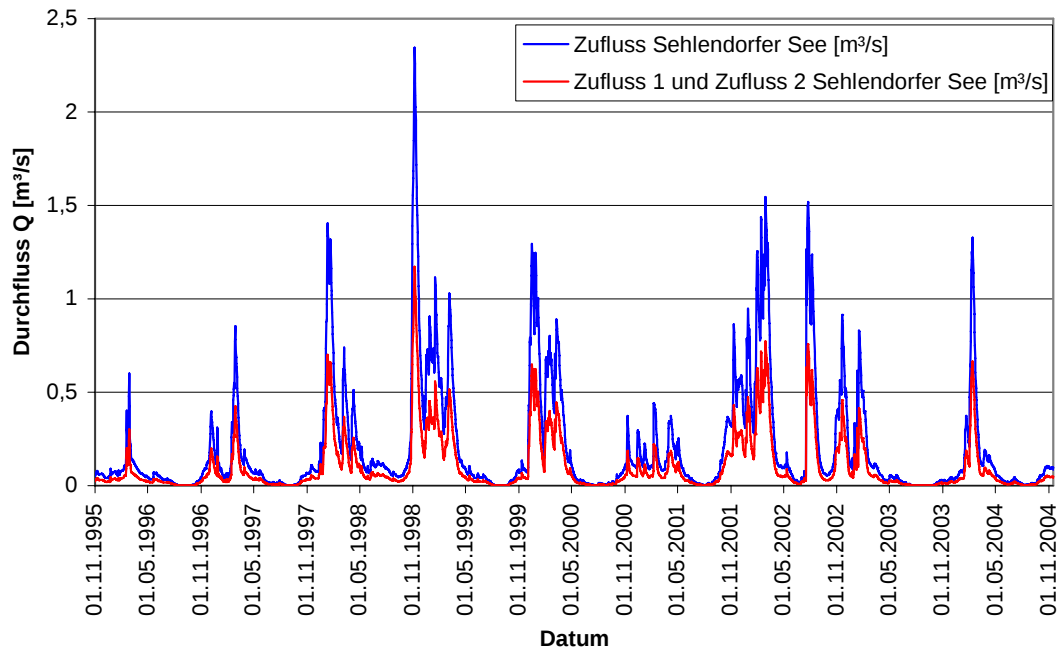


Abb. 90: Obere Randbedingung Zufluss (gesamt und aufgeteilt) Sehlendorfer See

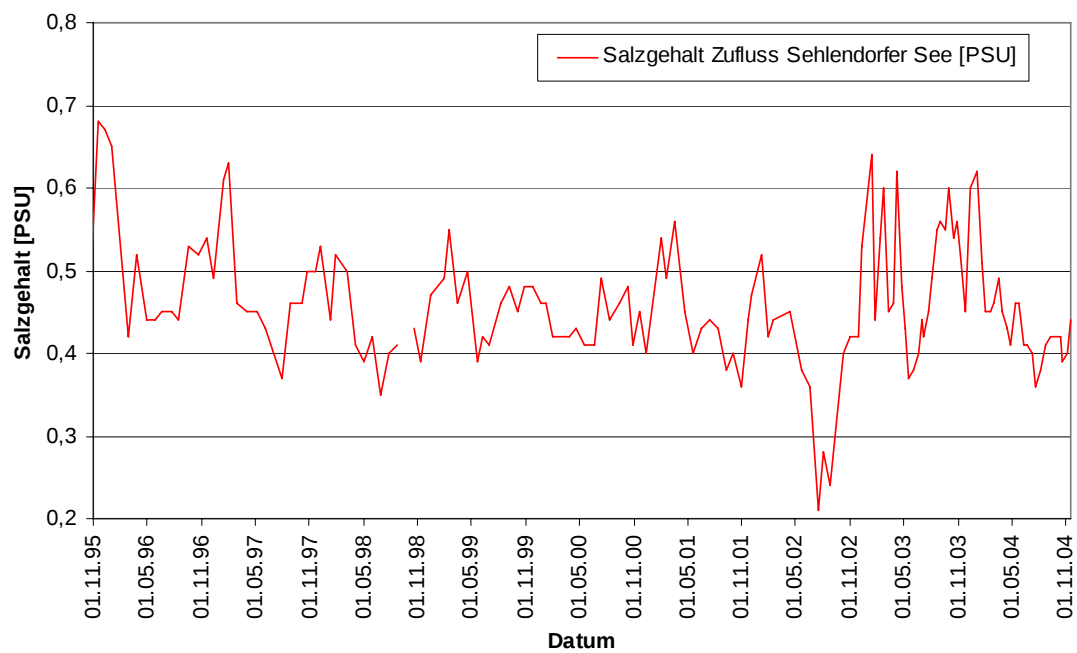


Abb. 91: Obere Randbedingung Salzgehalt Zufluss zum Sehlendorfer See

8.3 Simulation Ist-Zustand

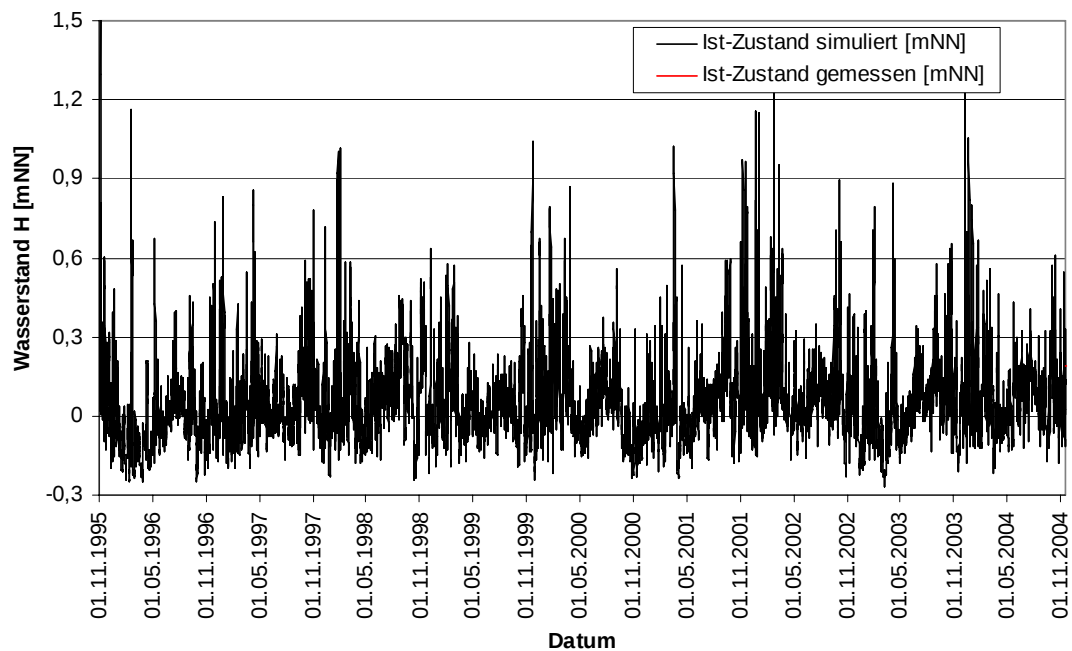


Abb. 92: Vergleich gemessener und simulierter Wasserstand (Sehlendorfer See)

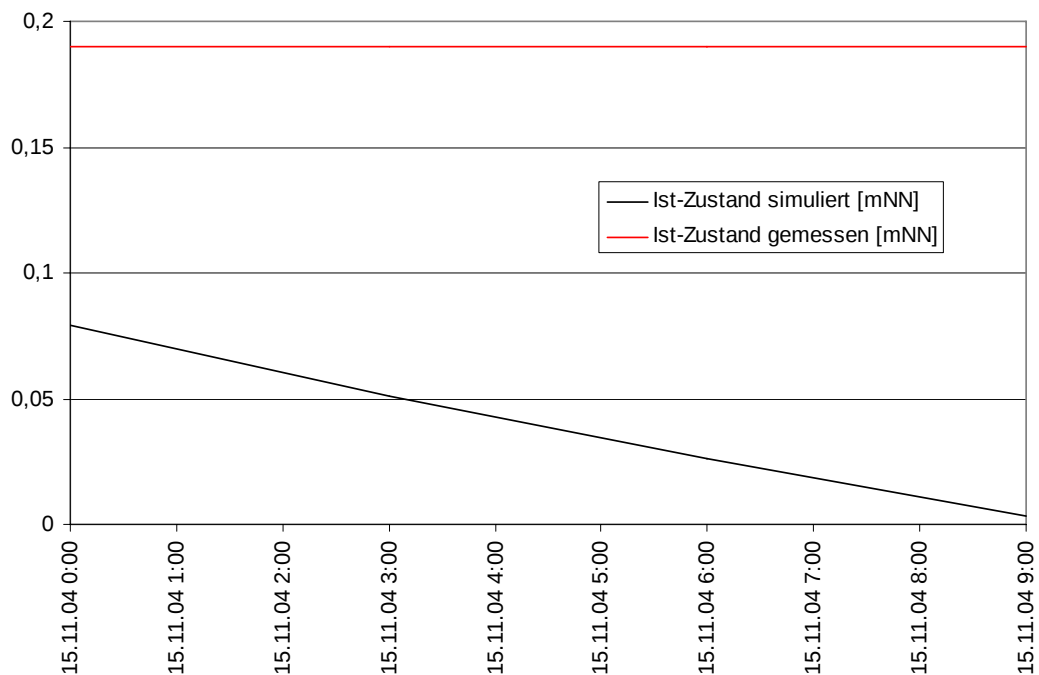


Abb. 93: Detailausschnitt: Vergleich gemessener und simulierter Wasserstand (Sehlendorfer See)

Bei der Berechnung des durch Bauwerke unbeeinflussten Sehlendorfer Sees konnten Wasserstandsabweichungen von ca. 10-15 cm festgestellt werden. Da der Überlappungszeitraum für den Vergleich nur neun Stunden abdeckt, kann hier kein Rückschluss auf die Genauigkeit der Simulationsgenauigkeit hergestellt werden. Die Abweichungen können für die Simulation aus



der Startbedingung des Wasserstandes oder aus der unsicheren Zuflussrandbedingung resultieren. Die Zuflussrandbedingung stellt eine Übertragung des Zuflusses zum Großen Binnensee auf den des Sehlendorfer Sees dar und ist keine gemessene Zuflussrandbedingung.

Tab. 25: Wasserstände im Ist- Zustand (Sehlendorfer See)

Variante	Mittelwert Wasserstand [mNN]	Maximalwert Wasserstand [mNN]
Ist-Zustand gemessen	0,19	0,19
Ist-Zustand simuliert	0,05	1,81

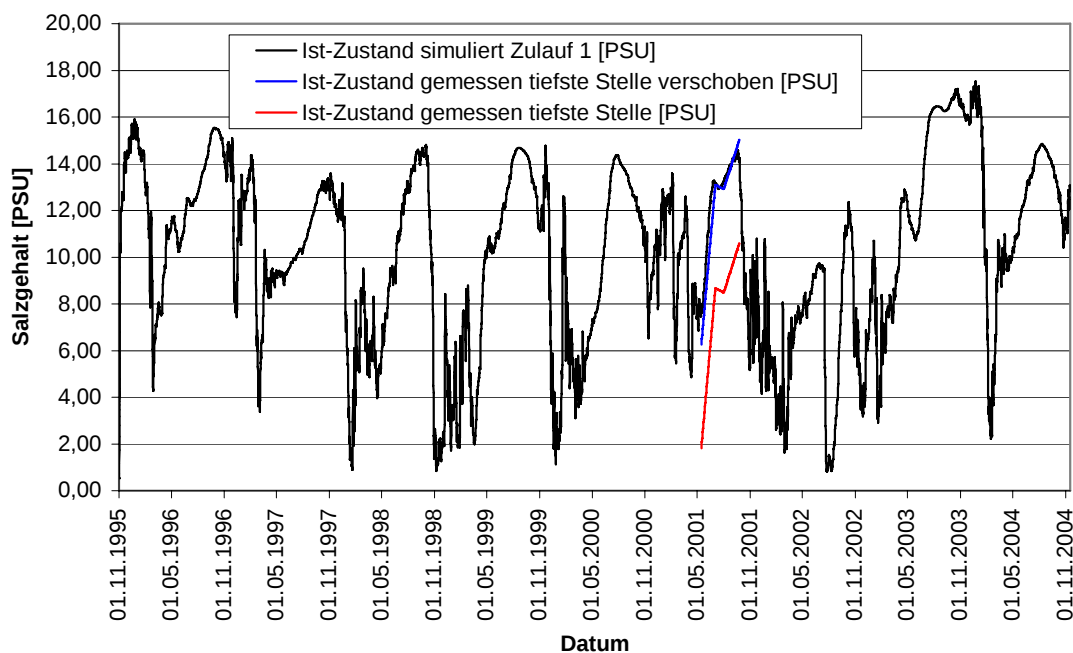


Abb. 94: Vergleich der Salzgehalt Ist Zustand gemessene, gemessen und verschoben (tiefste Stelle) und simuliert (tiefste Stelle) (Sehlendorfer See)

Bei der Berechnung des Salzgehaltes ist zu erkennen, dass sich bei ungestörten Bedingungen die Salzgehalte im See vom Verlauf her genau berechnen lassen. Auffällig ist, dass die Salzgehaltsganglinie um den Wert 4,4 [PSU] zu niedrig liegt. Daraus kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass entweder die Kalibrierung des Messgerätes vergessen wurde oder der Zufluss zum See zu gering ist, da der Salzgehalt zu hoch ist. Da die Messung des Salzgehaltes an 5 verschiedenen Tagen ausgeführt wurde, ist ein Kalibrierungsfehler eigentlich auszuschließen. In diesem Fall wäre zu klären, ob ein höherer Zufluss zum See überhaupt realistisch wäre. Da keine weiteren Untersuchungen für den Sehlendorfer See anstanden, war eine Klärung nicht von Nöten.

Des Weiteren könnte es an einem Geometriefehler liegen, der einen besseren Abfluss aus dem Sehlendorfer Sees verhindert.

Da der charakteristische Verlauf des Salzgehaltes genau getroffen wird, kann man von einer guten Modellqualität sprechen, die wiederum von den Startbedingungen abhängig ist. So können als Fehlerquelle auch die Startrandbedingungen nicht ausgeschlossen werden.

Tab. 26: Salzgehalte im Ist- Zustand (Sehendorfer See)

	Variante	Mittelwert [PSU]	Maximalwert [PSU]
tiefste Stelle	Ist-Zustand gemittelt tiefste Stelle	7,73	10,59
	Ist-Zustand simuliert	11,54	18,60
	Ist-Zustand simuliert verschoben	12,16	15,02
Zulauf 1	Ist-Zustand gemittelt tiefste Stelle	7,73	10,59
	Ist-Zustand simuliert	10,20	17,54
	Ist-Zustand simuliert verschoben	12,16	15,02
Zulauf 2	Ist-Zustand gemittelt tiefste Stelle	7,73	10,59
	Ist-Zustand simuliert	13,54	19,01
	Ist-Zustand simuliert verschoben	12,16	15,02
Ablauf	Ist-Zustand gemittelt tiefste Stelle	7,73	10,59
	Ist-Zustand simuliert	13,45	19,61
	Ist-Zustand simuliert verschoben	12,16	15,02
gemittelt	Ist-Zustand gemittelt tiefste Stelle	7,73	10,59
	Ist-Zustand simuliert	12,18	18,40
	Ist-Zustand simuliert verschoben	12,16	15,02



9 WINDEBYER NOOR

9.1 Allgemein

Das Modell Windebyer Noor wurde anhand der in Kapitel 2 beschriebenen Arbeitsschritte erstellt. Der See hat eine Fläche von 3,89 km² und ein Volumen von 25.000.000 m³ bei 0,15 mNN laut Bericht „Seen an der Nord- und Ostseeküste“. Bei der Volumenkontrolle des auf Basis des in Abb. 96 dargestellten Tiefenplans erstellten Geländemodells ergibt ein Volumen von 25.527.773 m³. Das entspricht einer Abweichung von rund 2,1 %. Für den Betrieb des Modells ist das eine ausreichend genaue Abbildung der Geometrie.

Der See ist mittels Rückschlagstoren und einer Wehranlage von der Ostsee abgekoppelt (Abb. 95). Des Weiteren sind im Ablauf des Sees drei Brücken angegliedert. Zwei davon sind im Rechenmodell als Querschnitte berücksichtigt, da sie einen sehr großen Freibord besitzen und nicht eingestaut werden. Die dritte Brücke wird als Durchlass modelliert. Die Steuerung der Wehranlage erfolgt mittels Steuerstrategie und sieht maximale Sielzeiten vor. Das heißt, sobald der Binnenwasserstand den Ostseewasserstand übersteigt, werden die Wehroöffnungen geöffnet. Bei Kenterung und Einstrom in den See werden die Tore geschlossen. Die Rückschlagstore bieten Sicherheit gegen Wellenschlag in den dahinterliegenden Rohrdurchlass. Die Abmessungen sind Tab. 27 zu entnehmen.



Abb. 95: links: unterströmtes Wehr; rechts: Rückschlagstore

Tab. 27: Bauwerksabmessungen Windebyer Noor

Bauwerksart	Anzahl Öffnungen	Länge [m]	Höhe [m]	Breite [m]
Wehr	2	-	2,23	1,5
Durchlass	1	170	3	3

Tab. 28: Brückenabmessungen Ablauf Windebyer Noor

Bauwerksart	Anzahl Öffnungen	Lichte Höhe [mNN]	Lichte Breite [m]	Geometrie
Brücke	1	1,46	9,50	siehe *.xns-Datei
Brücke	1	0,80	8,05	siehe *.xns-Datei



Abb. 96: Tiefenplan Windebyer Noor

9.2 Randbedingungen Windebyer Noor

Die Randbedingungen für den Windebyer Noor wurden, wie in Kapitel 2 beschrieben, in Zeitreihen für die obere und untere Modellgrenze unterteilt. Am oberen Modellrand wurde eine Zufluss- und eine Salzgehaltszeitreihe benötigt, am unteren eine Wasserstands- und ebenfalls eine Salzgehaltsganglinie. Aus der Regionalisierung der Abflüsse lassen sich für jedes Teil-einzugsgebiet, und somit auch für den Pegelstandort und den Zufluss, die statistischen Hauptwerte MNQ, MQ, MHQ angeben. Anhand dieser Hauptwerte findet eine Übertragung der Ganglinie des Pegels Kossau auf den Zufluss anhand der vom LANU zur Verfügung gestellten Formeln statt. Die Formeln zur Berechnung der Zuflussganglinien lauten:

Für $Q \geq MQ$:

$$Q_2 = \frac{(Q_K - MQ_K)}{(MHQ_K - MQ_K)} \cdot (MHQ_2 - MQ_2) + MQ_2$$



Für $MNQ < Q < MQ$:

$$Q_2 = MQ_2 - \frac{(MQ_K - Q_K)}{(MQ_K - MNQ_K)} \cdot (MQ_2 - MNQ_2)$$

Für $Q < MNQ$:

$$Q_2 = Q_K \cdot \frac{MNQ_2}{MNQ_K}$$

Die Formeln wurden vom LANU geliefert und die damit erzeugten Randbedingungen geprüft. Der Zufluss zum Windebyer Noor wurde aus der Zuflussganglinie des Großen Binnensees und somit aus dem Pegel der Kossau ermittelt. Hierzu wurde die Zuflussganglinie anhand der Einzugsgebietsgröße und den Hauptwerten des Windebyer Noor skaliert, da keine Zuflussmessungen für den See vorliegen. Dies stellt eine gewisse Unsicherheit dar, ist aber für die zu untersuchende Aufgabenstellung ein ausreichend genauer Ansatz (Primär werden die Salzgehalt und nicht die Wasserstände betrachtet). Am unteren Rand wurde die Wasserstandsganglinie und die Salzgehaltsganglinie des nächstliegenden Ostseepegels verwendet.

Des Weiteren musste die Salzgehaltmessung an der Messstelle Booknieseck verlängert werden, da die gelieferten Daten nicht den kompletten Simulationszeitraum abdeckten. Für die Verlängerung wurden in Absprache mit dem LANU die Salzgehaltmessungen mit den an der Messstelle vorhandenen Daten ergänzt. Dies zeichnet sich in einer Periodizität der Zeitreihe ab (Abb. 98). Eine direkte Auswirkung hat diese Verlängerung auf die Simulation des Ist-Zustandes, der dadurch vom gemessenen Ist-Zustand abweichen kann. Im Weiteren Verlauf werden die Berechnungsergebnisse immer in Relation zum simulierten Ist-Zustandes gesetzt. Da alle Simulationen auf den gleichen Randbedingungen basieren und sich nur durch die Steuervarianten unterscheiden, kann direkt die Auswirkung der Steuerung auf den Salzgehalt als Ergebnis entnommen werden.

Die nachfolgenden Abb. 97 bis Abb. 100 sind die für das Modell Windebyer Noor verwendeten Zeitreihen.

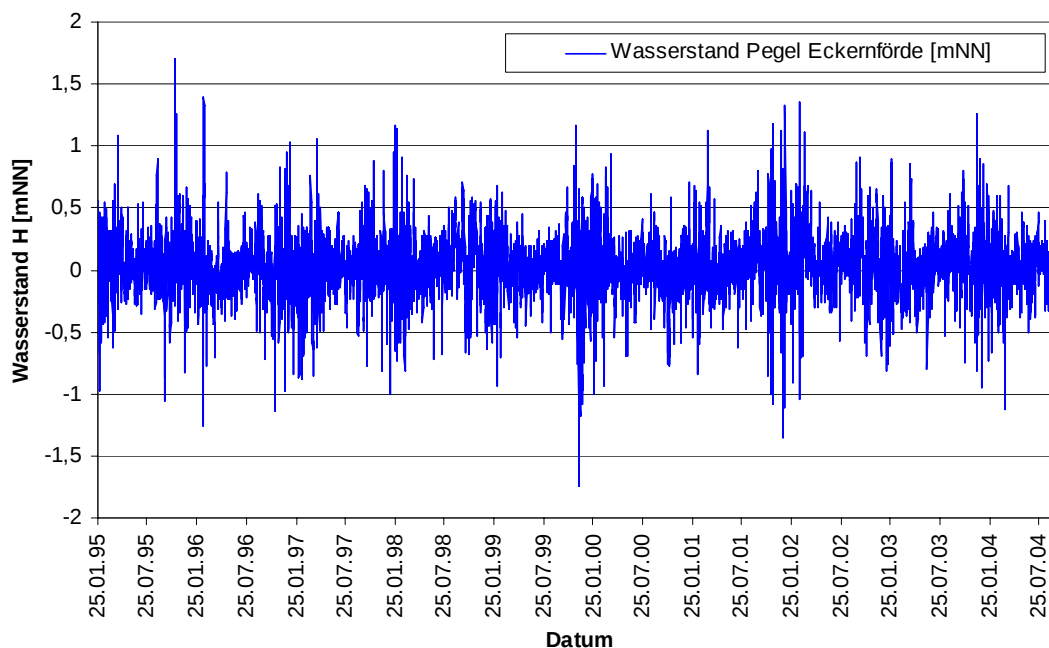


Abb. 97: Untere Randbedingung Windebyer Noor Wasserstand Pegel Eckernförde

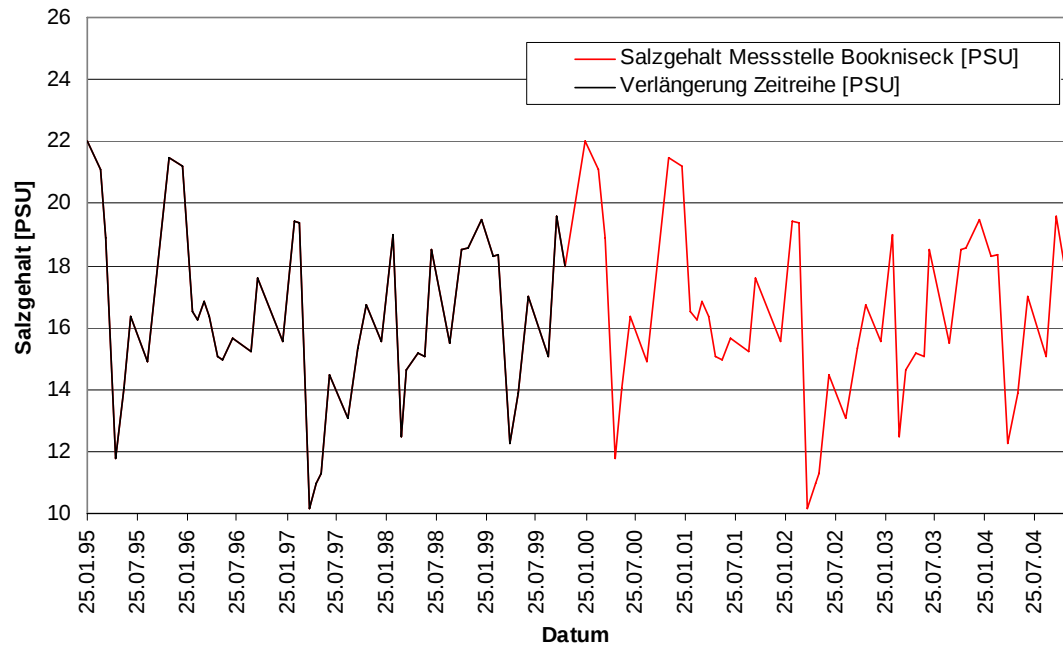


Abb. 98: Untere Randbedingung Windebyer Noor Salzgehalt Messstelle Bookniseck

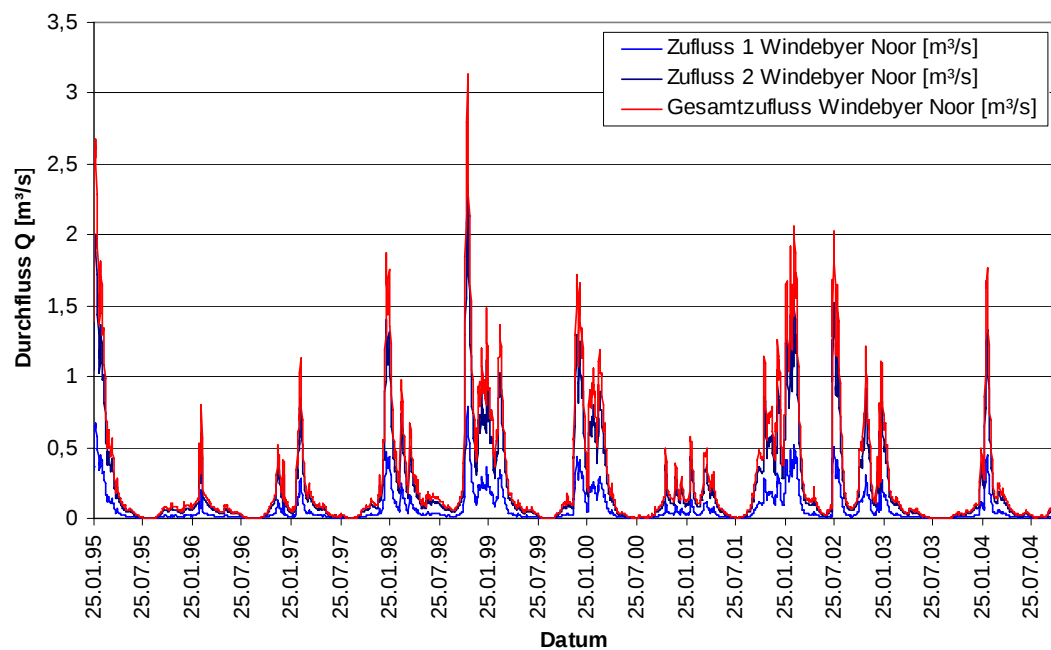


Abb. 99: Obere Randbedingung Zufluss Windebyer Noor

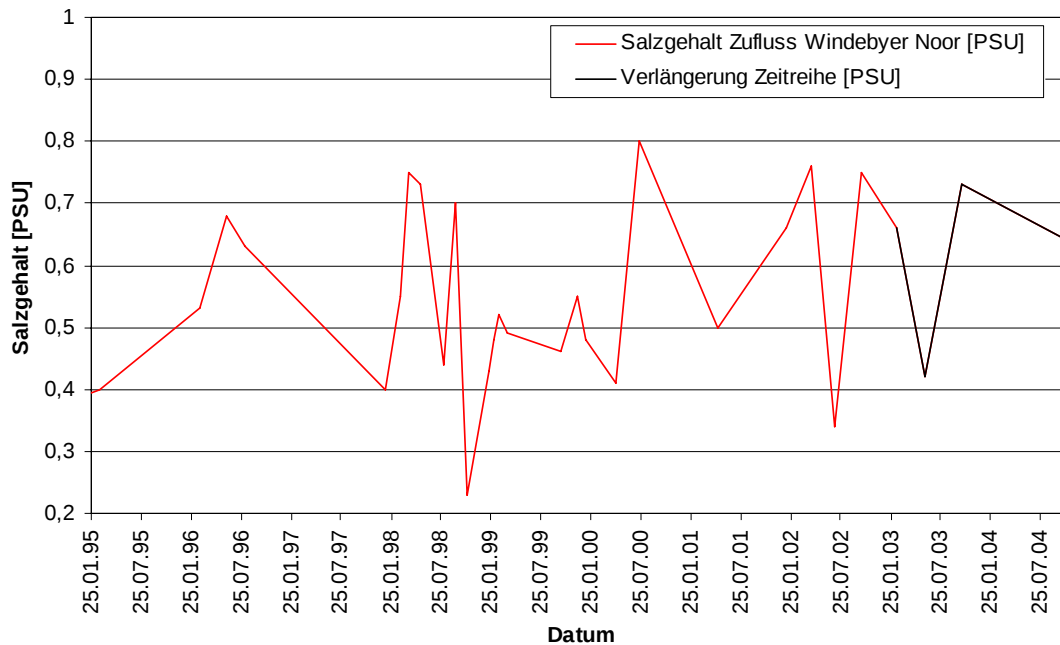


Abb. 100: Obere Randbedingung Salzgehalt Zufluss zum Windebyer Noor

9.3 Simulation Ist-Zustand

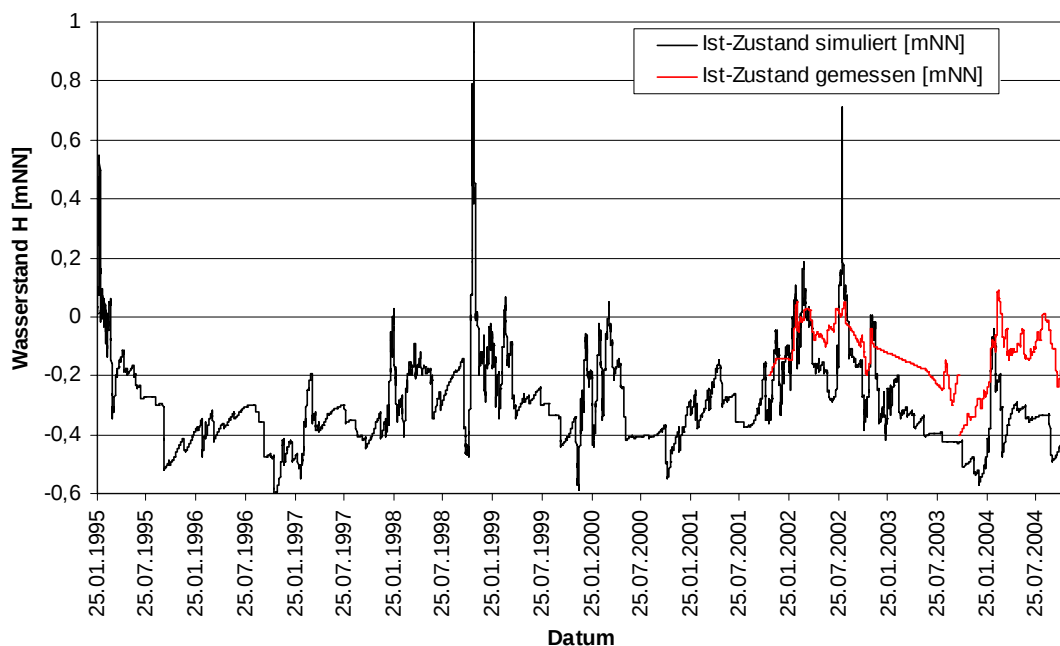


Abb. 101: Vergleich gemessener und simulierter Wasserstand (Windebyer Noor)

Für die Simulation des Ist-Zustandes wurde die bestehende Wehranlage, wie in Kap. 9.1 beschrieben, gesteuert. Die durch diese Steuerung simulierte Wasserstandsganglinie ist in Abb. 101 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die simulierten Wasserstände den gleichen charakteristischen Verlauf aufweisen, wie die gemessenen Wasserstände. Bei den Abweichungen handelt es sich um den Bereich von 5 – 20 cm. Da es jedoch einige Deckungsbereiche der Kurven

gibt, ist davon auszugehen, dass die unsichere Zuflussrandbedingung für die Abweichungen verantwortlich ist. Es scheint, als ob der Zufluss zu niedrig ist und daher zuviel Wasser in die Ostsee abfließen kann. Für die weitere Betrachtung der Ergebnisse stellt dies jedoch kein Problem dar, da das charakteristische Abflussverhalten gut nachgebildet werden konnte.

Ein weiterer Faktor für die Abweichung könnte die Wehrsteuerung sein, da die Lage der Kontrollpunkte für die Steuerung nicht genau getroffen wurde. So könnten abweichende Öffnungs- und Schließzeiten der Wehranlage entstanden sein. Dieses kann nur durch genaue Zeitangaben der Wehrstellungen vermieden werden.

Des Weiteren kann es zu Abweichungen kommen, da zu Simulationsbeginn der Ostseewasserstand für den See angenommen wurde. Es lagen keine Messwerte für den Simulationsbeginn vor. Die Simulation der Optimierung basiert auf den gleichen Rand- und Startbedingungen wie der modellierte Ist-Zustand. Im Simulationsverlauf der Optimierung gleicht sich der Wasserstand im See an die vorgegebenen Grenzwerte (Steuerwasserstände) an. Diese werden durch die Steuerstrategie vorgegeben.

Würde als Ausgangssituation der aufgetretene Ist-Zustand zugrunde gelegt werden und der Steuerstrategie (der Optimierung) unterworfen, so würde sich auch hier der Wasserstand im See an die vorgegebenen Grenzwerte annähern.

Der simulierte und gemessene Ist-Zustand verhält sich hier anders. Die Steuerung ist auf eine maximale Sielleistung ausgelegt. Ein zu niedriger Startwasserstand kann nur durch einen erhöhten Zufluss ausgeglichen werden, da ein Einstrom in den Strandsee durch die vorgegebene Steuerung nicht möglich ist.

Abweichungen zwischen simulierten Wasserstand und Ist-Wasserstand haben keine Auswirkungen auf die Salzgebhaltsberechnung in der Optimierung. Für diese Szenarien erfolgt die Steuerung anhand von Wasserstandsgrenzwerten in den Seen. Die Bauwerkssteuerung anhand dieser Werte führen dazu, dass sich der Seewasserstand an die Grenzwerte angleicht. Der Zeitpunkt des Erreichens des Optimierungswasserstandes hängt davon ab, wie weit die Ausgangszustände davon entfernt sind.

Salzgehalte benötigen länger für die Angleichung , da hierfür entsprechend häufig, größere salzhaltige Ostseewassermengen zufließen müssen.

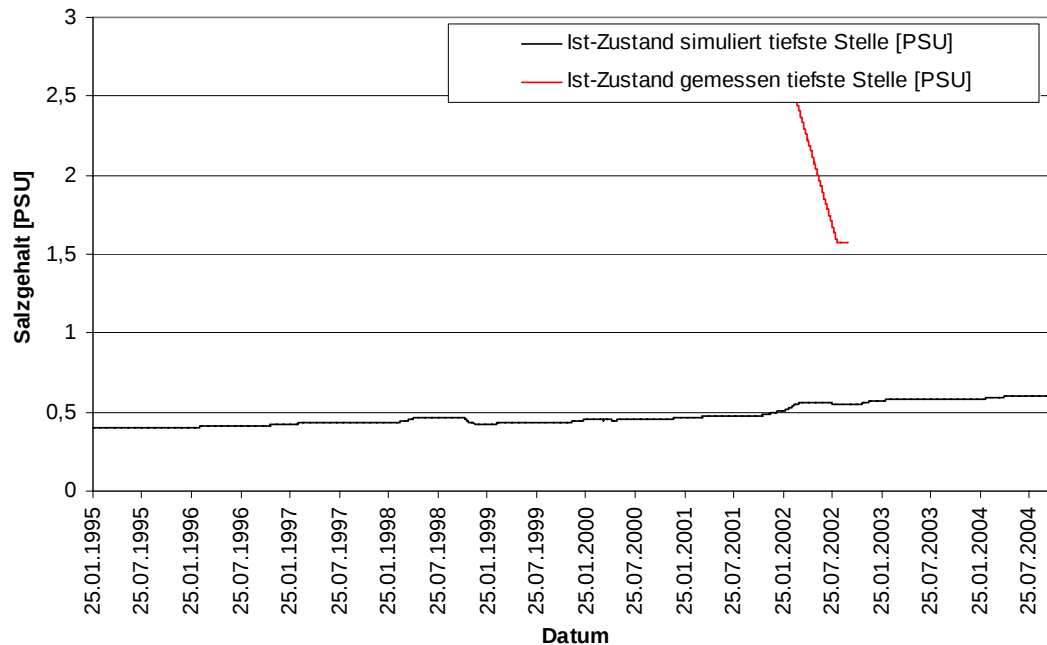


Abb. 102: Vergleich der Salzgehalte Ist-Zustand gemessen (tiefste Stelle) und simuliert (tiefste Stelle) (Windebyer Noor)

Bei der Simulation des Ist-Zustandes fällt auf, dass der simulierte Salzgehalt im gesamten Verlauf unter dem gemessenen liegt. Dies kann daran liegen, dass der Startwasserstand im See zu niedrig ist und es daher bei der Nachsimulation zu ändern Wehröffnungszeiten kam.

Für die weitem Berechnungen war dies nicht von Bedeutung, da die simulierten Salzgehalte als Referenzsalzgehalte genommen wurden und die Simulation der anderen Varianten auf den gleichen Randbedingungen basierten. Daher kann die Änderung des Salzgehaltes direkt auf die variierenden Steuerungen zurückgeführt werden.

9.4 Simulation ungestörte Bedingungen

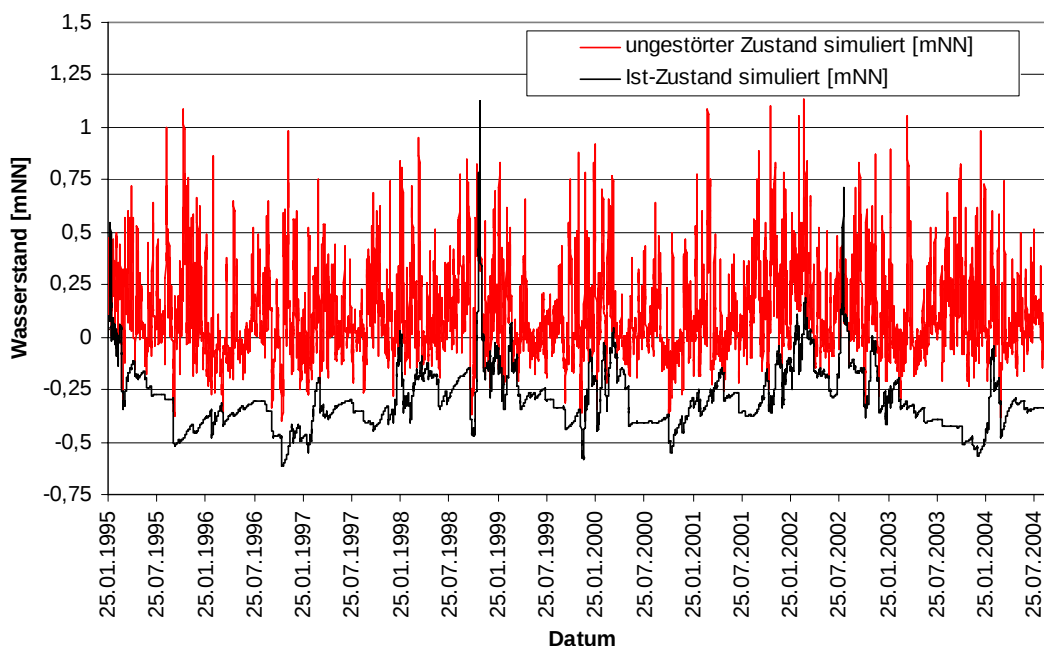


Abb. 103: Vergleich der Wasserstände ungestörter- und Ist-Zustand (Windebyer Noor)

Bei der Berechnung des ungestörten Zustandes wurden alle Bauwerke als komplett geöffnet angesehen, da die Geometrie der Bauwerke als limitierender Faktor dienen sollte. Wären die Bauwerke komplett entnommen worden, so wäre die Entwicklung des Salzgehaltes nicht direkt auf die Steuerung zurückzuführen.

In Tab. 29 sind die mittleren und maximalen Wasserstände aufgeführt. Es ist zu erkennen, dass durch die komplette Öffnung des Bauwerkes der Seewasserstand im Mittel um 41 cm ansteigt. Dies ist auch dem Verlauf der Wasserstandsganglinie in Abb. 103 zu entnehmen.

Der maximale Wasserstand, der im Simulationszeitraum erreicht wurde, beträgt 1,14 mNN und liegt somit um 0,01 m höher als der maximale Wasserstand im simulierten Ist-Zustand. Hieraus ist ersichtlich, dass die Geometrie des Bauwerkes und die jetzige Steuerstrategie das Binnenland vor einem erhöhten Seewasserstand bewahren. Dies trifft besonders für mittlere Seewasserstände zu.

Tab. 29: Wasserstandsentwicklung im Ist- und ungestörten Zustand (Windebyer Noor)

Variante	Mittelwert Wasserstand [mNN]	Maximalwert Wasserstand [mNN]
Ist-Zustand	-0,30	1,13
ungestörter Zustand	0,11	1,14

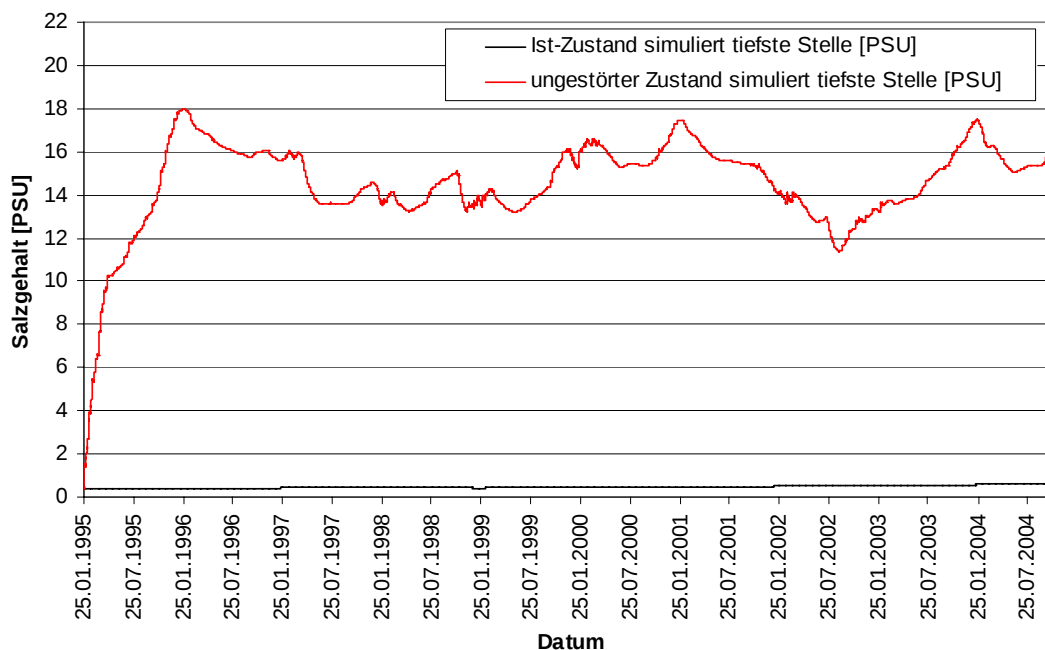


Abb. 104: Vergleich der Salzgehalte ungestörter-(tiefste Stelle) und Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Windebyer Noor)

Der Tab. 30 ist zu entnehmen, dass sich der Salzgehalt im Windebyer Noor unter ungestörten Bedingungen anhebt. Dieser Prozess ist an allen Auswertepunkten zu erkennen. So steigt der mittlere Salzgehalt an der tiefsten Stelle von 0,48 PSU auf 14,55 PSU an und es wird ein maximaler Wert an der tiefsten Stelle im See von 17,99 PSU erreicht. Die Anhebung des Salzgehaltes ist ebenfalls der Abb. 104 und den Abb.-A. 47 bis Abb.-A. 49 im Anhang zu entnehmen. Die Widerversalzung ist ungefähr nach 6 Monaten abgeschlossen.

Tab. 30: Vergleich der mittleren und maximalen Salzgehalte für den Ist- und ungestörten Zustand (Windebyer Noor)

	Variante	Mittelwert [PSU]	Maximalwert [PSU]
tiefste Stelle	Ist-Zustand	0,48	0,60
	ungestörter Zustand	14,55	17,99
Zulauf	Ist-Zustand	0,52	0,74
	ungestörter Zustand	13,71	17,78
Ablauf	Ist-Zustand	0,48	0,60
	ungestörter Zustand	14,87	21,05
gemittelt	Ist-Zustand	0,48	0,60
	ungestörter Zustand	14,50	18,04

9.5 Simulation optimierter Sielbetrieb

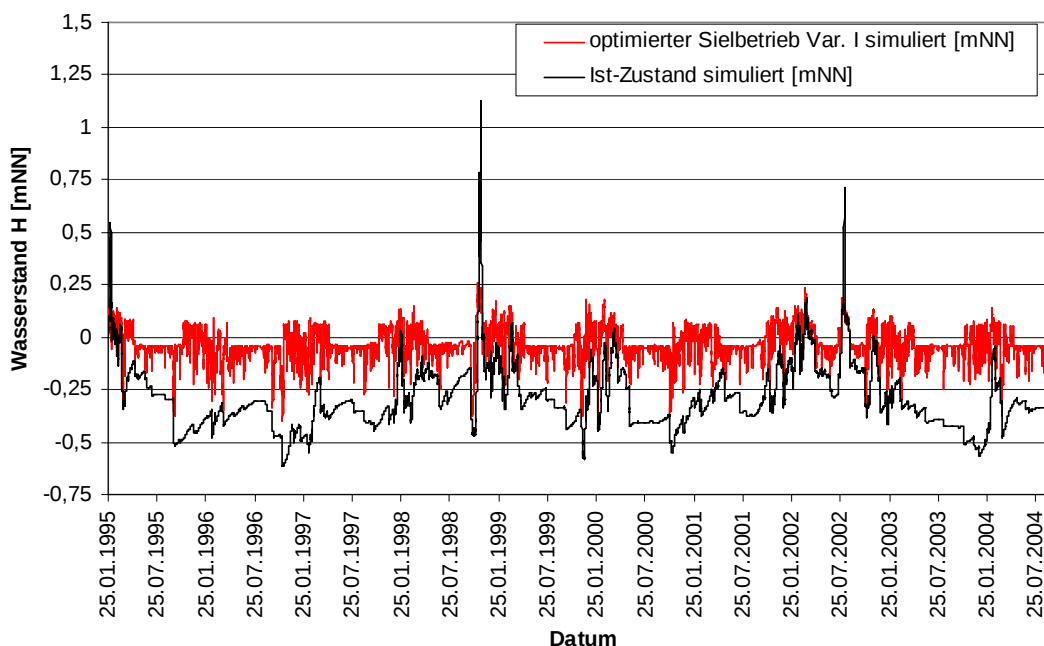


Abb. 105: Vergleich der Wasserstände optimierter Sielbetrieb Var. I und Ist-Zustand (Windebyer Noor)

Beim optimierten Sielbetrieb am Windebyer Noor wurde die Steuerung anhand von Regelwasserständen durchgeführt. Die Steuerung sah vor, dass die Öffnungszeiten des Wehres in Abhängigkeit von den Seewasserständen gesetzt wurden. Da die Optimierung unter Berücksichtigung der jetzigen Nutzung erfolgen sollte, wurden Seewasserstände festgelegt, die nicht überschritten werden sollten. Für den Schwansener See sollten von November bis April die Seewasserstände nicht über 0,05 mNN liegen und in der Zeit von Mai bis Oktober nicht über -0,05 mNN. In der Variante I wurden daher diese Wasserstände als Regelwasserstände verwendet.

Die Wehranlage war daher immer geöffnet, solange der Seewasserstand die Grenzwerte unterschritt. Somit war ein maximaler Salzgehaltsaustausch unter Berücksichtigung der jetzigen Nutzung möglich.

Tab. 31: Wasserstandsentwicklung für die Variantenrechnungen (Windebyer Noor)

Variante	Mittelwert Wasserstand [mNN]	Maximalwert Wasserstand [mNN]
Ist-Zustand	-0,30	1,13
ungestörter Zustand	0,11	1,14
optimierter Sielbetrieb Var. I	-0,04	0,26
optimierter Sielbetrieb Var. II	-0,18	0,24

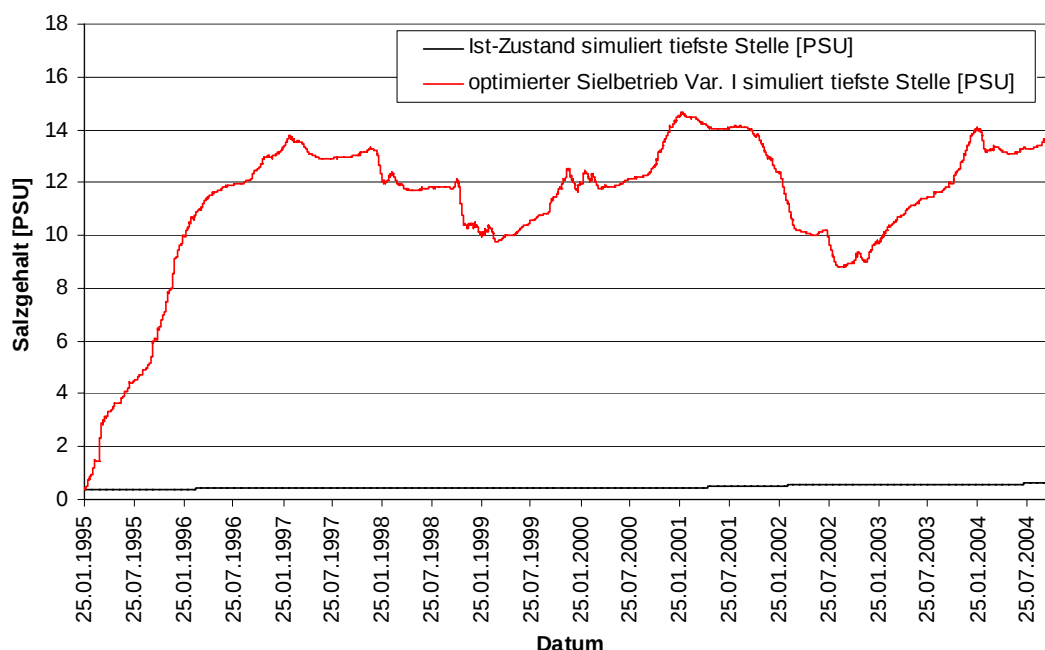


Abb. 106: Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (tiefste Stelle) und Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Windebyer Noor)

Das Ergebnis ist in Abb. 105 (Var. I), Abb. 107 (Var. II) und Tab. 31 dargestellt. Zu erkennen ist, dass für die Variante I die simulierte Ist-Zustands-Wasserstandsganglinie und auch die limitierenden Regelungswasserstände überschritten wurden. Daher wurde eine zweite Variante berechnet, die von November bis April Regelwasserstände von -0,15 mNN und in der Zeit von Mai bis Oktober Regelwasserstände von -0,30 mNN vorsah. Bei der Auswertung ist klar ersichtlich, dass die Wasserstände für die Variantenrechnung II unterhalb der Optimierungswasserstände liegen. In Bereichen, wo dies nicht der Fall ist, kam es auch im Ist-Zustand zu Überschreitungen, so dass von einer Einhaltung der Optimierungsbedingung gesprochen werden kann.

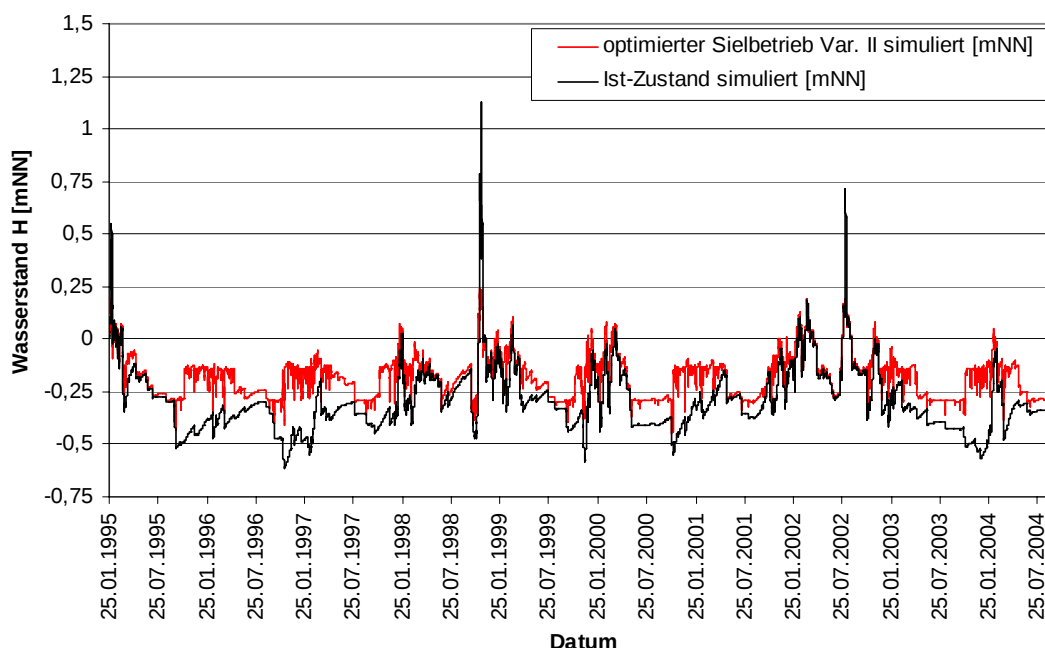


Abb. 107: Vergleich der Wasserstände optimierter Sielbetrieb Var. II und Ist-Zustand (Windebyer Noor)

Die Ergebnisse der Variante I sind den Abb. 106, Abb.-A. 50 bis Abb.-A. 52 (im Anhang), Tab. 31 und Tab. 32 zu entnehmen.

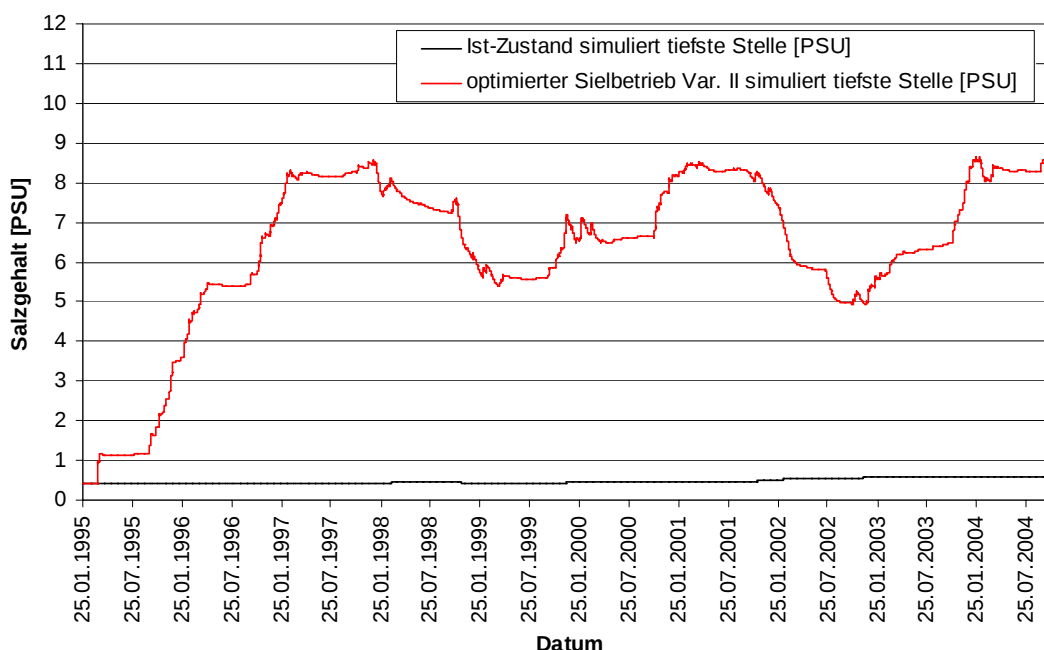


Abb. 108: Vergleich der Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (tiefste Stelle) und Ist-Zustand (tiefste Stelle) (Windebyer Noor)

Bei der Auswertung der Tab. 32, der Abb. 107 und Abb.-A. 53 bis Abb.-A. 55 wird deutlich, dass durch eine optimierte Bauwerkssteuerung der Salzgehalt im See wieder angehoben werden kann. An der tiefsten Stelle werden im Mittel 6,37 PSU erreicht und in der Spitze 8,85 PSU. Die Anhebung des Salzgehaltes wurde in der Variante II nach ca. einem Jahr erreicht.

Tab. 32: Vergleich der mittleren und maximalen Salzgehalte für die Variantenrechnungen (Windebyer Noor)

	Variante	Mittelwert [PSU]	Maximalwert [PSU]
tiefste Stelle	Ist-Zustand	0,48	0,60
	ungestörter Zustand	14,55	17,99
	optimierter Sielbetrieb Var. I	11,29	14,65
	optimierter Sielbetrieb Var. II	6,37	8,85
Zulauf	Ist-Zustand	0,52	0,74
	ungestörter Zustand	13,71	17,78
	optimierter Sielbetrieb Var. I	10,47	14,18
	optimierter Sielbetrieb Var. II	5,73	8,34
Ablauf	Ist-Zustand	0,48	0,60
	ungestörter Zustand	14,87	21,05
	optimierter Sielbetrieb Var. I	11,62	19,44
	optimierter Sielbetrieb Var. II	6,57	18,35
gemittelt	Ist-Zustand	0,48	0,60
	ungestörter Zustand	14,50	18,04
	optimierter Sielbetrieb Var. I	11,25	14,73
	optimierter Sielbetrieb Var. II	6,32	9,10



10 ZUSAMMENFASSUNG

Bei der Modellierung des Salzgehaltes von Strandseen an der Ostsee unter ungestörten Bedingungen konnte festgestellt werden, dass der Salzgehalt in den Seen durch die Entnahme der Bauwerke wieder angehoben werden konnte. Das Gleiche trifft für die optimierten Steuervarianten zu. Hierbei ist zu erwähnen, dass die Anhebung des Salzgehaltes stark von den Binnenwasserständen im See abhängt, da die binnenseitige Landnutzung nicht beeinträchtigt werden sollte. Aus diesem Grund wurden Grenzwasserstände festgelegt, die als Reglementierung dienen. In der ersten Berechnungsvariante der Optimierung wurden die Grenzwasserstände direkt als Regelwasserstände verwendet. Da jedoch der Zufluss zu den Seen in den meisten Fällen eine direkte Überschreitung nach sich gezogen hat, da die Wehranlagen über längere Zeiträume geschlossen blieben, wurde eine zweite Variante gerechnet. Hierbei wurden Regelwasserstände für die Wehranlagen festgelegt, mit denen die Grenzwasserstände eingehalten wurden. Überschreitungen der Grenzwasserstände sind dennoch vorgekommen. Diese überschritten sich aber mit dem simulierten Ist-Zustand in deren Ausdehnung und Intensität. Da die jetzige Nutzung beibehalten werden sollte, stellen die Überschreitungen keine Verletzung der Optimierungsbedingung dar.

Tab. 33: Salzgehaltsentwicklung für die Varianten in allen Seen

See	Variante	Tiefste Stelle [PSU]	Maximalwert [PSU]
Gr. Binnensee	Ist-Zustand	0,48	0,60
	ungestörter Zustand	10,82	17,07
	optimierter Sielbetrieb Var. I	10,29	16,31
	optimierter Sielbetrieb Var. II	7,08	14,34
Hemmelmarker See	Ist-Zustand	0,47	0,54
	ungestörter Zustand	2,72	5,07
	optimierter Sielbetrieb Var. I	2,22	4,43
	optimierter Sielbetrieb Var. II	0,53	0,80
Hemmelsdorfer See	Ist-Zustand	0,51	0,55
	ungestörter Zustand	2,97	4,03
	optimierter Sielbetrieb Var. I	2,02	2,71
	optimierter Sielbetrieb Var. II	0,96	1,30
Schwansener See	Ist-Zustand	0,63	0,79
	ungestörter Zustand	10,23	17,89
	optimierter Sielbetrieb Var. I	8,76	17,30
	optimierter Sielbetrieb Var. II	3,18	13,65
Windebyer Noor	Ist-Zustand	0,48	0,60
	ungestörter Zustand	14,55	17,99
	optimierter Sielbetrieb Var. I	11,29	14,65
	optimierter Sielbetrieb Var. II	6,37	8,85

Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass eine Anhebung des Salzgehaltes umso größer war, je mehr die jetzige Steuerung von der Optimierten abwich. Die Ergebnisse sind zusammenfassend für alle Seen in Tab. 33 dargestellt. Das Neustädter Binnenwasser und der Sehlendorfer See sind nicht aufgeführt, da für diese beiden Seen keine Optimierung zu rechnen war.

Beim Vergleich der Wasserstände für den gemessenen und simulierten Ist-Zustand kam es bei einigen Seen zu Abweichungen. Der Simulationszeitraum beträgt knapp 10 Jahre damit sich der Wasserstand über die Zeit regulieren kann, so dass die Aussagen zum Salzgehalt verlässlich sind und die Abweichungen der Wasserstandsganglinien zu vernachlässigen sind. Des Weiteren kann es zu Abweichungen kommen, da bei geringen Abweichungen der Steuerungen, der Wasserstand nachhaltig beeinflusst wird. Da die Steuerung wiederum vom Wasserstand abhängig ist können Klaffungen zwischen Simulation und Messung entstehen. Bei genau bekannten Öffnungszeiten der Wehre und den Startwasserständen in den Seen würden solche Klaffungen vermieden.

Die modellierten Wasserstände für die einzelnen Seen variieren sehr stark für die ungestörte Betrachtung. Dies hängt mit den Bauwerken zusammen, die an den jeweiligen Seen angeordnet sind. Diese werden für die ungestörte Betrachtung komplett geöffnet, da ein vollkommen ungestörter Zufluss/Abfluss (Entnahme der Bauwerke) an einigen Seen durch Besiedlung oder die topographischen Gegebenheiten nicht möglich ist. Daher ergeben sich die stark variierenden Wasserstandsunterschiede aus den Bauwerksgeometrien und dabei insbesondere aus dem frei zur Verfügung stehenden Fließquerschnitt. Da z.B. am Großen Binnensee das Absperrbauwerk zur Ostsee eine Wehranlage im bestehenden Deich ist, kann hier bei der ungestörten Betrachtung ein großer Querschnitt freigegeben werden, was starke Wasserstandsanstiege verursacht. Am Hemmelsdorfer See hingegen wird nur eine Rückstauklappe entfernt und die ungestörten Bedingungen sind durch den Rohrquerschnitt begrenzt (Abb. 109).



Abb. 109: Bauwerke- links: Gr. Binnensee; rechts: Hemmelsdorfer See

Des Weiteren baut sich durch den See eine Druckhöhe auf, so dass der Ostseewasserstand erst stark ansteigen muss, um diese Druckhöhe zu übersteigen, damit Wasser in den See strömt. Als Fazit lässt sich daher feststellen, dass die ungestörten Bedingungen durch die Topographischen und baulichen Bedingungen beeinflusst werden und somit die Wasserstandsanstiege innerhalb der Seen stark variieren. Eine Darstellung der Überschwemmungsflächen kann nicht erstellt werden, da nicht alle Deich- und Straßenhöheninformationen vorlagen. Eine Berechnung würde hier größere Flächen unter Wasser setzen, als dies in den Örtlichkeiten möglich wäre.



Zur Qualität der Modelle lässt sich sagen, dass bei sicheren Randbedingungen sowohl Wasserstände als auch Salzgehalt korrekt nachgebildet werden konnten. Für die Aussage der Salzgehaltsentwicklung wurde immer der simulierte Ist-Zustand in Beziehung zu den Optimierungen gesetzt. Da die Simulationen von gleichen Start- und Randbedingungen ausgingen, ist die Relation immer gewährleistet, so dass bei Abweichungen vom gemessenen und simulierten Ist-Zustand die Aussagen zur Salzgehaltsentwicklung korrekt sind.

Zur Simulation der Salzgehaltsentwicklung in den Strandseen sind die verwendeten 1D-Modelle bestens geeignet, da es laut Aussage des LANU keine Schichtung innerhalb der Seen gibt. Wäre dies nicht der Fall, so müsste eine dreidimensionale Modellierung erfolgen. Für die Aufgabenstellung der Salzbilanzierung ist es außerdem von Vorteil, die Seen eindimensional abzubilden, da bei der Modellierung die Steuerung der Bauwerke und die Bauwerke selbst sehr gut abgebildet werden können. Des Weiteren herrscht in den Seen eine einseitige Belastung vor. Damit ist die starke Variation des Salzgehaltes von der Ostseeseite her gemeint. Der Binnenseitige Zufluss ist vom Salzgehalt her sehr konstant, so dass die Veränderung fast nur von Seeseite erfolgt und dies auch nur zu Zeiten von geöffneten Bauwerken. Wäre eine starke Variation der Salzgehalte von beiden Seiten zu simulieren, wäre wieder die dreidimensionale Betrachtung von Nöten. Als Fazit lässt sich sagen dass die eindimensionale Modellierung für die Fragestellung den optimalen Ansatz darstellt.



ANLAGEN



10.1 Anlagen Hemmelmarker See

10.1.1 Salzgehalt Ist-Zustand

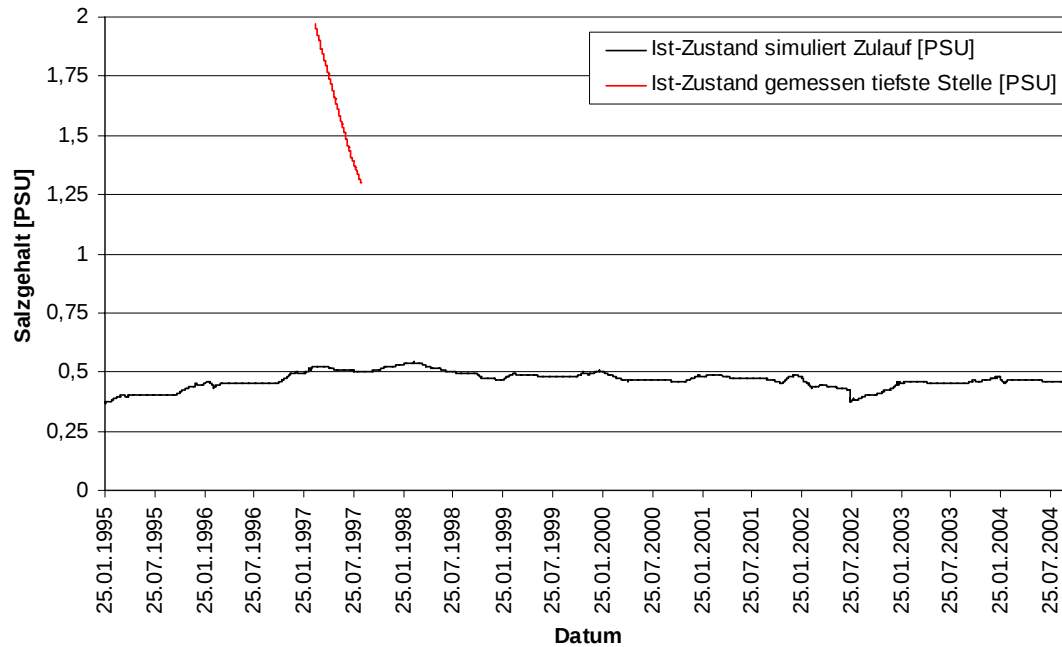


Abb.-A. 1: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (Zulauf) und gemessen (tiefste Stelle) (Hemmelmarker See)

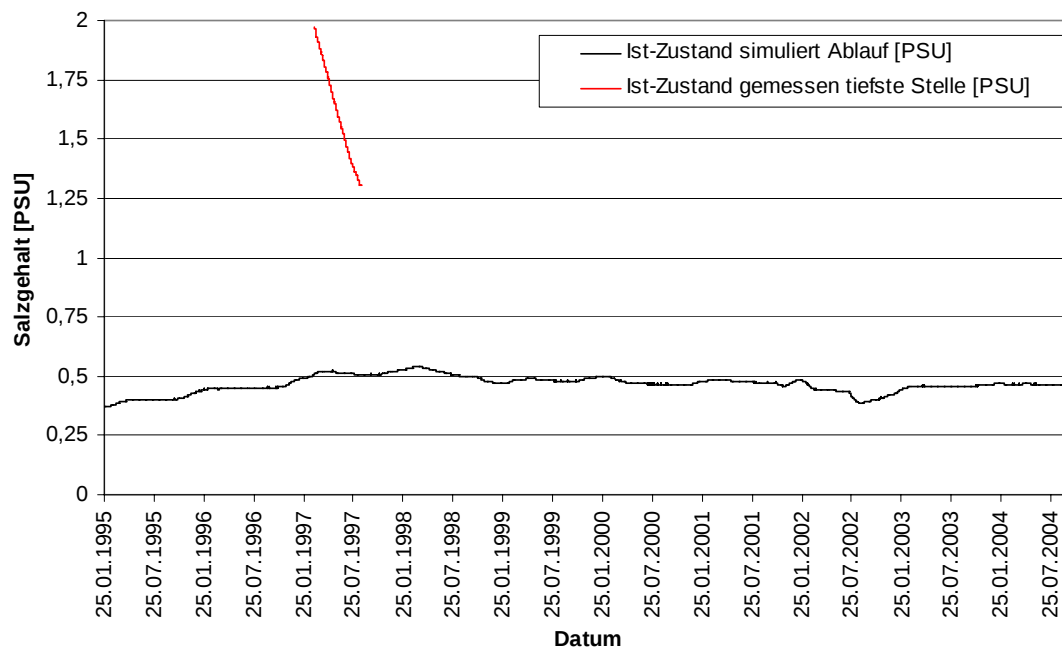


Abb.-A. 2: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (Ablauf) und gemessen (tiefste Stelle) (Hemmelmarker See)

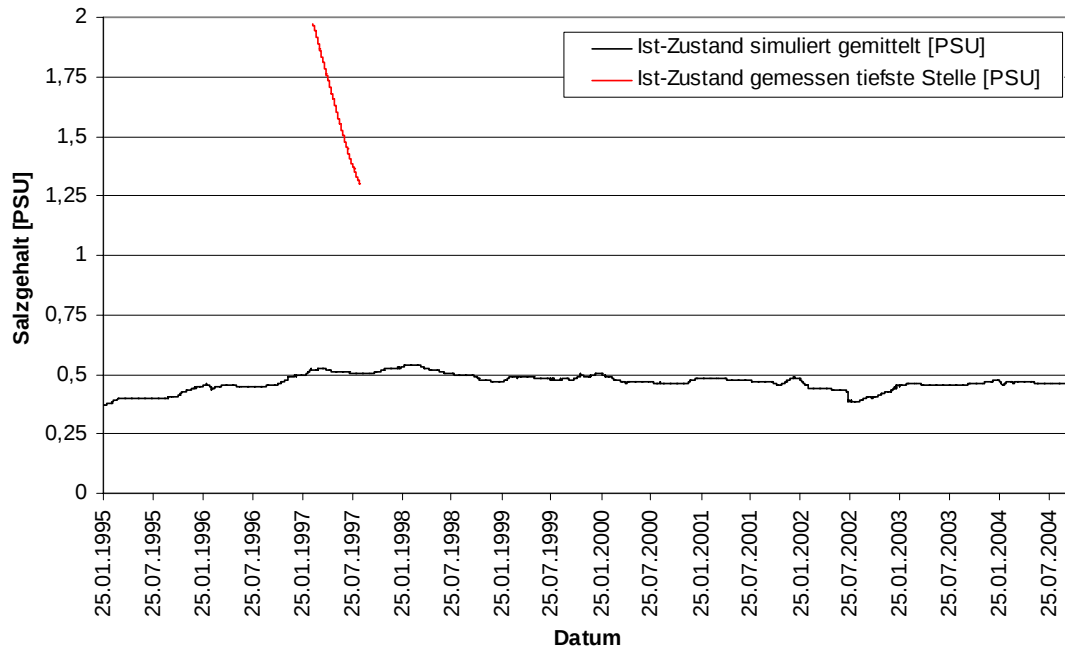


Abb.-A. 3: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (gemittelt) und gemessen (tiefste Stelle) (Hemmelmarker See)

10.1.2 Salzgehalt ungestörter Zustand

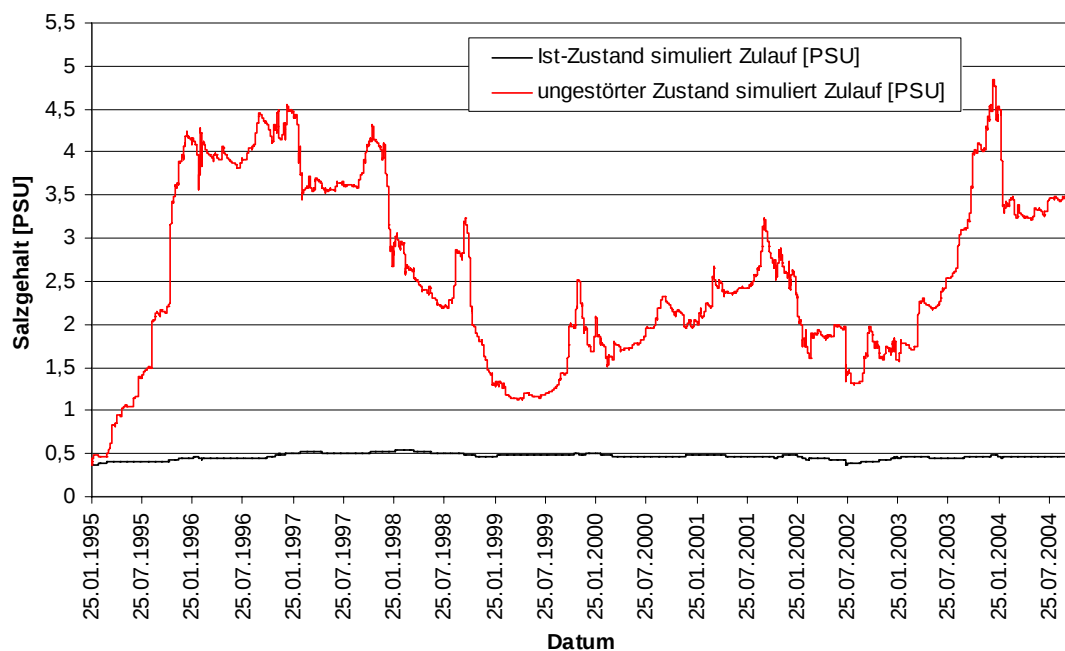


Abb.-A. 4: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand (Zulauf) und ungestörter Zustand (Zulauf) (Hemmelmarker See)

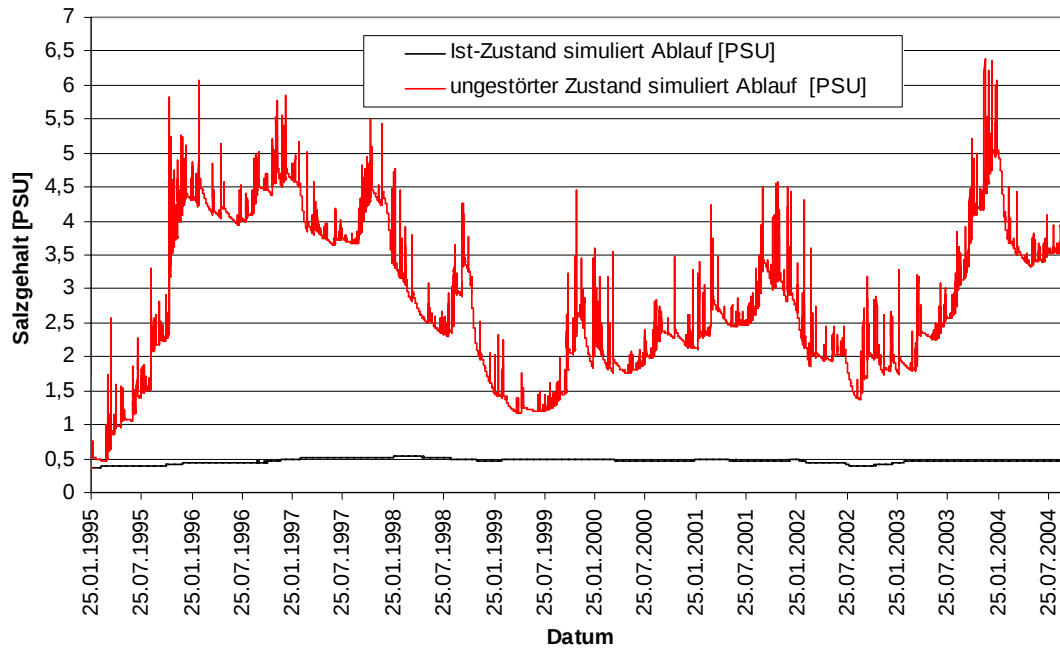


Abb.-A. 5: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand (Ablauf) und ungestörter Zustand (Ablauf) (Hemmelmarker See)

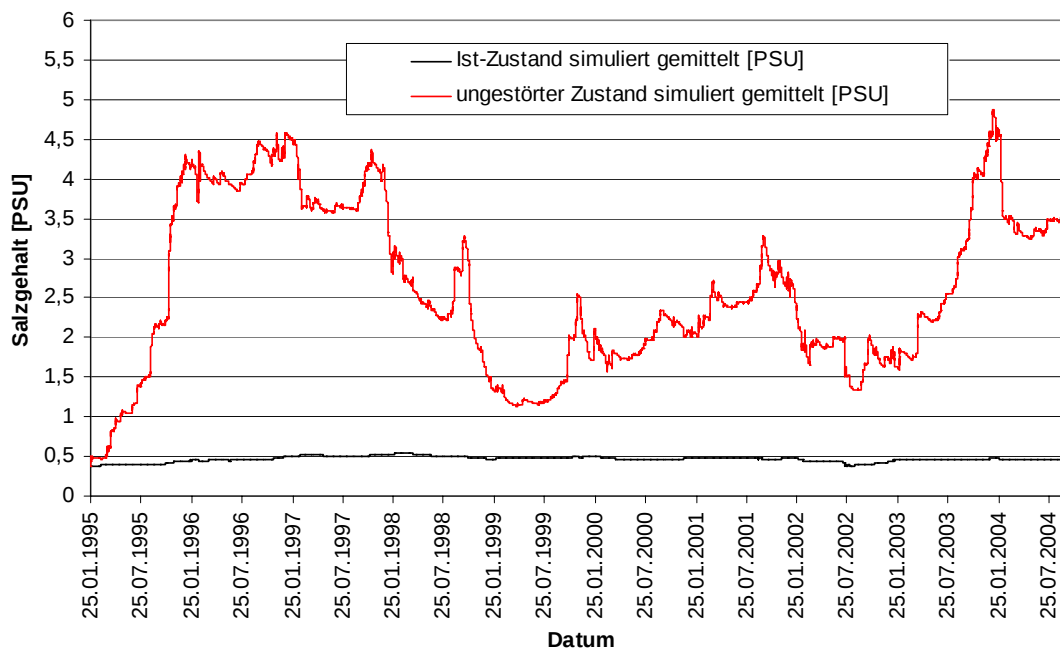


Abb.-A. 6: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand (gemittelt) und ungestörter Zustand (gemittelt) (Hemmelmarker See)

10.1.3 Salzgehalt Optimierung Var. I

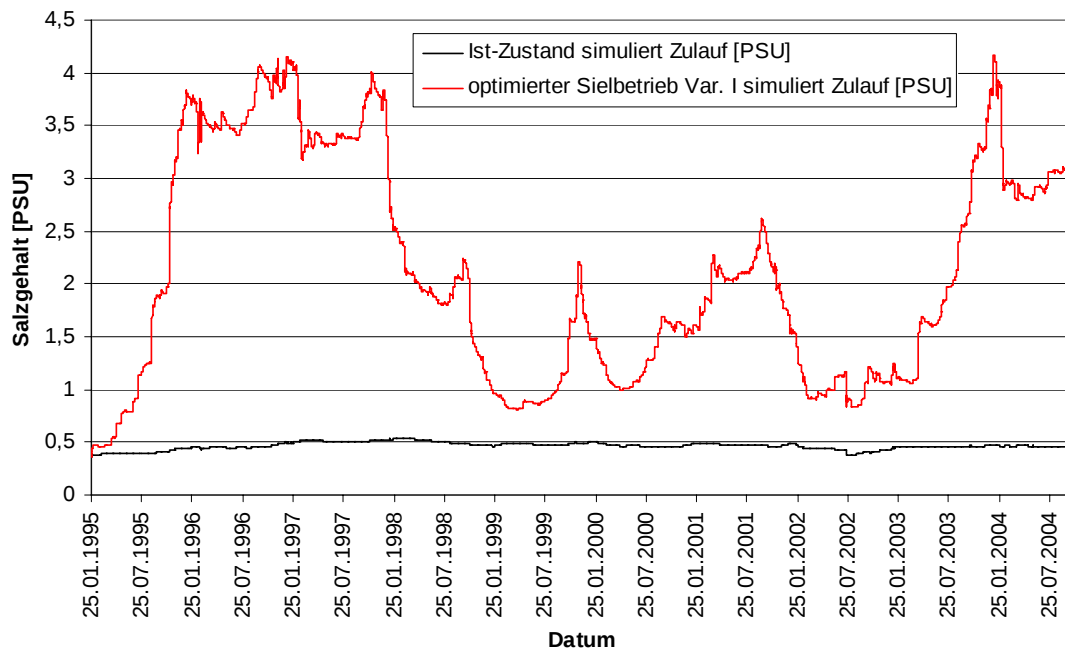


Abb.-A. 7: Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (Zulauf) und Ist-Zustand (Zulauf) (Hemmelmarker See)

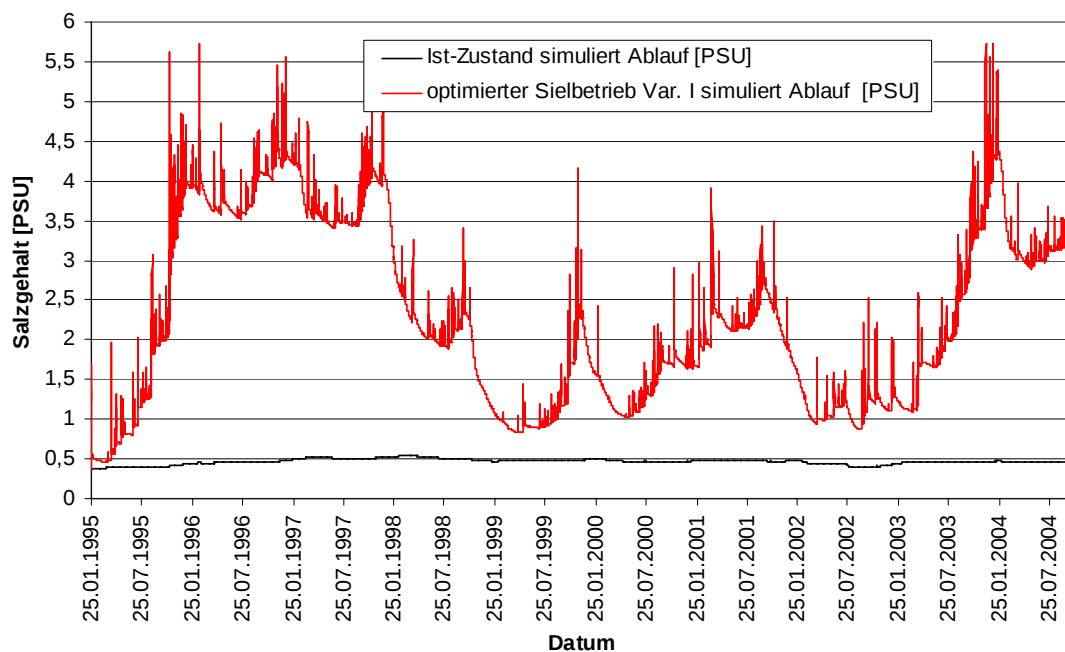


Abb.-A. 8: Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (Ablauf) und Ist-Zustand (Ablauf) (Hemmelmarker See)

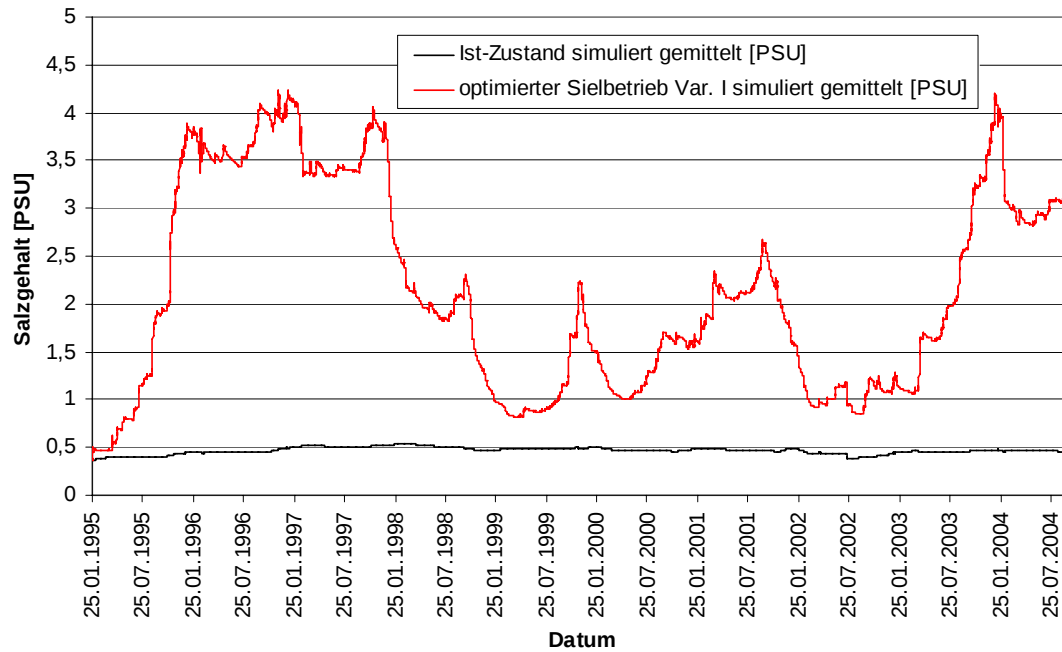


Abb.-A. 9: Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (gemittelt) und Ist-Zustand (gemittelt) (Hemmelmarker See)

10.1.4 Salzgehalt Optimierung Var. II

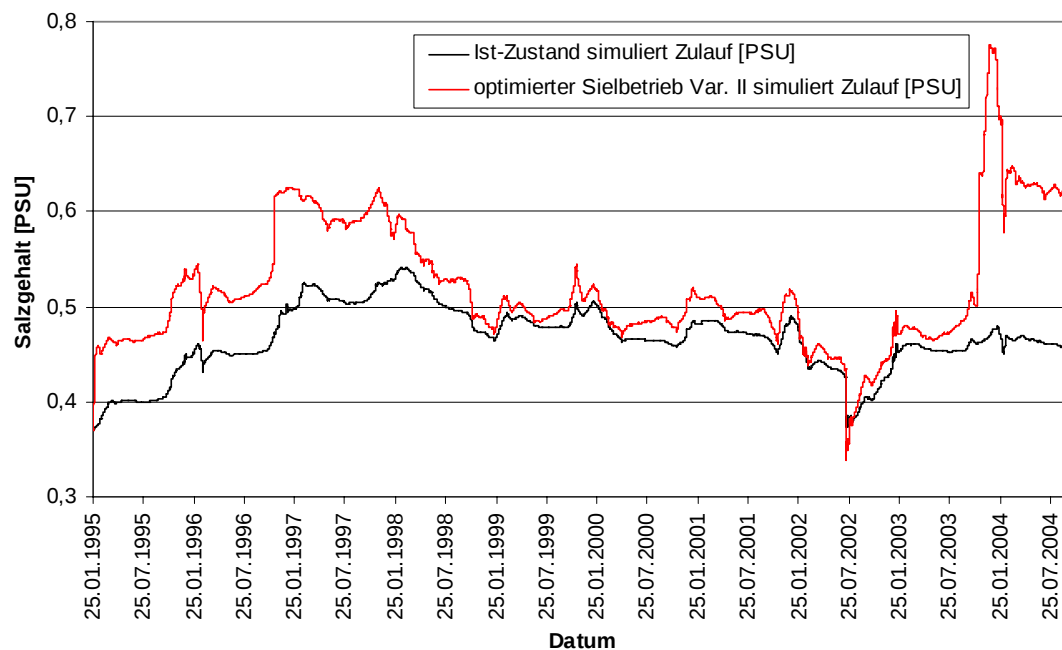


Abb.-A. 10: Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (Zulauf) und Ist-Zustand (Zulauf) (Hemmelmarker See)

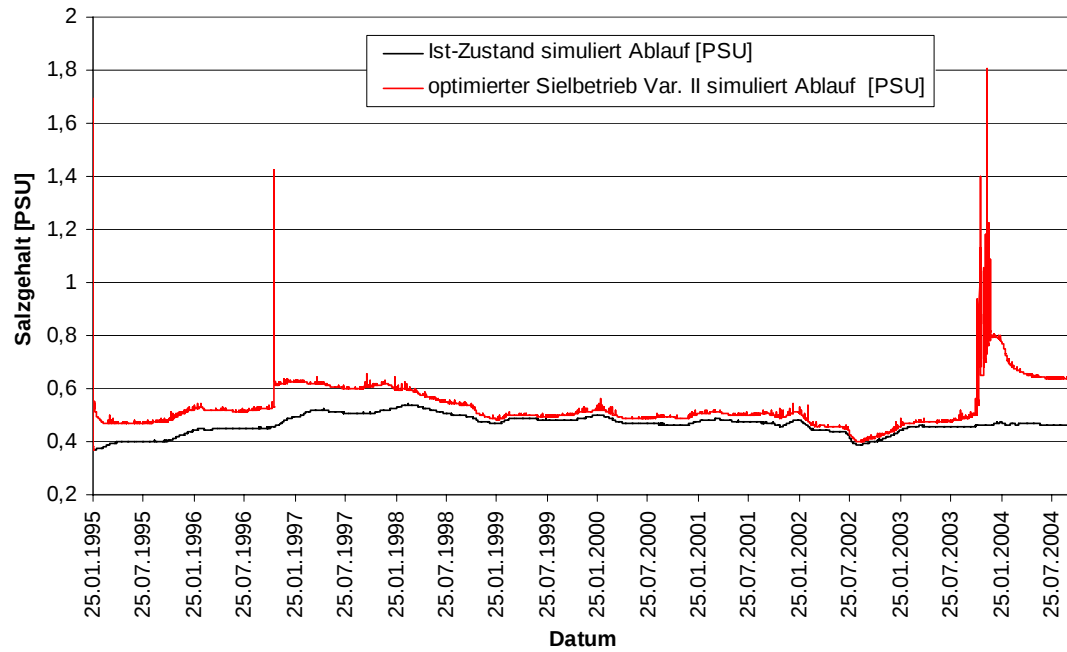


Abb.-A. 11: Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (Ablauf) und Ist-Zustand (Ablauf) (Hemmelmarker See)

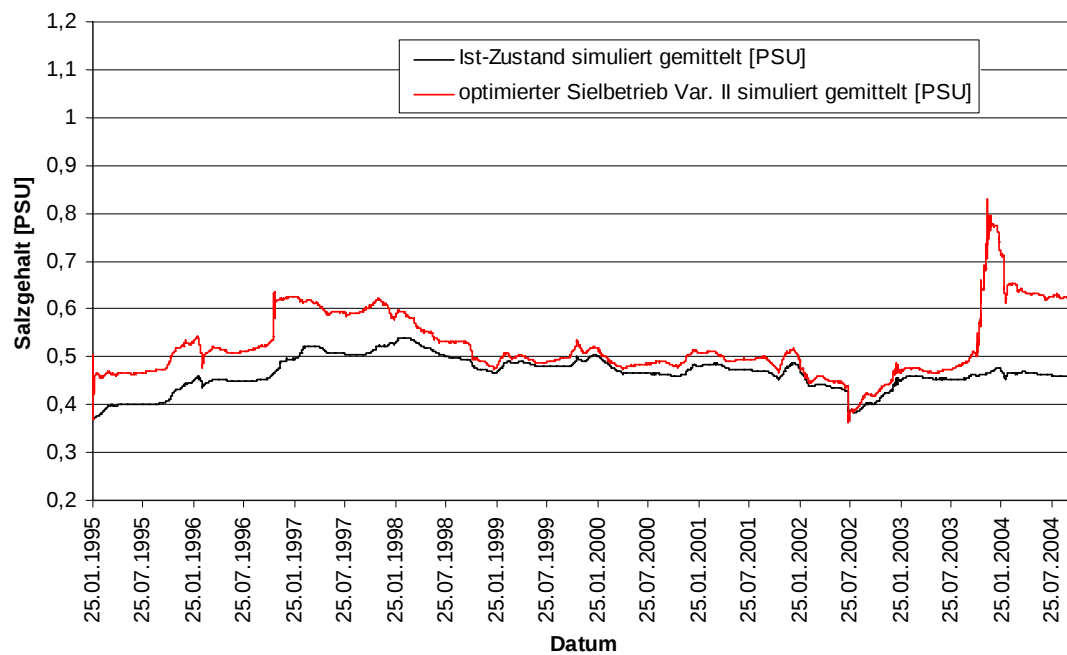


Abb.-A. 12: Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (gemittelt) und Ist-Zustand (gemittelt) (Hemmelmarker See)



10.2 Anlagen Hemmelsdorfer See

10.2.1 Salzgehalt Ist-Zustand

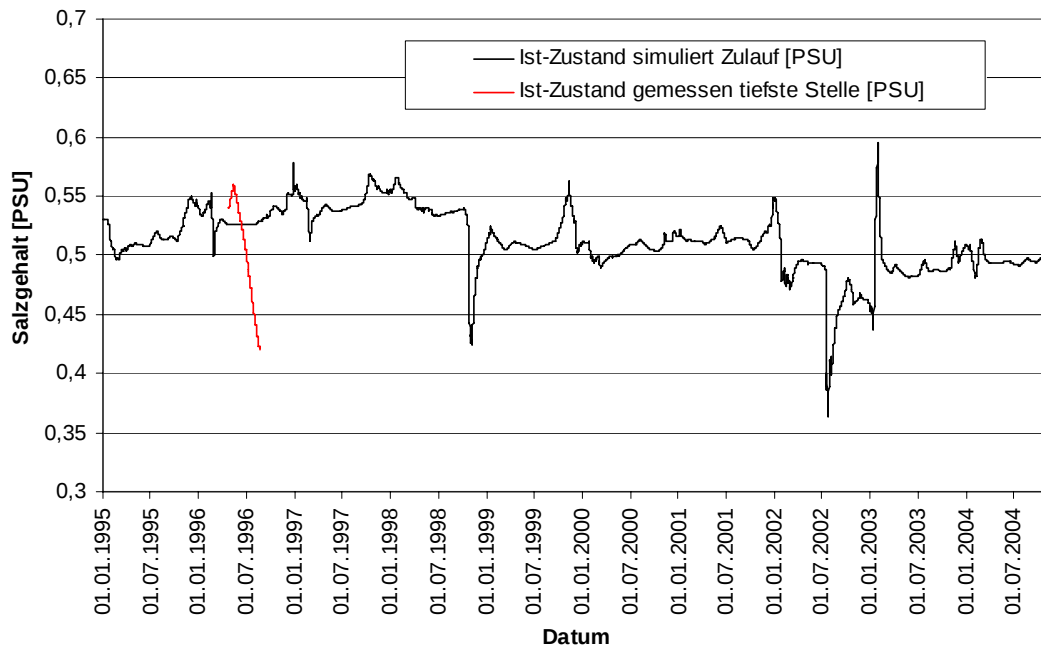


Abb.-A. 13: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (Zulauf) und gemessen (tiefste Stelle) (Hemmelsdorfer See)

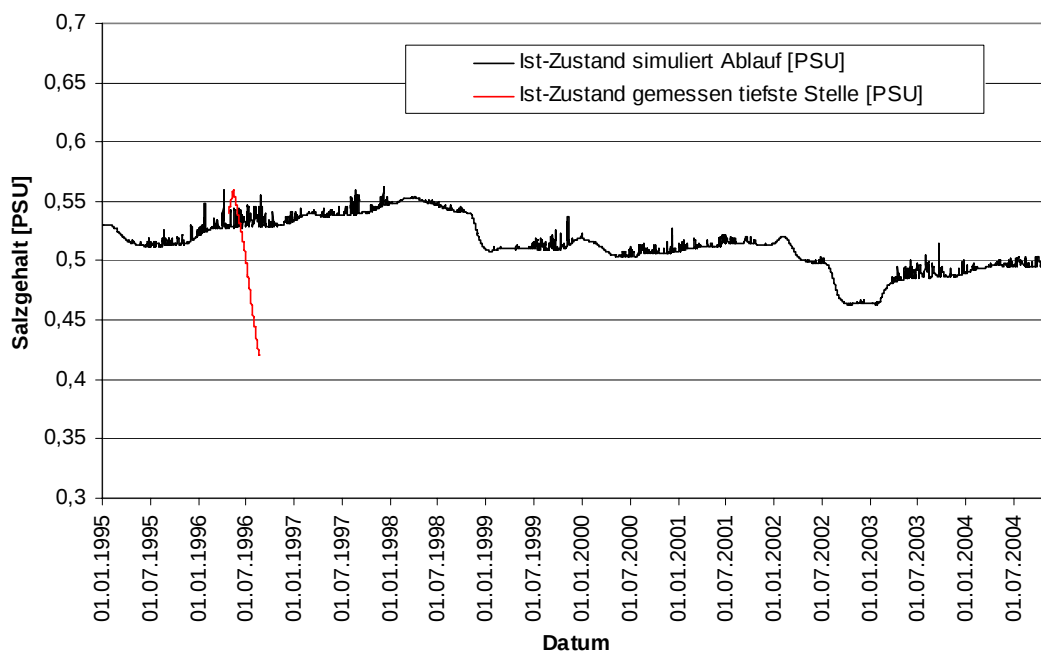


Abb.-A. 14: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (Ablauf) und gemessen (tiefste Stelle) (Hemmelsdorfer See)

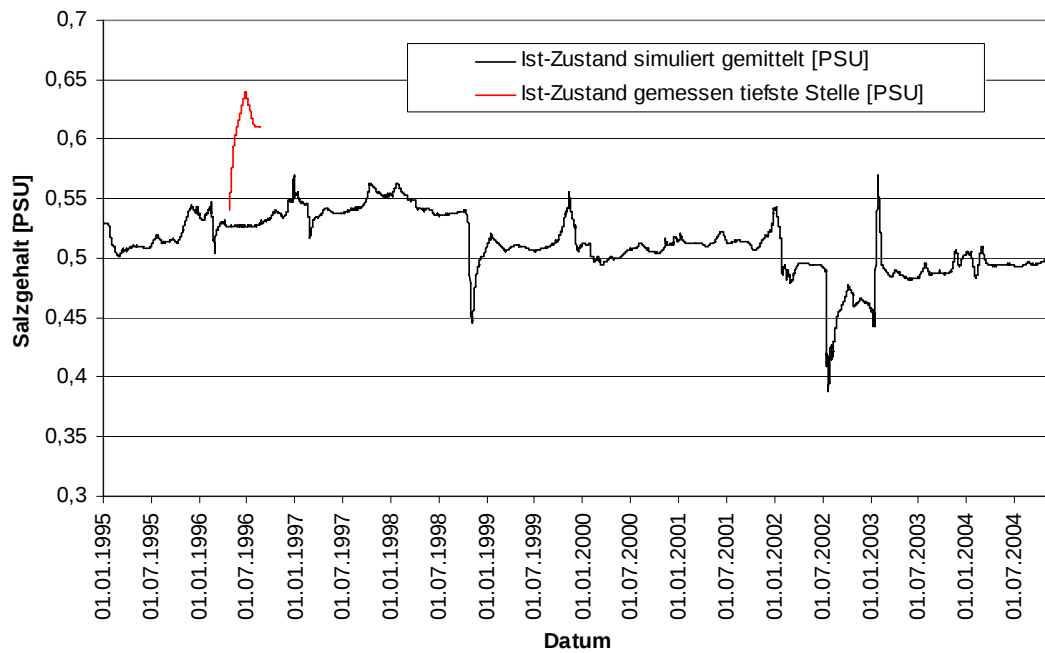


Abb.-A. 15: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (gemittelt) und gemessen (tiefste Stelle) (Hemmelsdorfer See)

10.2.2 Salzgehalt ungestörter Zustand

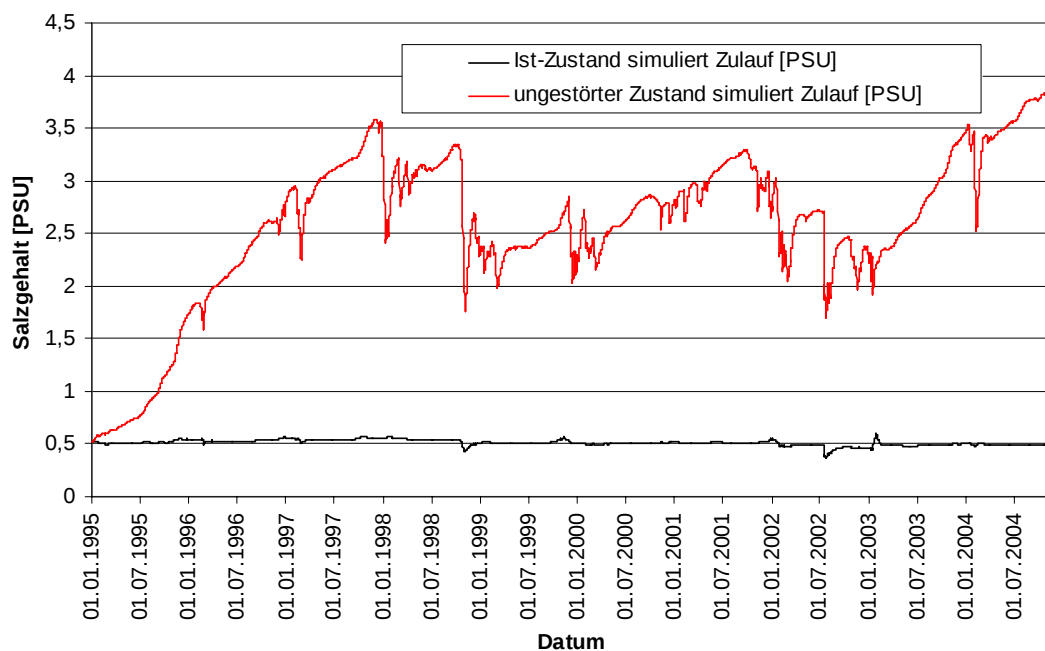


Abb.-A. 16: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand (Zulauf) und ungestörter Zustand (Zulauf) (Hemmelsdorfer See)

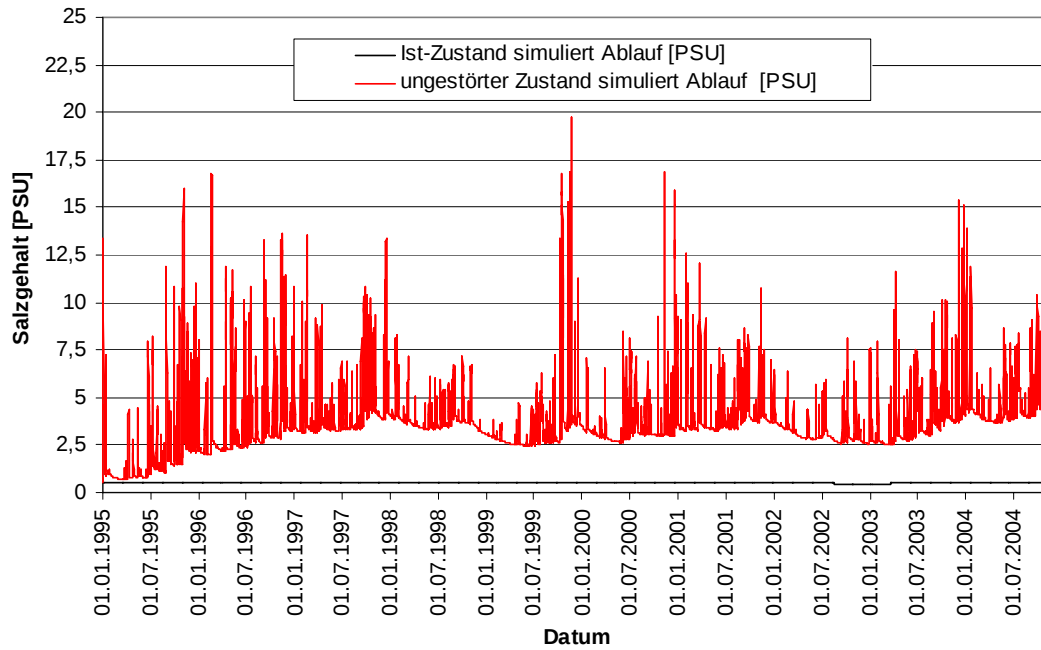


Abb.-A. 17: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand (Ablauf) und ungestörter Zustand (Ablauf) (Hemmelsdorfer See)

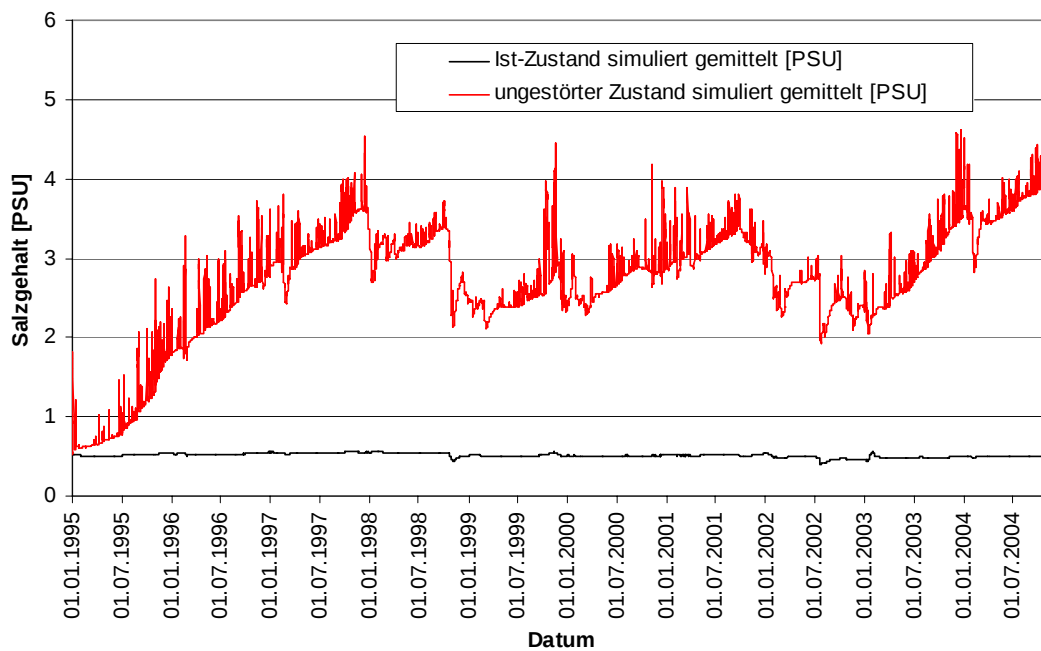


Abb.-A. 18: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand (gemittelt) und ungestörter Zustand (gemittelt) (Hemmelsdorfer See)

10.2.3 Salzgehalt Optimierung Var. I

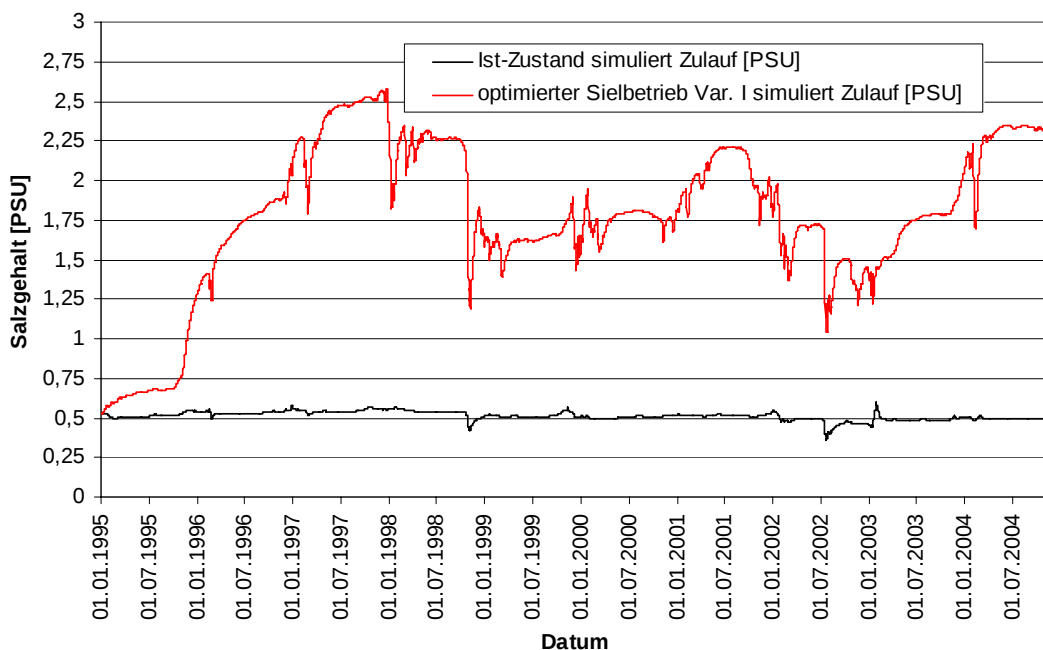


Abb.-A. 19: Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (Zulauf) und Ist-Zustand (Zulauf) (Hemelsdorfer See)

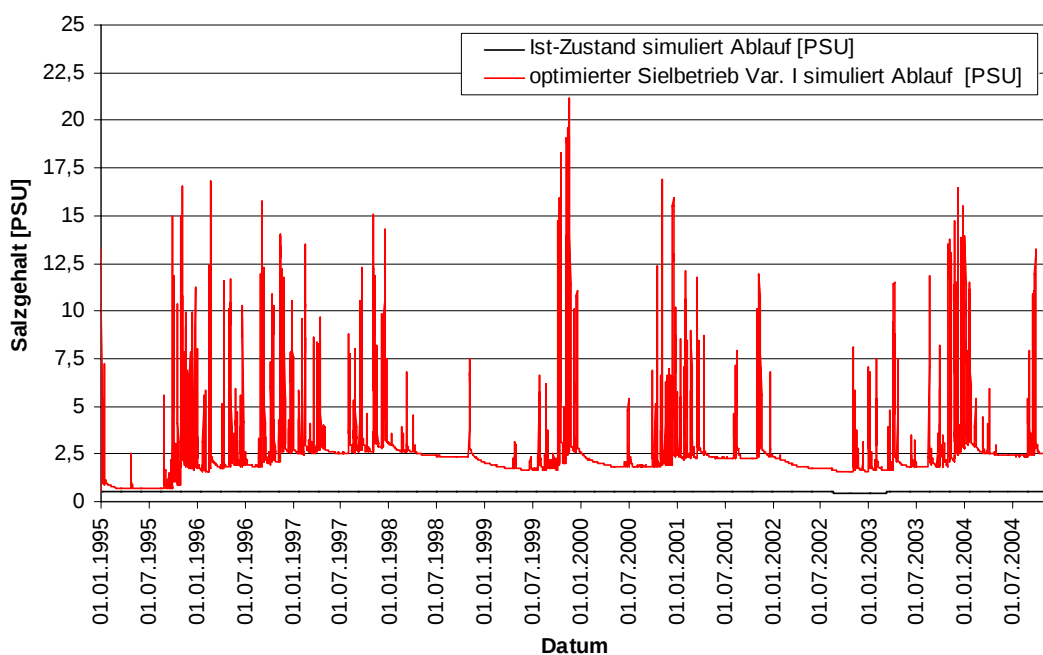


Abb.-A. 20: Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (Ablauf) und Ist-Zustand (Ablauf) (Hemelsdorfer See)

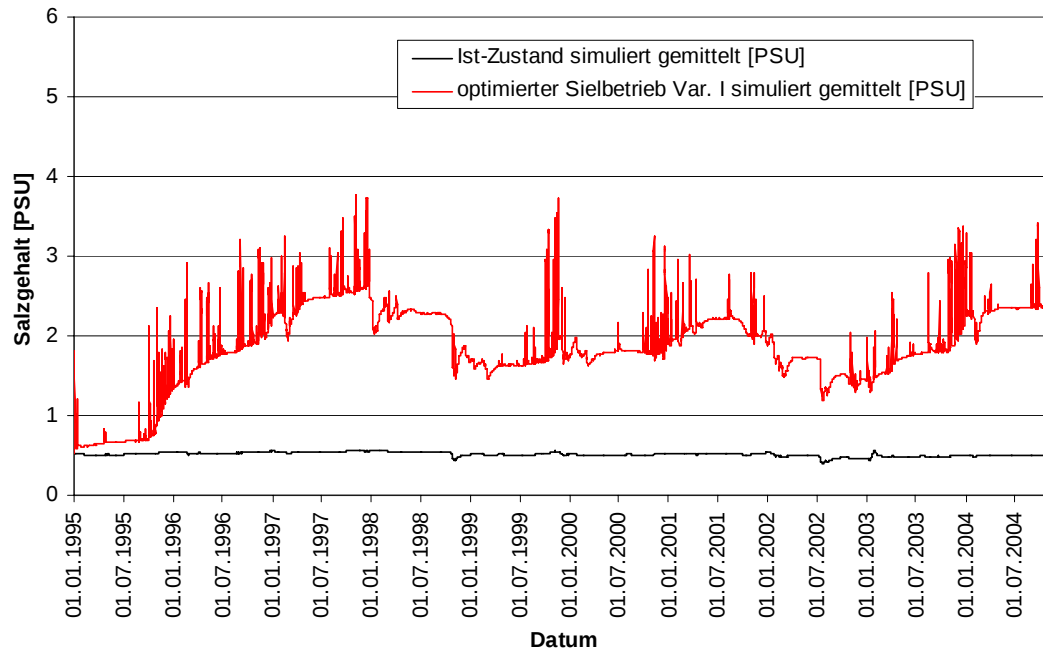


Abb.-A. 21: Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (gemittelt) und Ist-Zustand (gemittelt) (Hemmelsdorfer See)

10.2.4 Salzgehalt Optimierung Var. II

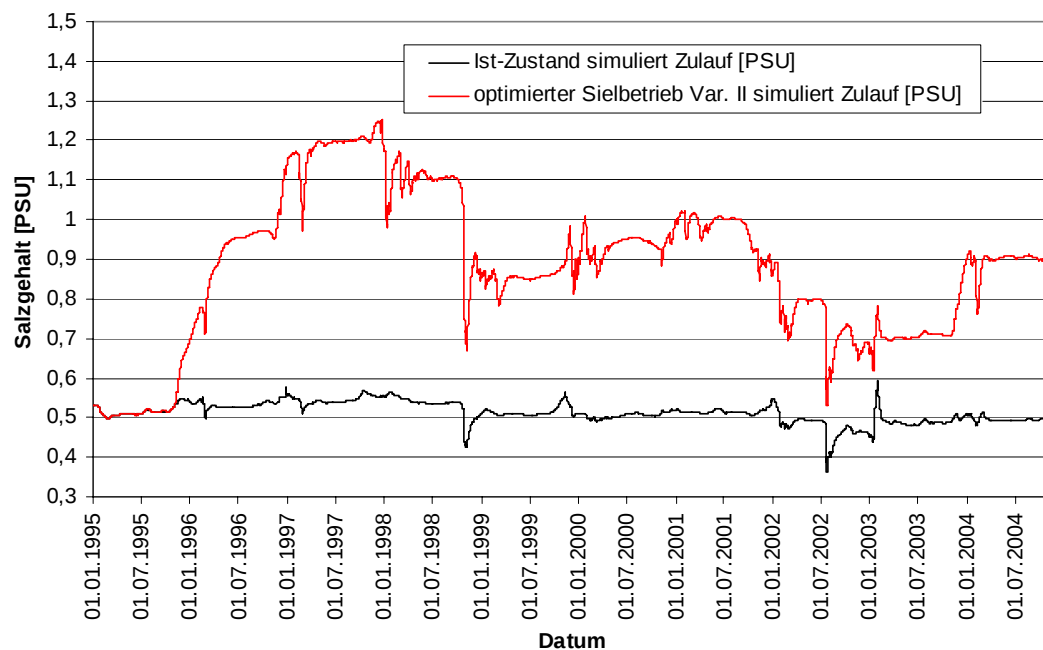


Abb.-A. 22: Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (Zulauf) und Ist-Zustand (Zulauf) (Hemmelsdorfer See)

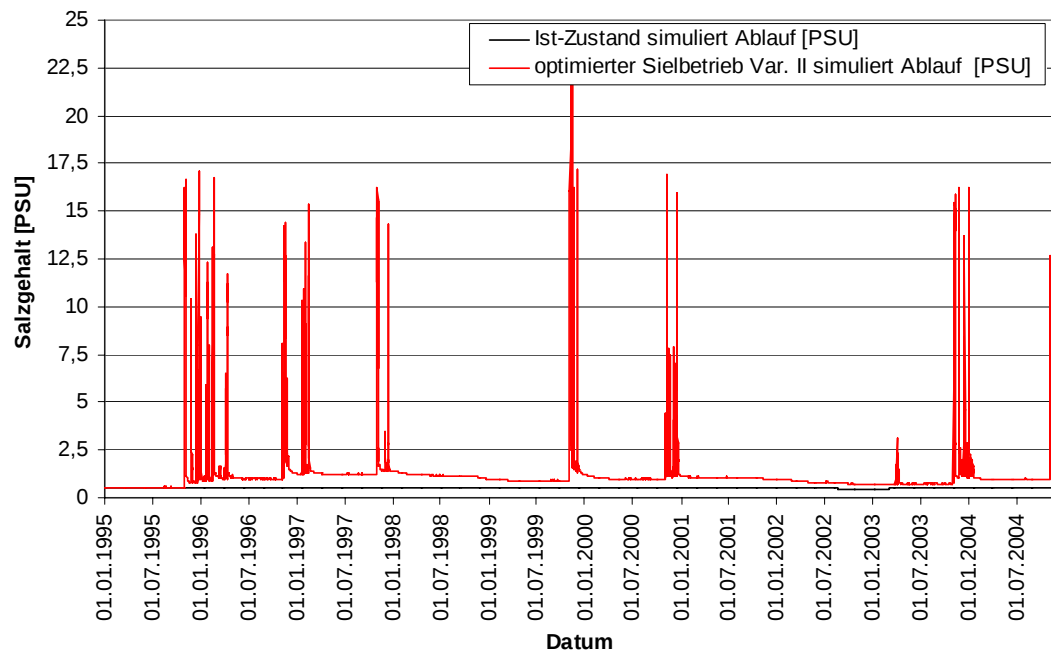


Abb.-A. 23: Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (Ablauf) und Ist-Zustand (Ablauf) (Hemmelsdorfer See)

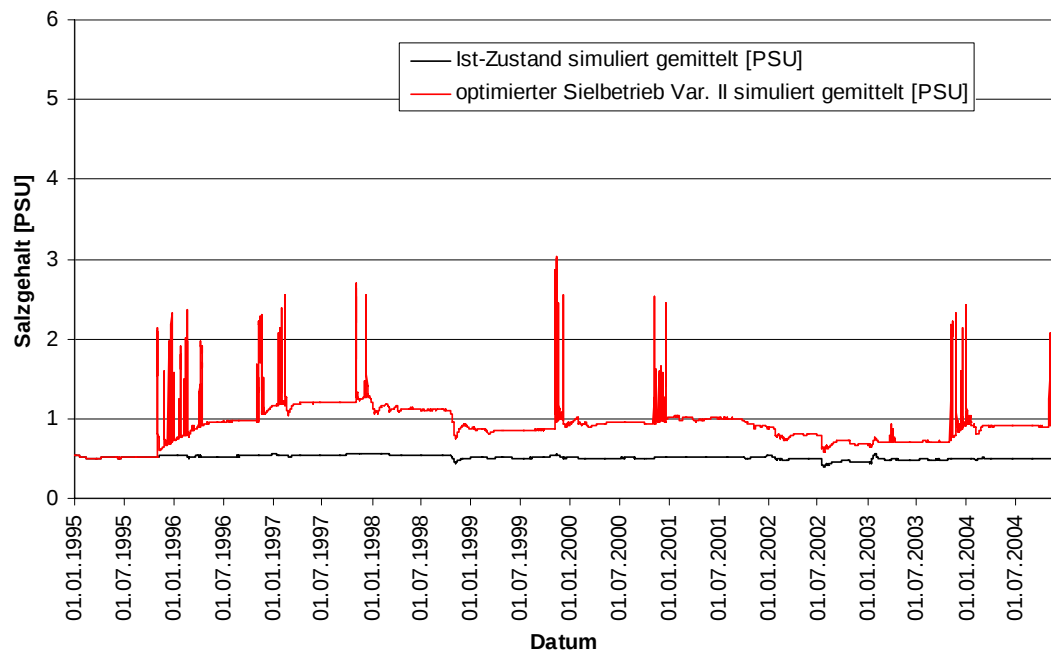


Abb.-A. 24: Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (gemittelt) und Ist-Zustand (gemittelt) (Hemmelsdorfer See)



10.3 Anlagen Neustädter Binnenwasser

10.3.1 Salzgehalt Ist-Zustand

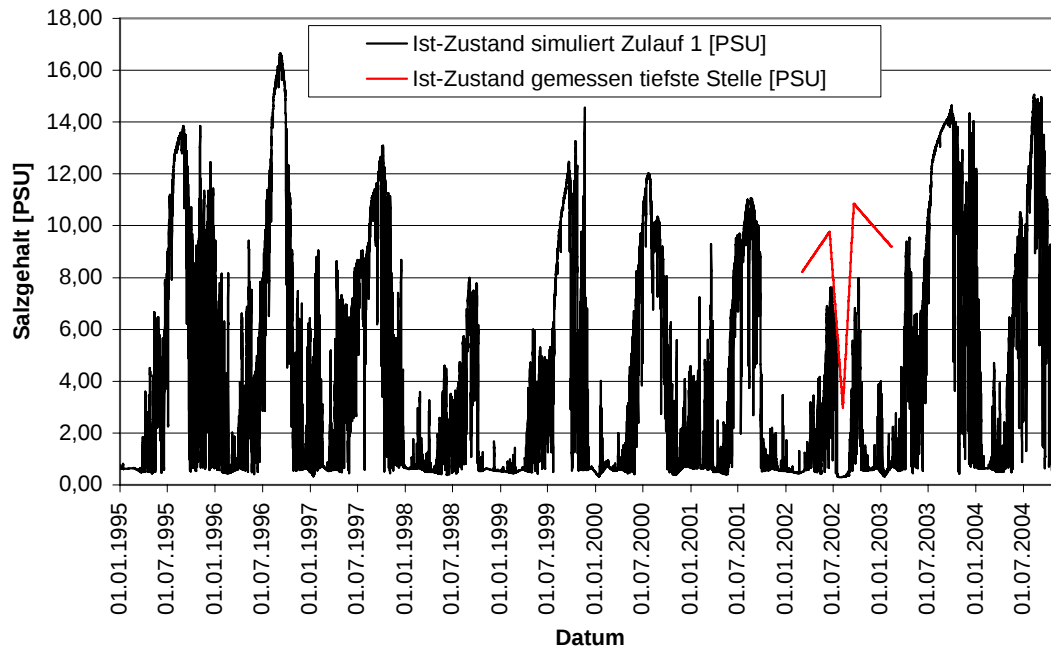


Abb.-A. 25: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (Zulauf 1) und gemessen (tiefste Stelle) (Neustädter Binnenwasser)

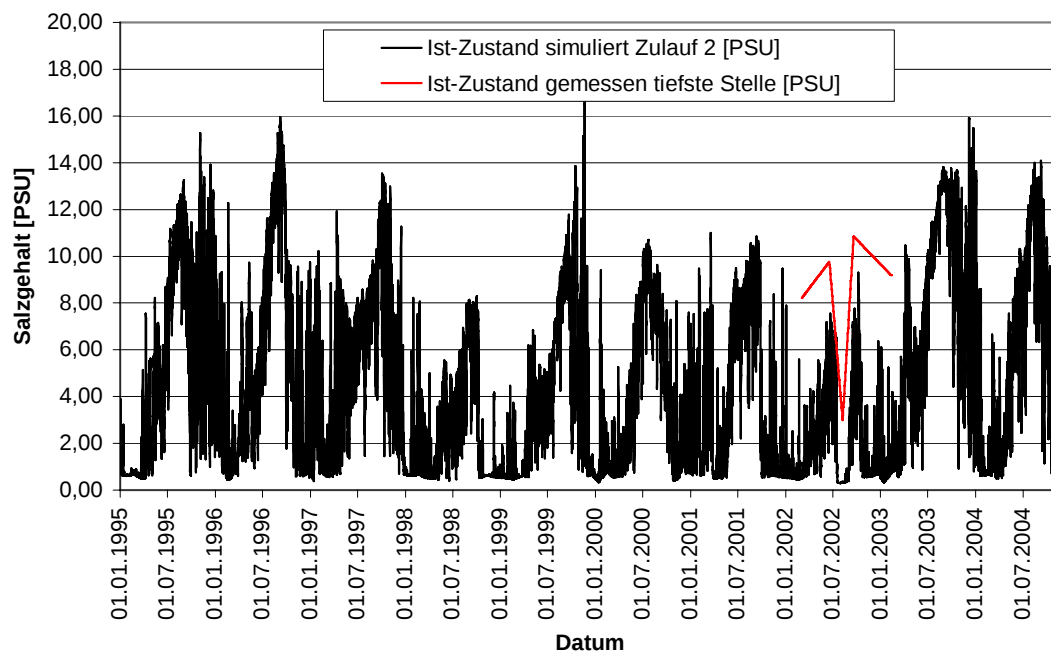


Abb.-A. 26: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (Zulauf 2) und gemessen (tiefste Stelle) (Neustädter Binnenwasser)

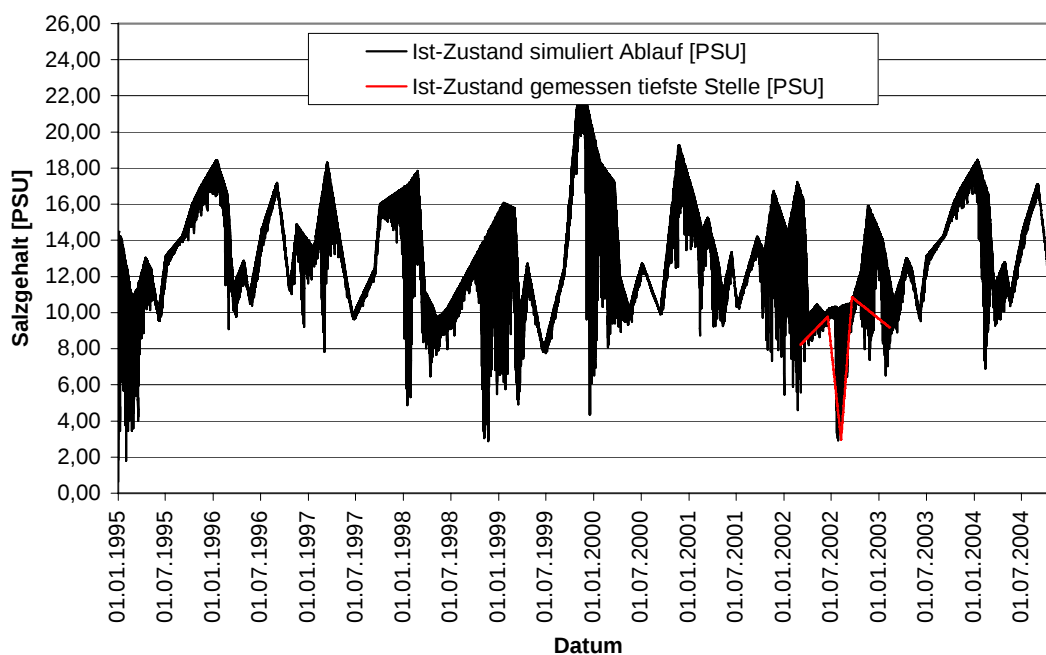


Abb.-A. 27: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (Ablauf) und gemessen (tiefste Stelle) (Neustädter Binnenwasser)

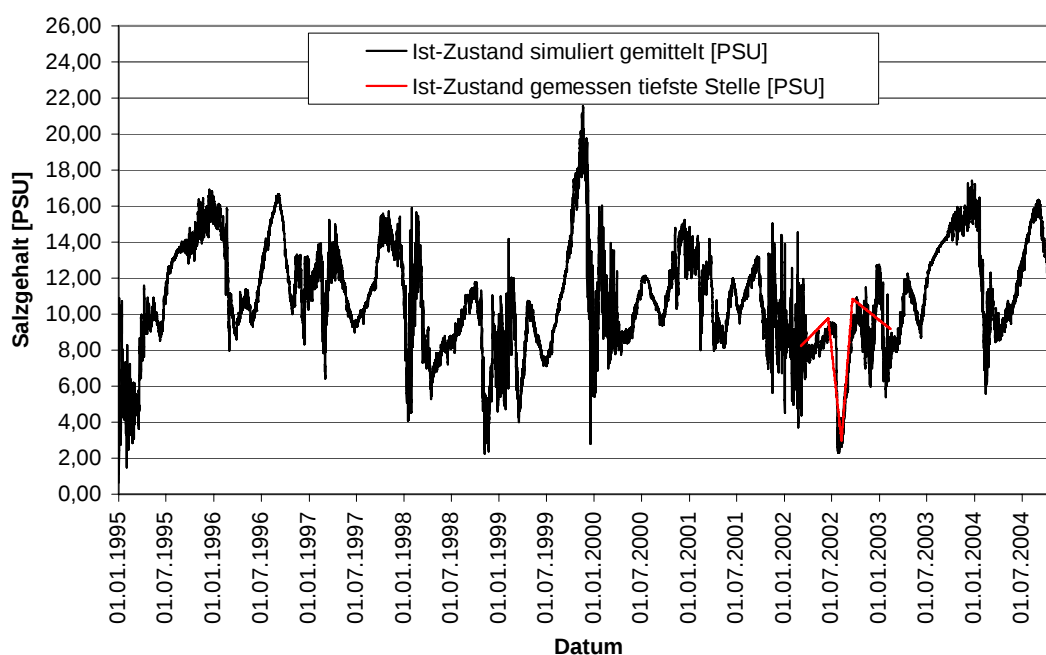


Abb.-A. 28: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (gemittelt) und gemessen (tiefste Stelle) (Neustädter Binnenwasser)



10.4 Anlagen Schwansener See

10.4.1 Salzgehalt Ist-Zustand

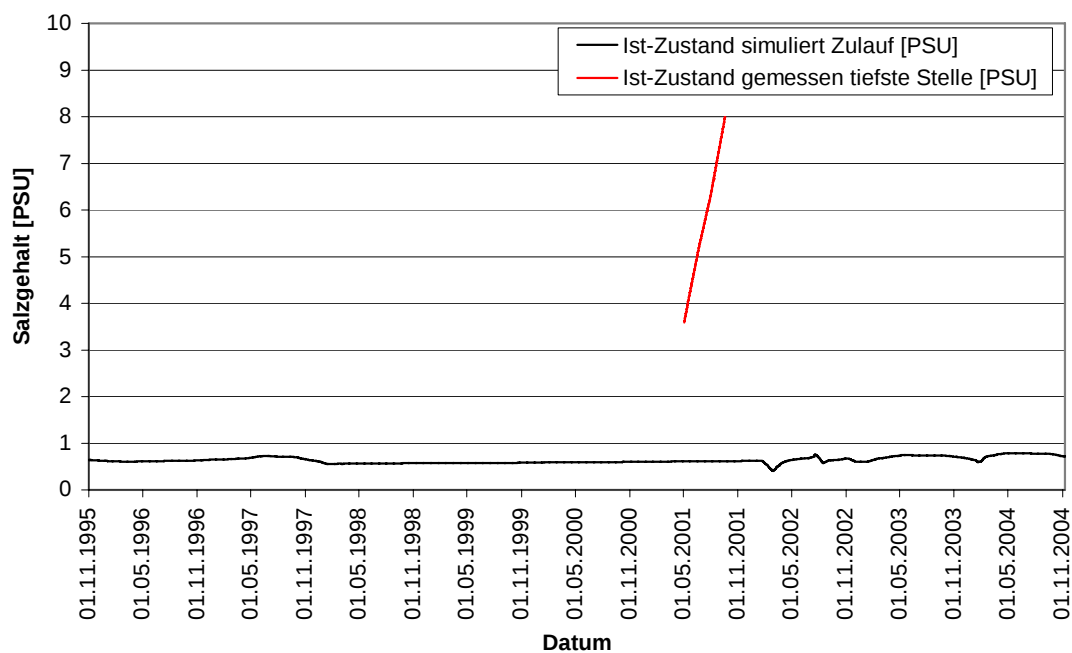


Abb.-A. 29: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (Zulauf) und gemessen (tiefste Stelle) (Schwansener See)

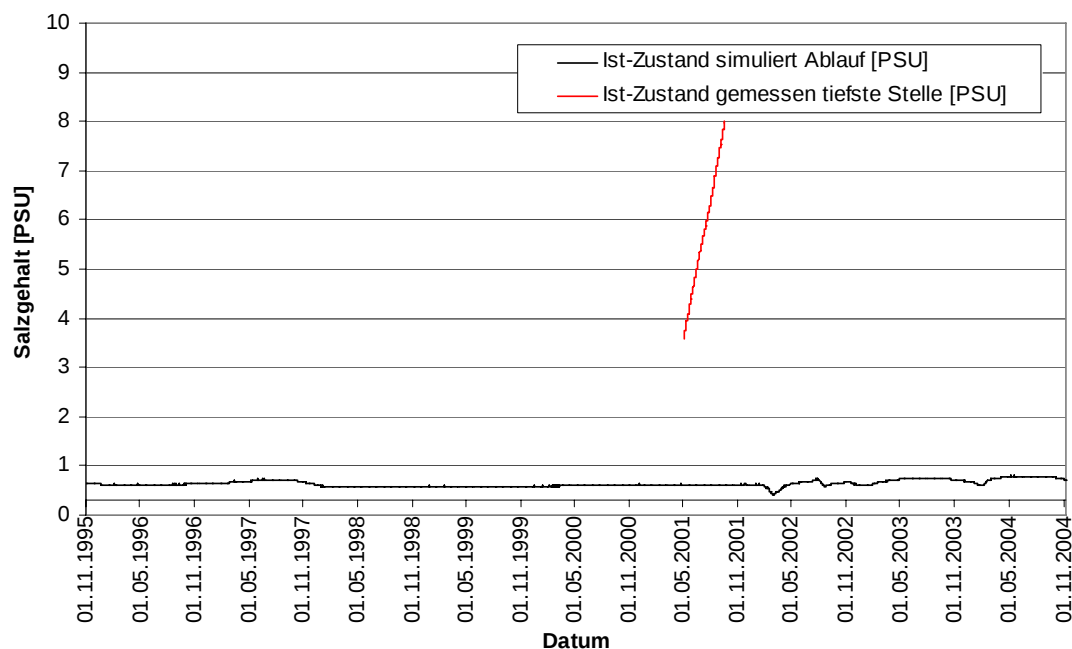


Abb.-A. 30: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (Ablauf) und gemessen (tiefste Stelle) (Schwansener See)

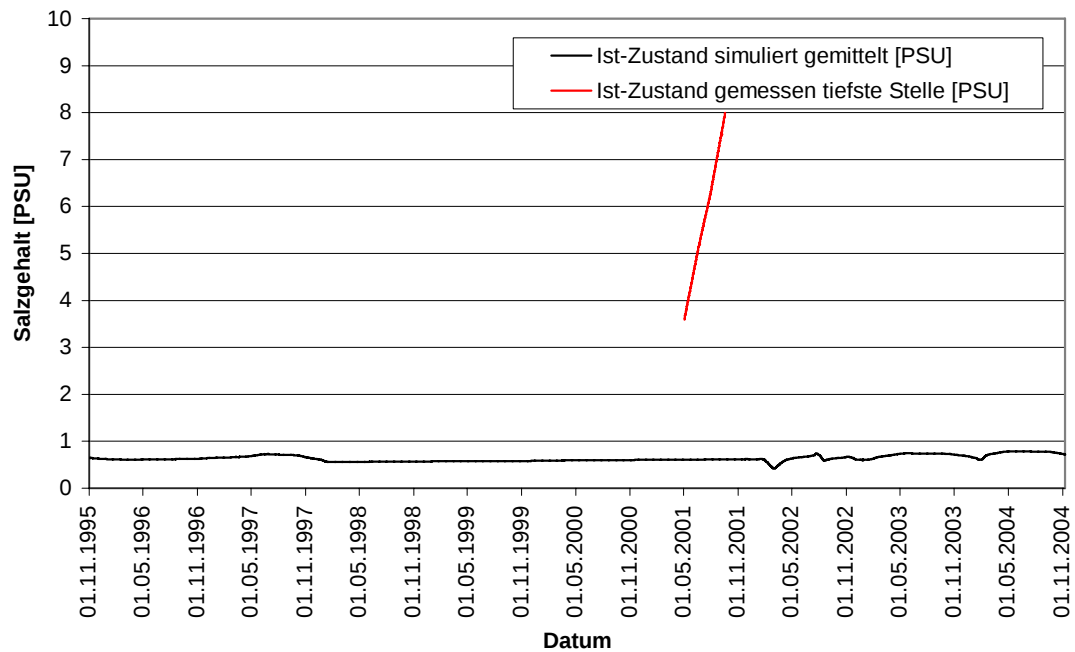


Abb.-A. 31: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (gemittelt) und gemessen (tiefste Stelle) (Schwansener See)

10.4.2 Salzgehalt ungestörter Zustand

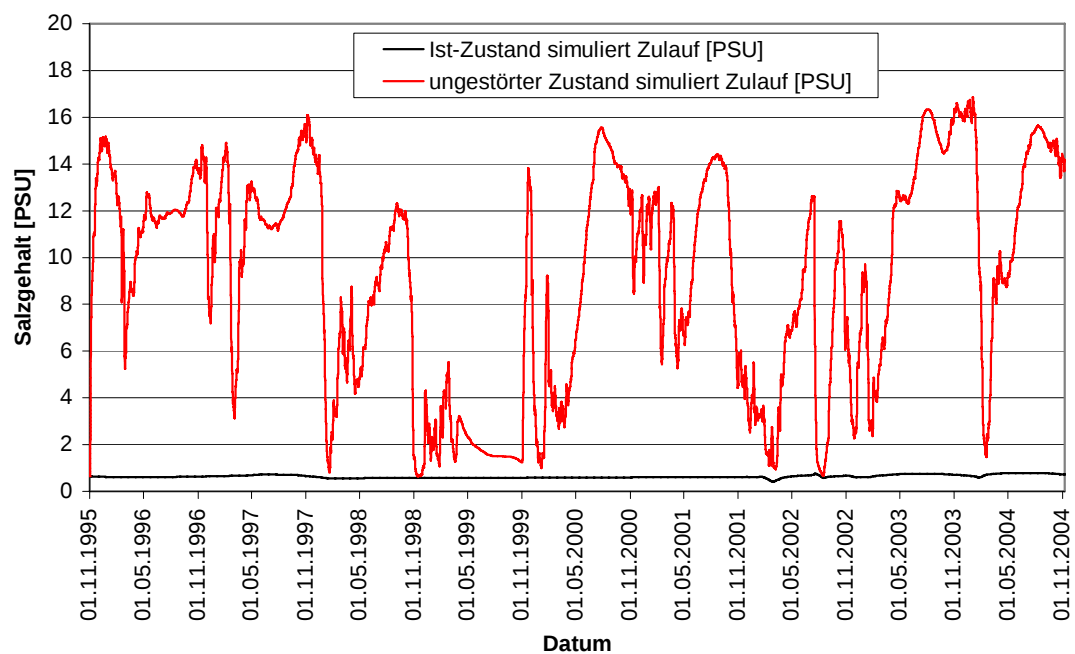


Abb.-A. 32: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand (Zulauf) und ungestörter Zustand (Zulauf) (Schwansener See)

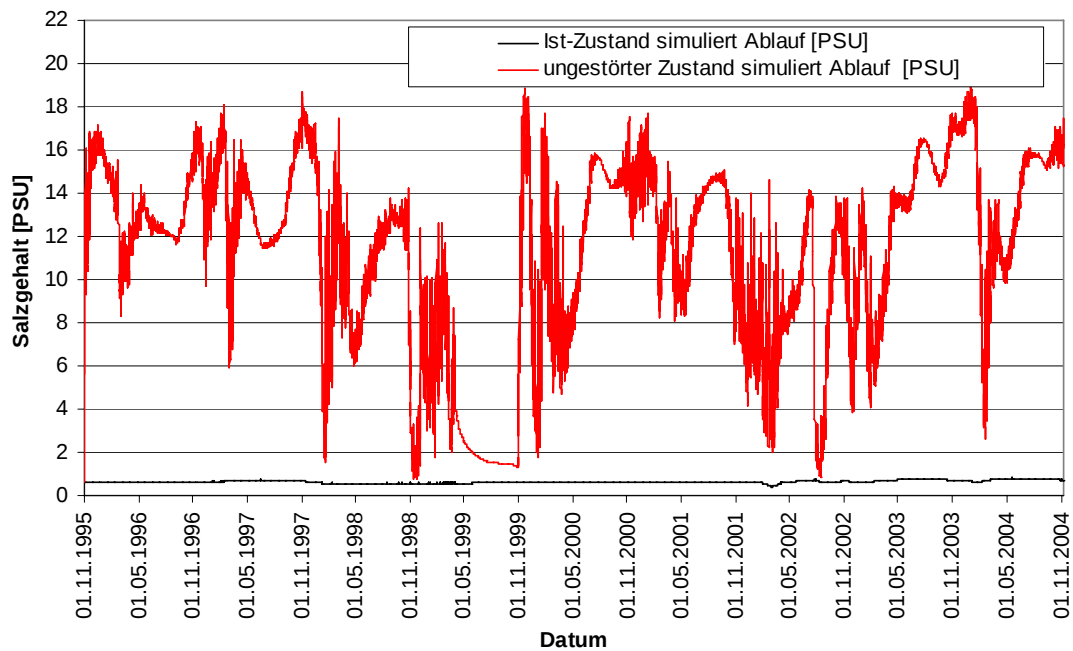


Abb.-A. 33: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand (Ablauf) und ungestörter Zustand (Ablauf) (Schwansener See)

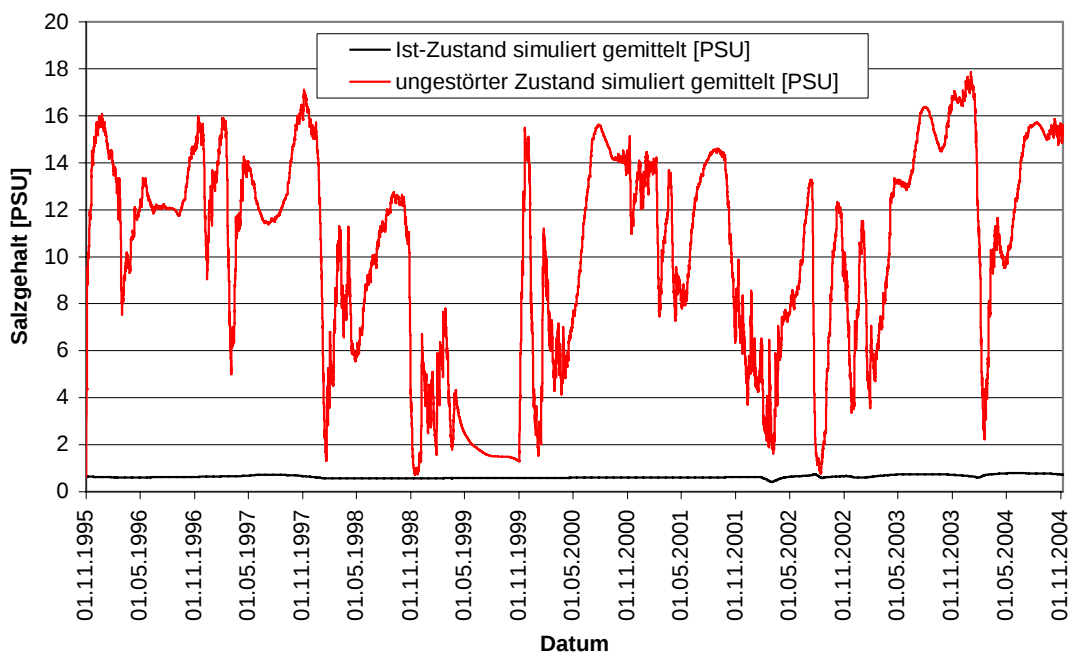


Abb.-A. 34: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand (gemittelt) und ungestörter Zustand (gemittelt) (Schwansener See)

10.4.3 Salzgehalt Optimierung Var. I

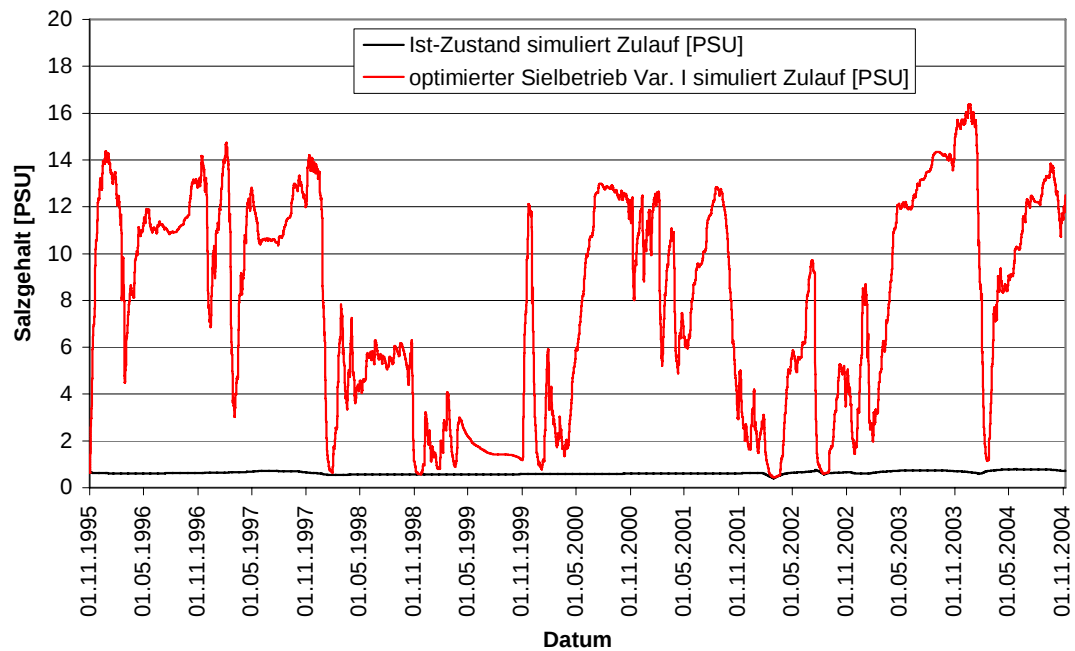


Abb.-A. 35: Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (Zulauf) und Ist-Zustand (Zulauf) (Schwansener See)

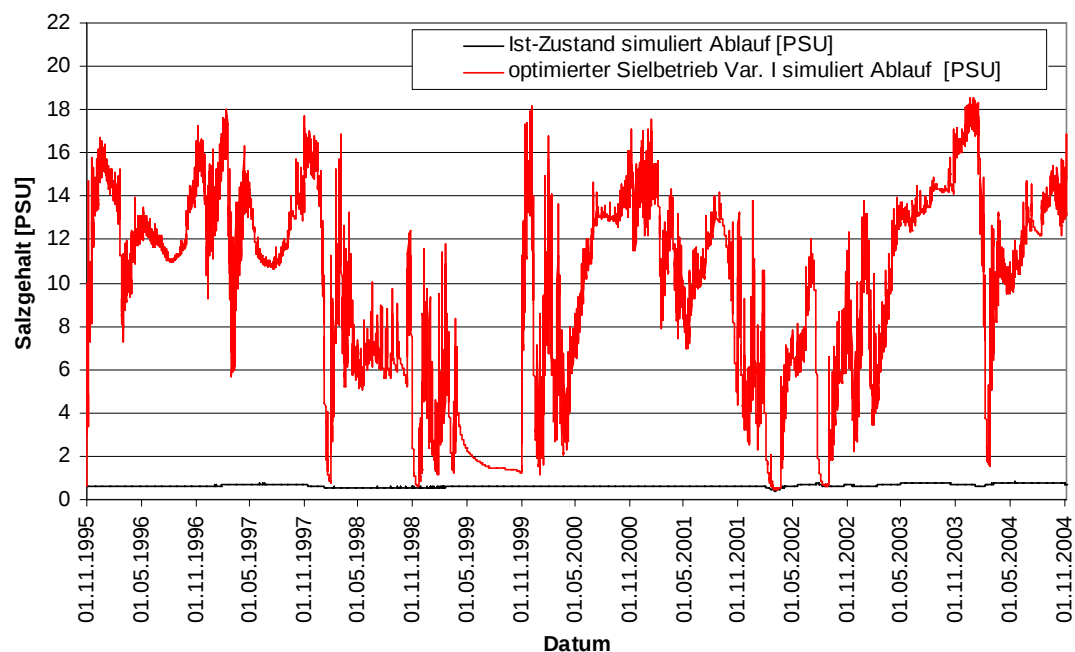


Abb.-A. 36: Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (Ablauf) und Ist-Zustand (Ablauf) (Schwansener See)

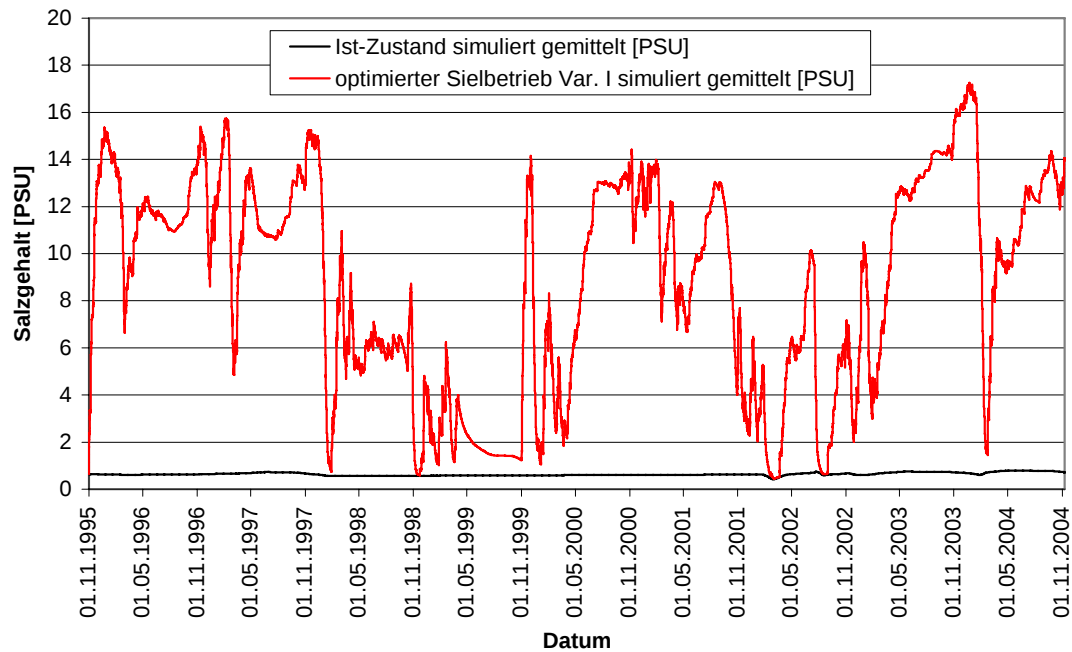


Abb.-A. 37: Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (gemittelt) und Ist-Zustand (gemittelt) (Schwansener See)

10.4.4 Salzgehalt Optimierung Var. II

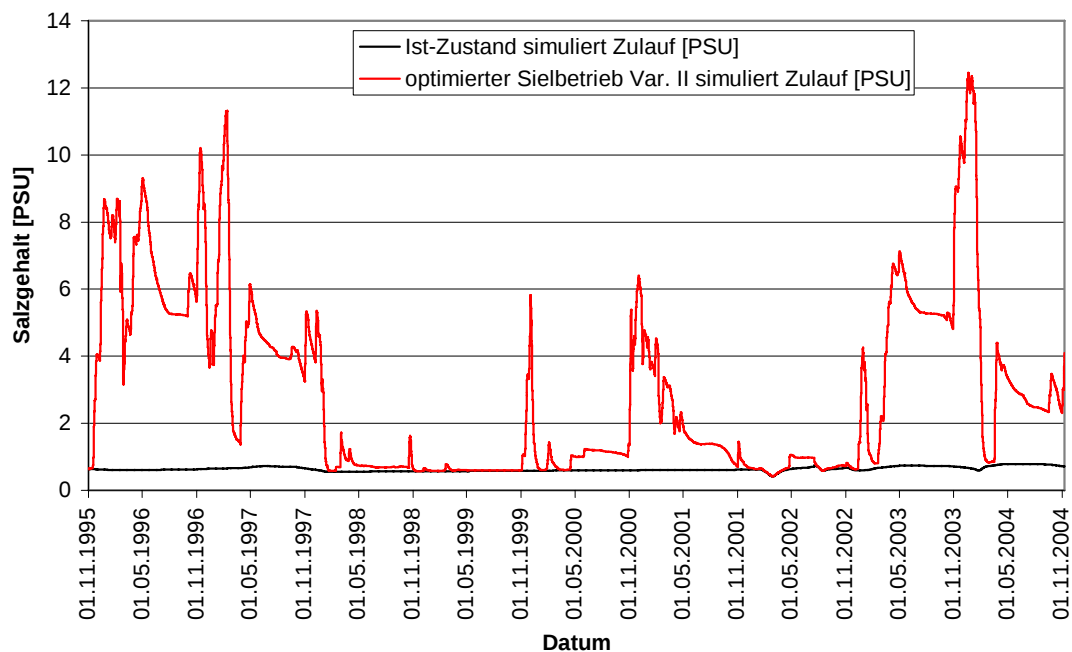


Abb.-A. 38: Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (Zulauf) und Ist-Zustand (Zulauf) (Schwansener See)

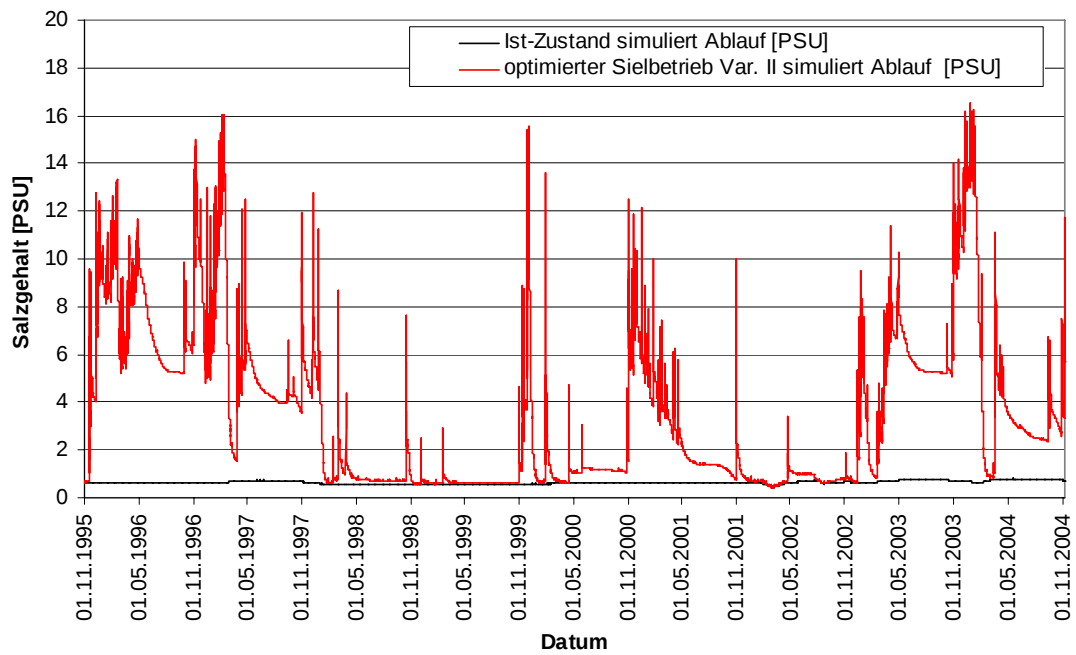


Abb.-A. 39: Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (Ablauf) und Ist-Zustand (Ablauf) (Schwansener See)

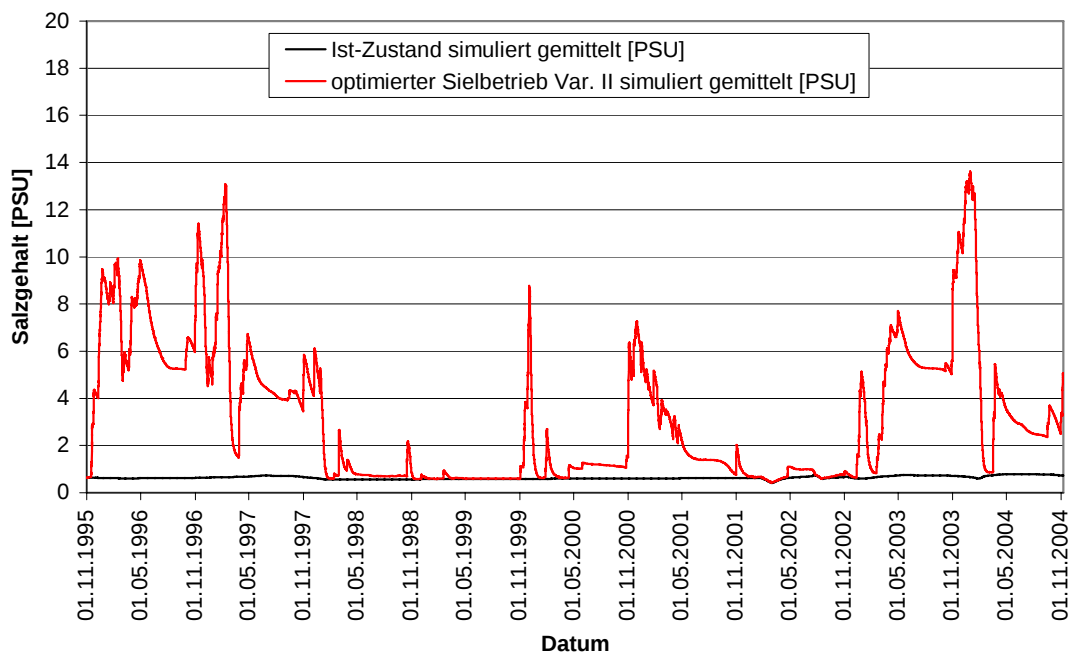


Abb.-A. 40: Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (gemittelt) und Ist-Zustand (gemittelt) (Schwansener See)



10.5 Anlagen Sehlendorfer See

10.5.1 Salzgehalt Ist-Zustand

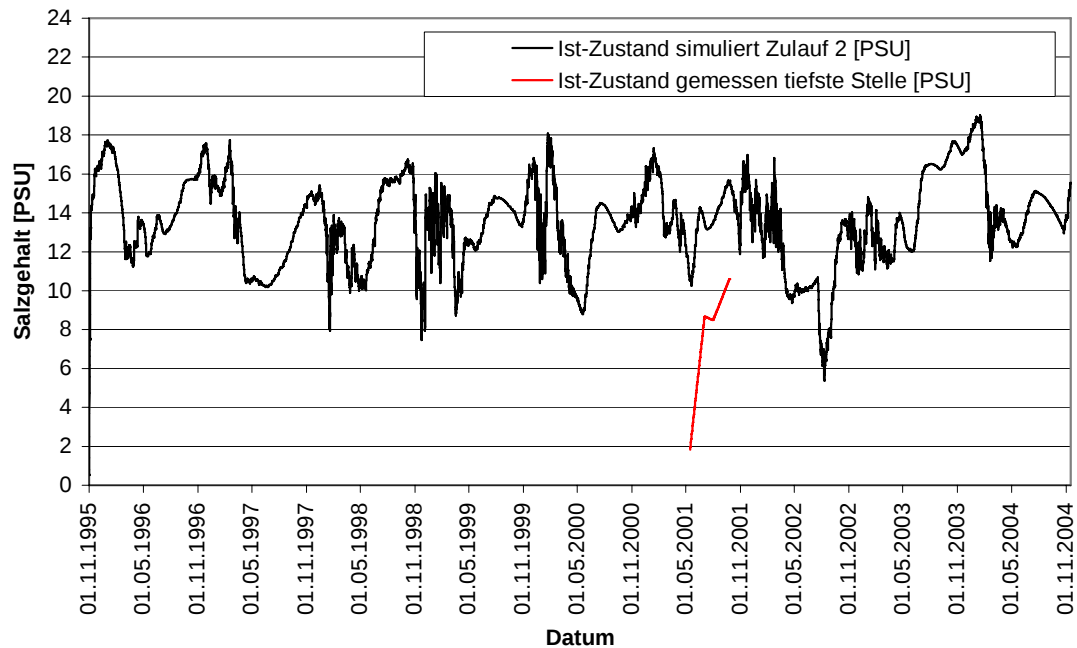


Abb.-A. 41: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (Zulauf 2) und gemessen (tiefste Stelle) (Sehlendorfer See)

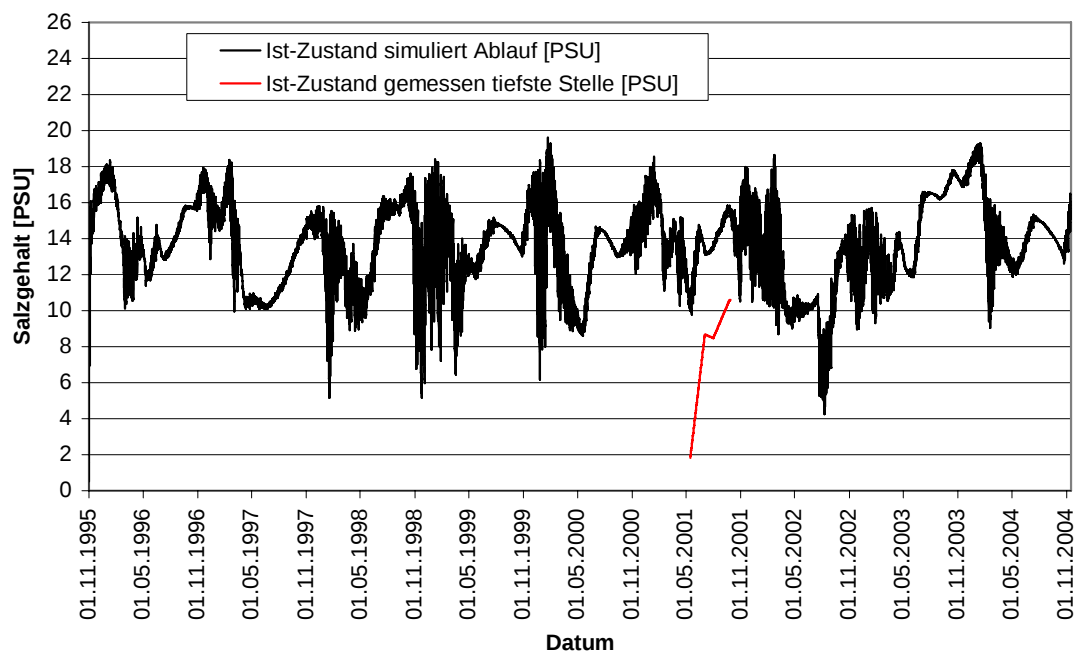


Abb.-A. 42: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (Ablauf) und gemessen (tiefste Stelle) (Sehlendorfer See)

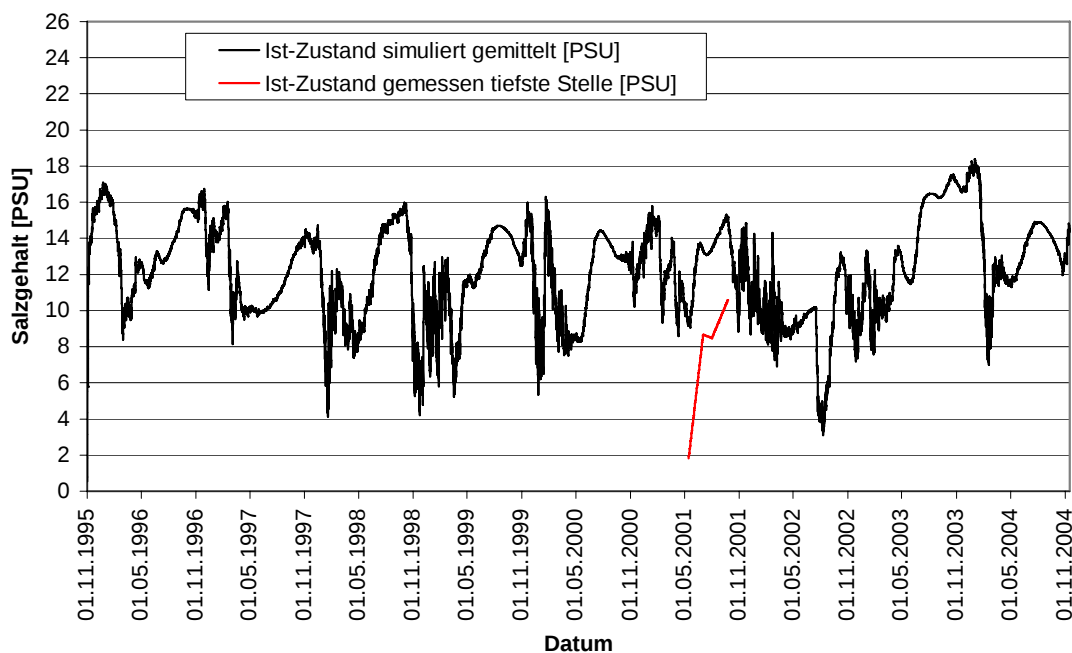


Abb.-A. 43: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (gemittelt) und gemessen (tiefste Stelle) (Sehlendorfer See)

10.6 Anlagen Windebyer Noor

10.6.1 Salzgehalt Ist-Zustand

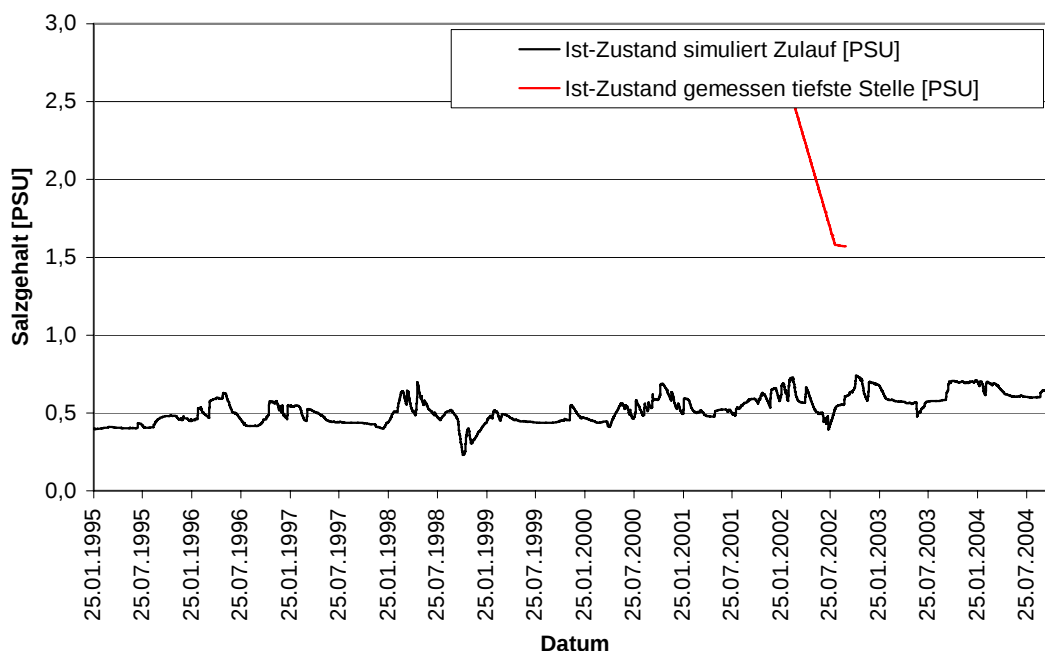


Abb.-A. 44: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (Zulauf) und gemessen (tiefste Stelle) (Windebyer Noor)

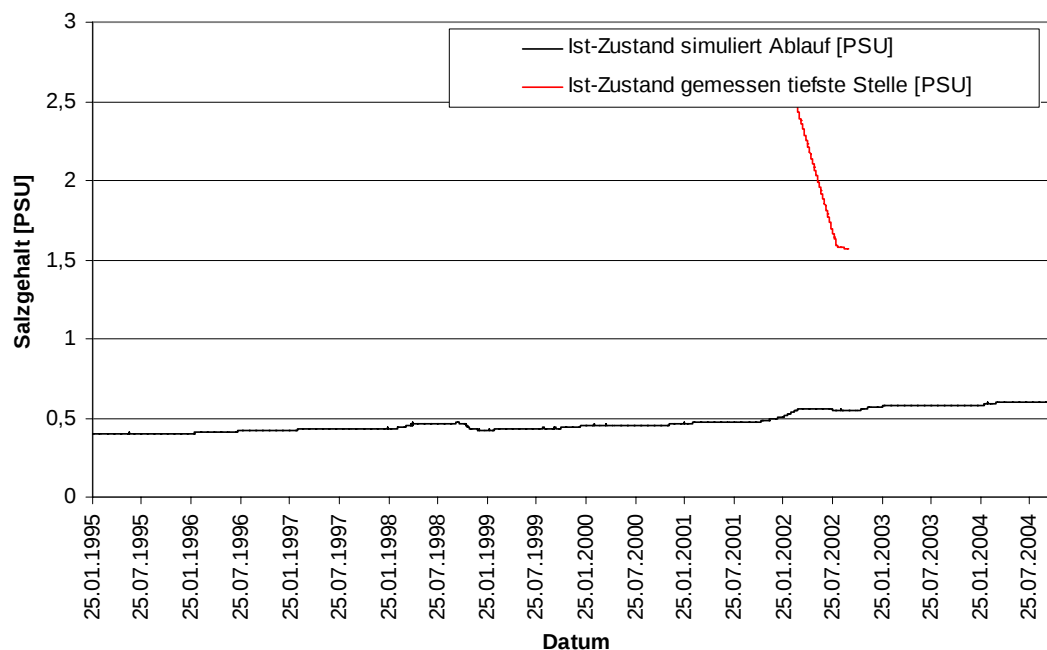


Abb.-A. 45: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (Ablauf) und gemessen (tiefste Stelle) (Windebyer Noor)

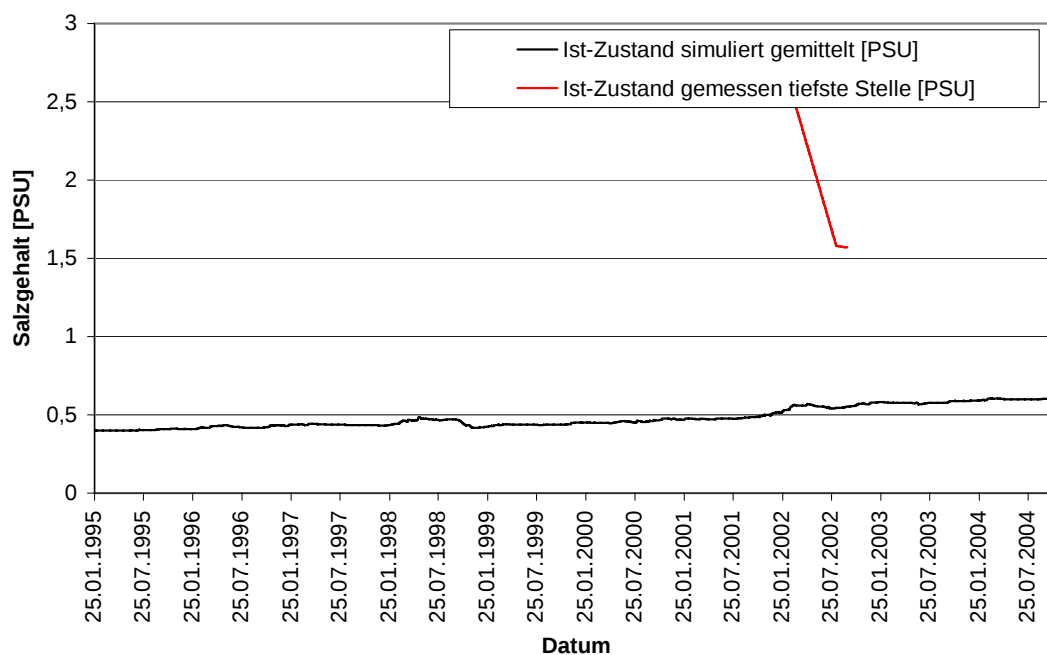


Abb.-A. 46: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand simuliert (gemittelt) und gemessen (tiefste Stelle) (Windebyer Noor)

10.6.2 Salzgehalt ungestörter Zustand

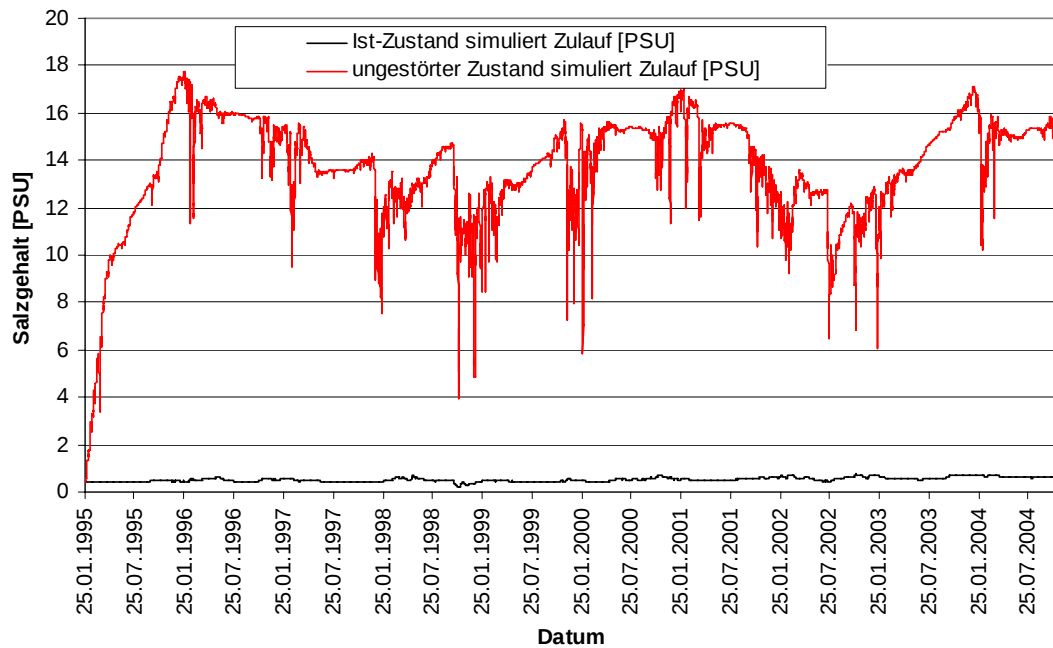


Abb.-A. 47: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand (Zulauf) und ungestörter Zustand (Zulauf) (Windebyer Noor)

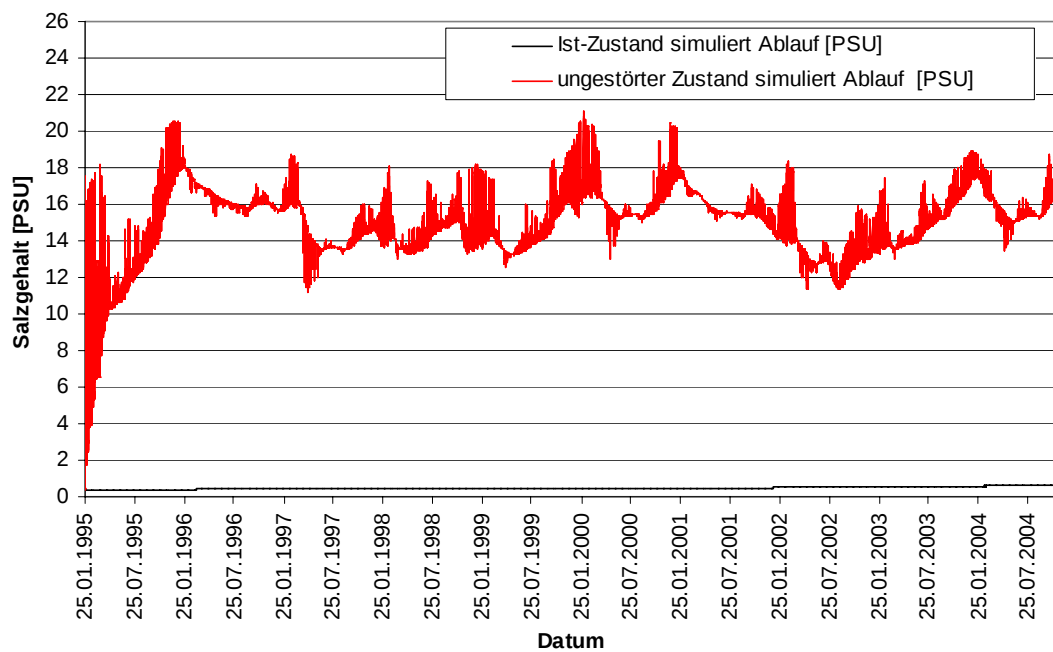


Abb.-A. 48: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand (Ablauf) und ungestörter Zustand (Ablauf) (Windebyer Noor)

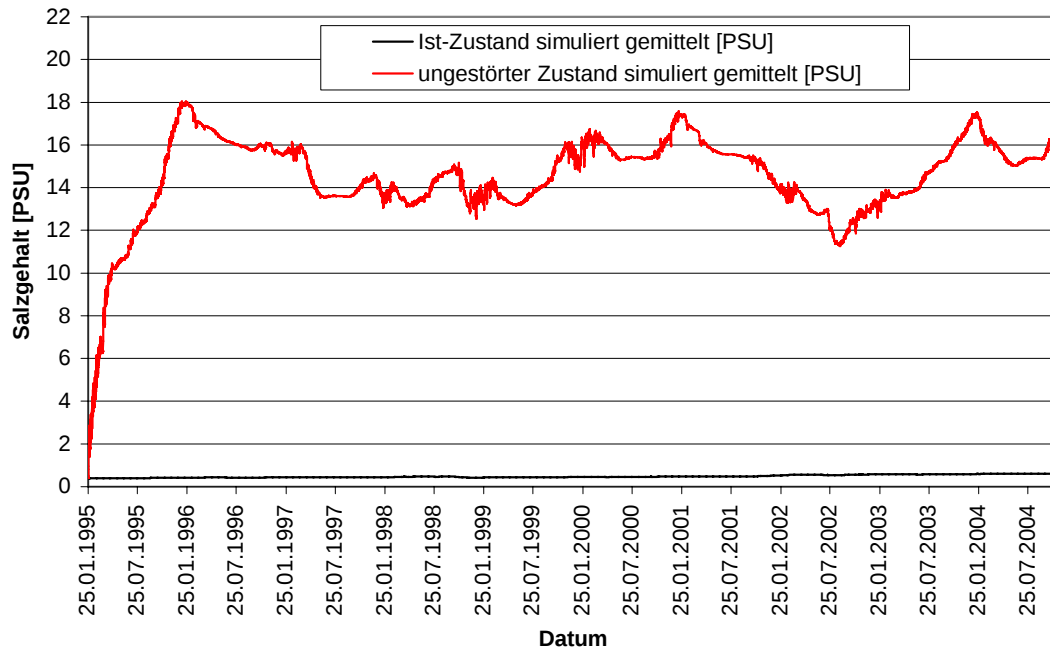


Abb.-A. 49: Vergleich Salzgehalte Ist-Zustand (gemittelt) und ungestörter Zustand (gemittelt) (Windebyer Noor)

10.6.3 Salzgehalt Optimierung Var. I

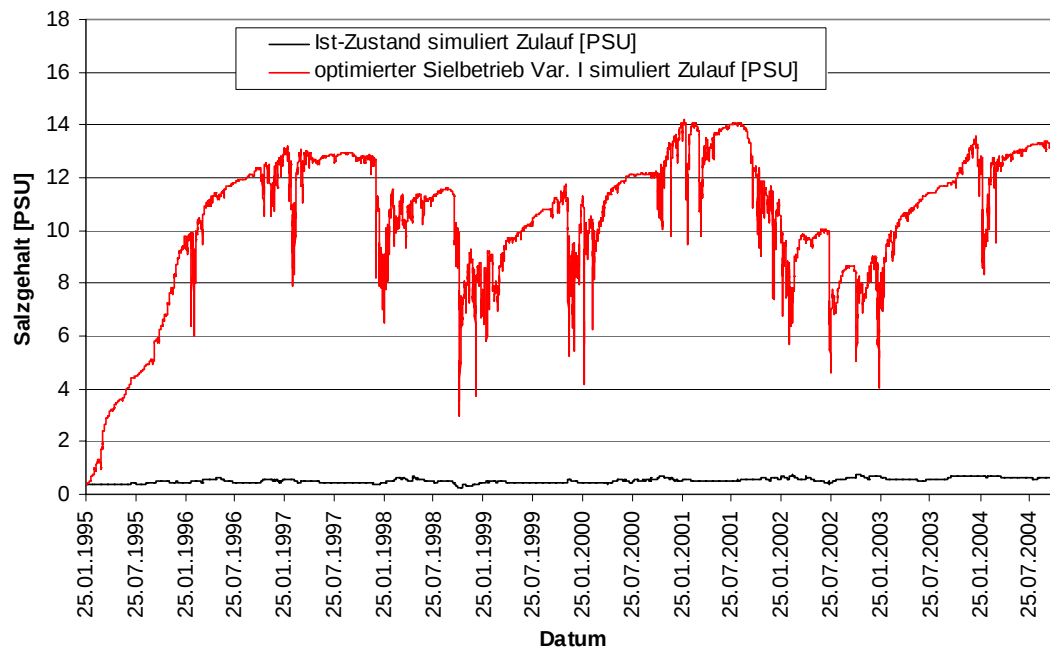


Abb.-A. 50: Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (Zulauf) und Ist-Zustand (Zulauf) (Windebyer Noor)

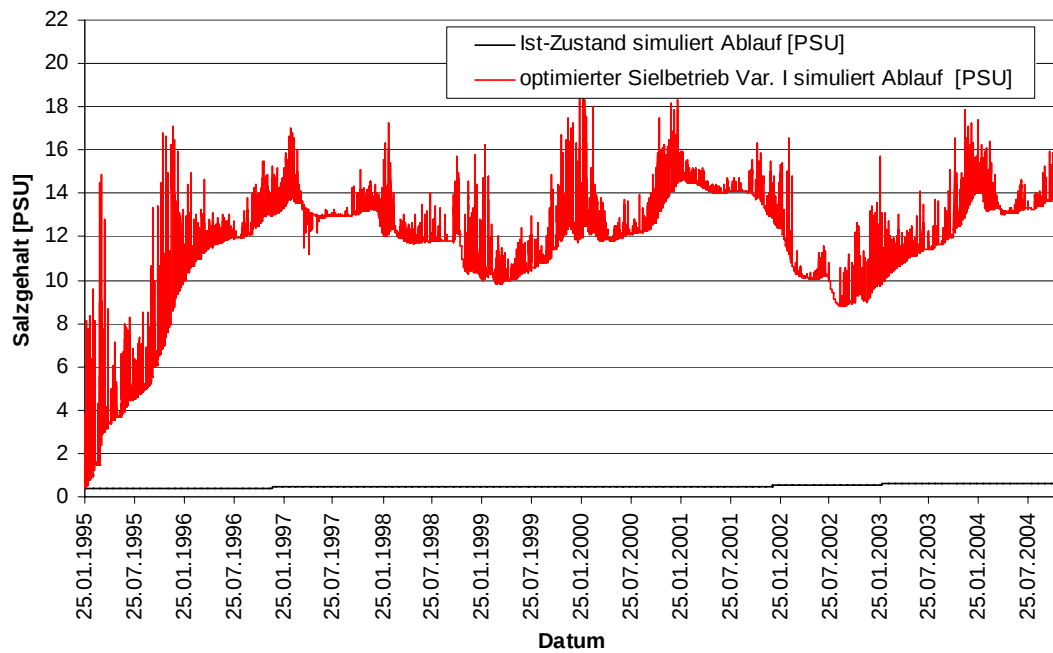


Abb.-A. 51: Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (Ablauf) und Ist-Zustand (Ablauf) (Windebyer Noor)

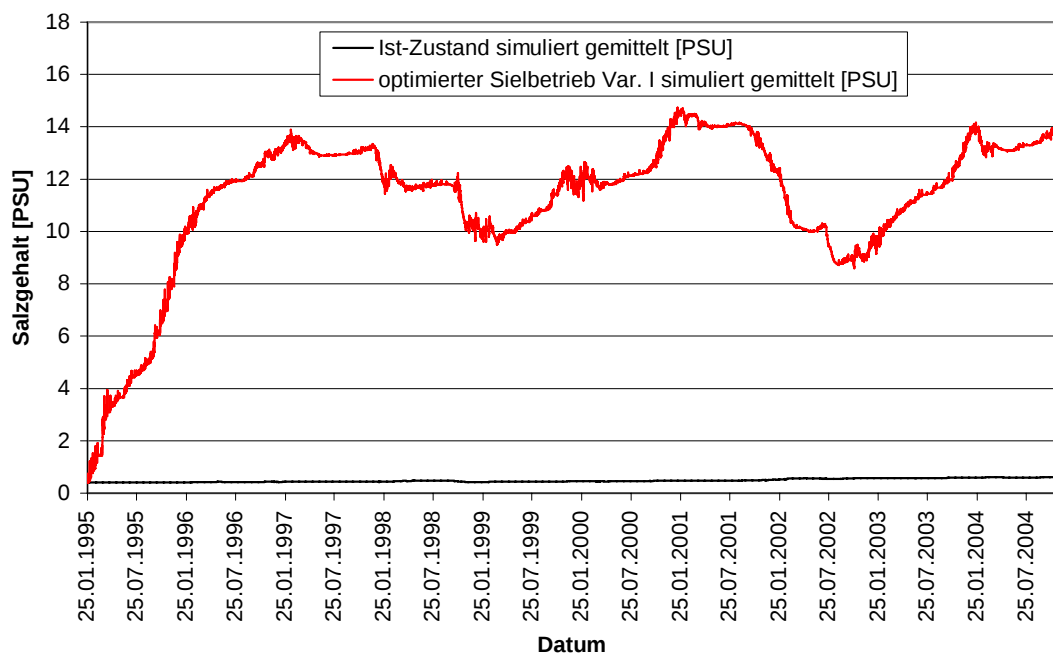


Abb.-A. 52: Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. I (gemittelt) und Ist-Zustand (gemittelt) (Windebyer Noor)



10.6.4 Salzgehalt Optimierung Var. II

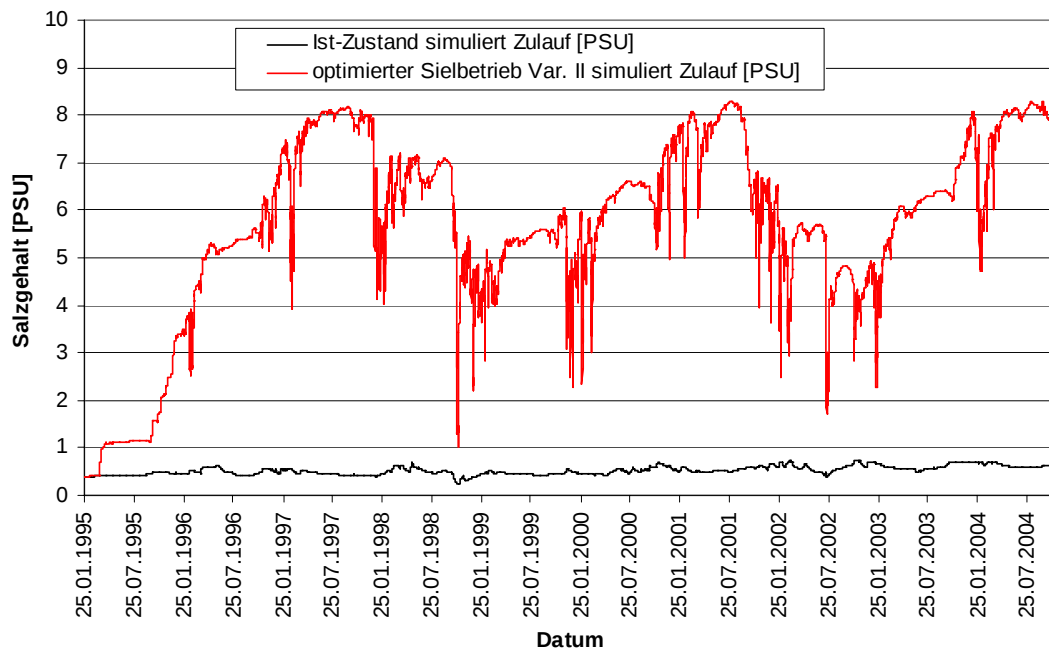


Abb.-A. 53: Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (Zulauf) und Ist-Zustand (Zulauf) (Windebyer Noor)

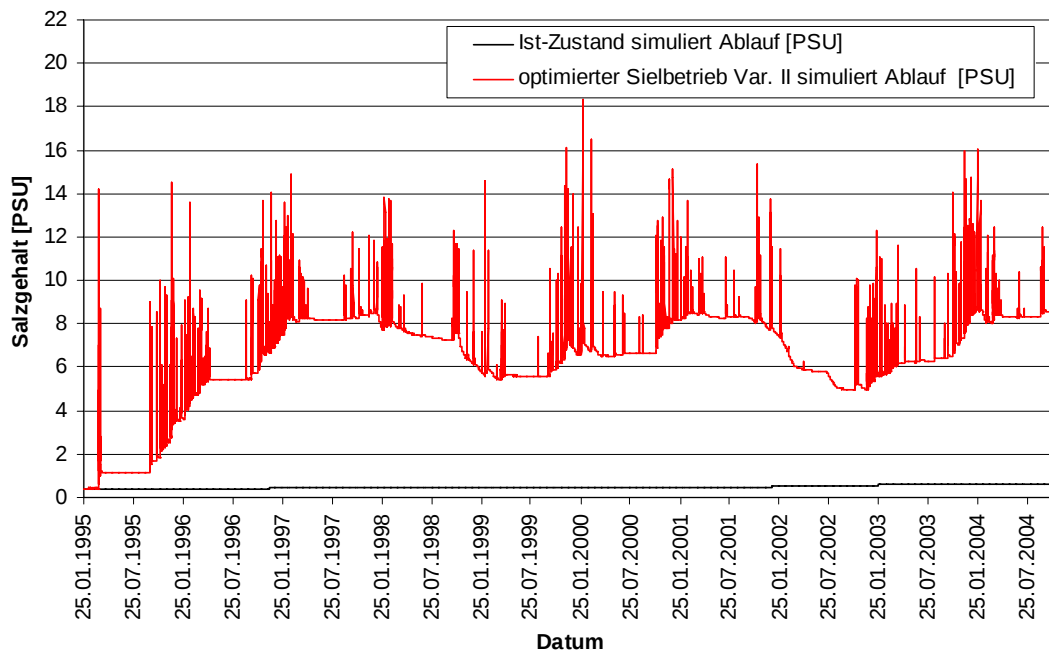


Abb.-A. 54: Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (Ablauf) und Ist-Zustand (Ablauf) (Windebyer Noor)

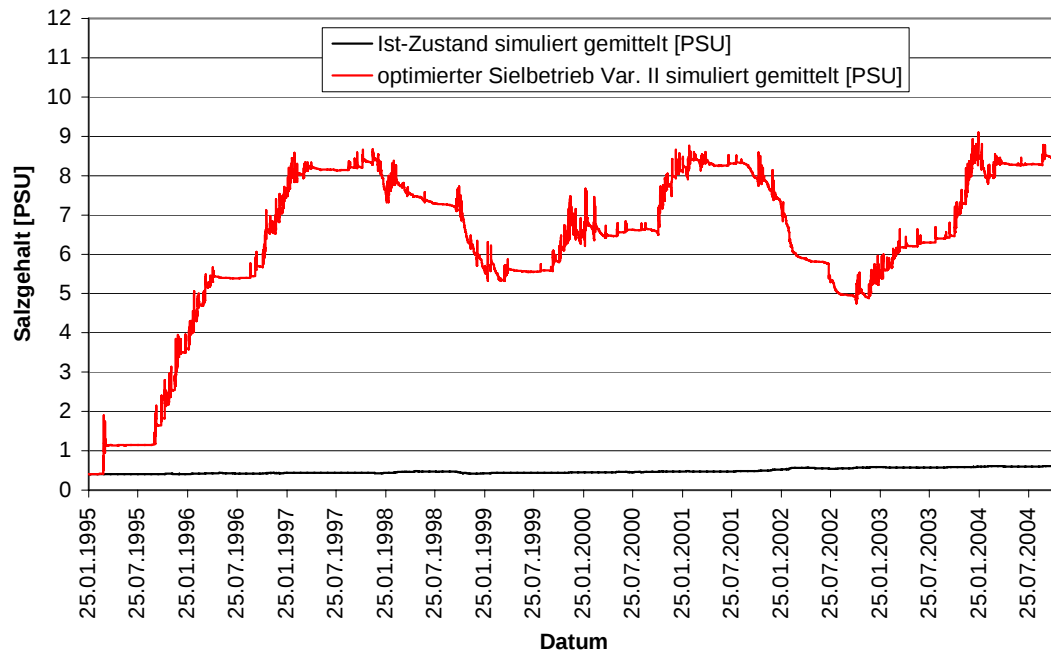


Abb.-A. 55: Vergleich Salzgehalte optimierter Sielbetrieb Var. II (gemittelt) und Ist-Zustand (gemittelt) (Windebyer Noor)