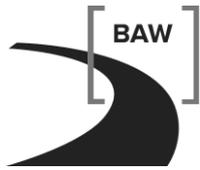


Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

Regionale Infrastrukturmaßnahme Ems

**Stellungnahme der BAW
zur befristeten Aufhebung
von Nebenbestimmungen
für Staufälle im Herbst**



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

Regionale Infrastrukturmaßnahme Ems

Stellungnahme der BAW

Auftraggeber: Landkreis Emsland

Auftrag vom: , Az.:

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. A3955 03 10220

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich
Referat: Ästuarsysteme II (K3)
Bearbeiter: Dipl.-Ing. (FH) J. Jürges,
Dipl.-Geol. F. Hesser

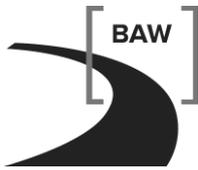
Hamburg, im Juli 2014

Die Stellungnahme darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2	Unterlagen und Daten	1
3	Anfangs- und Randwerte	1
3.1	Anfangswerte des Salzgehalts	1
3.2	Anfangswasserstand	3
3.3	Randwerte Pumpen	3
3.4	Randwerte Oberwasserzufluss	3
3.5	Wassertiefe Unterems	3
4	Ergebnisse zum Vordringen der Brackwasserzone	4
4.1	Einfluss der unterschiedlichen Anfangswerte des Salzgehalts auf den bodennahen Stromauftransport während eines Staufalls	4
4.2	Szenario 2009	7
5	Eintrittswahrscheinlichkeit des worst-case-Szenarios	13
5.1	Betrachtung der zugrundeliegenden Daten	13
5.1.1	Oberwasserzufluss bei Versen	13
5.1.2	Tidehochwasser bei Pogum	13
5.1.3	Maximaler Salzgehalt bei Leerort	14
5.2	Eintrittswahrscheinlichkeit für die Anfangs- und Randwerte des verwendeten worst-case-Szenarios	14
5.2.1	Eintrittswahrscheinlichkeit des Tidehochwassers	15
5.2.2	Eintrittswahrscheinlichkeit von Oberwasserzufluss und Salzgehalt	16
6	Zusammenfassung	21
7	Literaturverzeichnis	23

Bildverzeichnis	Seite
Bild 1: Salz-Anfangsverteilung in der Stauhaltung zw. Emssperrwerk und Herbrum	6
Bild 2: Salzgehalts-Verteilung in der Stauhaltung zw. Emssperrwerk und Herbrum	7
Bild 3: Szenario 2009: Berechneter Wasserstand	9
Bild 4: Szenario 2009: Berechneter Salzgehalt	10
Bild 5: Szenario 2009: Berechneter Salzgehalt für oberflächennahe Schichten	11
Bild 6: Histogramm und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen des Tidehochwassers	16
Bild 7: Kumulierte Wahrscheinlichkeit des Tidehochwassers bei Pogum	16
Bild 8: Max. Salzgehalt bei Leerort über Oberwasserzufluss Versen	17
Bild 9: Max. Salzgehalt bei Leerort über Oberwasserzufl. Versen nach Logarithmierung	18
Bild 10: Häufigkeitsverteilung und Dichtefunktion von max. Salzgehalt und OWZ	19
Bild 11: Dreidimensionale Darstellung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion	20
Bild 12: Integrierte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Messwertpaare	21

Tabellenverzeichnis	Seite
Tabelle 1: Anfangswerte des Salzgehalts für das worst-case-Szenario 2009	2
Tabelle 2: Anfangswerte des Salzgehalts für das worst-case-Szenario 2011/2013	2
Tabelle 3: Anfangswasserstand gemäß MSpThw – 10 cm	3
Tabelle 4: Zeitlicher Ablauf des Staufalls für Szenario 2009	8
Tabelle 5: Korrelation Oberwasserzufluss, Tidehochwasser und maximaler Salzgehalt	14



1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Der Landkreis Emsland beabsichtigt zu beantragen, dass folgende Nebenbestimmungen des Planfeststellungsbeschlusses vom 14. August 1998 (in seiner derzeitigen Fassung) zum Emssperrwerk befristet aufzuheben sind:

- Nebenbestimmung A.II.2.2.2b zum Salzgehalt in der Stauhaltung
- Nebenbestimmung A.II.2.2.1 zum Sauerstoff in der Stauhaltung

Die BAW ist hierzu vom Landkreis Emsland beauftragt worden, zu folgenden Punkten Stellung zu nehmen:

- Die Aussetzung von Nebenbestimmungen soll für den Zeitraum 16.09. – 15.11. eines jeden Jahres mit einem Befristungszeitraum von 10 Jahren betrachtet werden.
- Aufbauend auf bisherigen Arbeiten der BAW ist, den o.g. Zeitraum betreffend, ein worst-case zu Salinitätsveränderungen in der Stauhaltung während eines Staufalls zu modellieren.
- Eine statistische Untersuchung muss die Eintrittswahrscheinlichkeit des worst-case ermitteln.

2 Unterlagen und Daten

Salzgehaltszeitreihen vom NLWKN für Gandersum, Terborg, Leerort Leer Leda, Weener und Papenburg sowie die Wasserstandszeitreihe für Gandersum.

Wasserstandszeitreihen aus WISKI (WSA Emden) für Pogum, Terborg, Leerort und Papenburg.

3 Anfangs- und Randwerte

Alle im Folgenden genannten Anfangs- und Randwerte sind mit dem NLWKN abgestimmt worden.

3.1 Anfangswerte des Salzgehalts

Die Anfangswerte des Salzgehalts sind im Sinn einer worst-case-Betrachtung definiert worden. Dazu werden die an den Messpegeln der Unterems maximal aufgetretenen Salzgehalte herangezogen. Drei Situationen in den Jahren 2009, 2011 und 2013 definieren insgesamt zwei worst-case-Szenarios: Erstens der maximale Salzgehalt im September 2009 (s. Tabelle 1) und zweitens das Maximum des maximalen Salzgehalt in den Jahren 2011 und 2013 (s. Tabelle 2). Beiden Anfangswerten gemeinsam ist die Berücksichtigung der prognostizierten

ausbaubedingten Änderungen durch die geplante Vertiefung der Außenems bis Emden: *In der Unterems nimmt der maximale Salzgehalt ab Pogum bis zur oberstromseitigen Grenze der Brackwasserzone zu. Die Zunahme des maximalen Salzgehalts in der Unterems hat ihr Maximum von im Mittel 0,4 PSU zwischen dem Emssperrwerk und Terborg (siehe Zusammenfassung des Gutachtens (BAW 2012b)).*

Pegel	Max. Salzgehalt 2009 [PSU]	Prognostizierte Änderung des maximalen Salzgehalts durch die geplante Vertiefung der Außenems bis Emden [PSU]	Anfangssalzgehalt des worst-case-Szenarios
Gandersum	23,74	+ 0,4	24,14 PSU
Terborg	17,25	+ 0,4	17,65 PSU
Leerort	6,75	+ 0,1	6,85 PSU
Leer/ Leda	3,77	+ 0,1	3,87 PSU
Weener	3,43	+ 0,1	3,53 PSU
Papenburg	0,94		0,94 PSU
Herbrum	0,69		0,69 PSU

Tabelle 1: Anfangswerte des Salzgehalts für das worst-case-Szenario 2009. Die Brackwasserzone reicht nach oberstrom bis zwischen Weener und Papenburg.

Pegel	Max. Salzgehalt [PSU]		Prognostizierte Änderung des maximalen Salzgehalts durch die geplante Vertiefung der Außenems bis Emden [PSU]	Anfangssalzgehalt des worst-case-Szenarios
	2011	2013		
Gandersum	-	22,0	+ 0,4	22,4 PSU
Terborg	-	14,7	+ 0,4	15,1 PSU
Leerort	8,0	7,2	+ 0,1	8,1 PSU
Leer/ Leda	5,7	4,8	+ 0,1	5,8 PSU
Weener	4,7	4,3	+ 0,1	4,8 PSU
Papenburg	2,7	2,8	+ 0,1	2,9 PSU
Herbrum	0,6	0,8		0,8 PSU

Tabelle 2: Anfangswerte des Salzgehalts für das worst-case-Szenario 2011/2013. Diese Werte wurden vom NLWKN vorgegeben. Auf den ersten 10 km ab Emssperrwerk ist der Salzgehalt niedriger als im Szenario 2009, weiter oberstrom ist der Salzgehalt höher. Die Brackwasserzone reicht weiter nach stromauf an Papenburg vorbei bis in den Dortmund-Ems-Kanal hinein.

3.2 Anfangswasserstand

Für diese Stellungnahme ist vom Auftraggeber ein Anfangswasserstand von mittlerem Spring-Tidehochwasser (M_{Sp}Thw) minus 10 cm vorgegeben worden. Mit Bezug zu dem vom WSA Emden für das Jahr 2011 ermittelten M_{Sp}Thw entspricht dies folgenden Wasserständen an den Pegeln der Unterems:

Pegel	M _{Sp} Thw	Anfangswasserstand (M _{Sp} Thw – 10 cm)
Pogum	NHN+1,72 m	NHN+1,62 m
Terborg	NHN+1,84 m	NHN+1,74 m
Leerort	NHN+1,96 m	NHN+1,86 m
Weener	NHN+2,04 m	NHN+1,94 m
Papenburg	NHN+2,09 m	NHN+1,99 m
Rhede	NHN+2,14 m	NHN+2,04 m
Herbrum	NHN+2,16 m	NHN+2,06 m

Tabelle 3: Anfangswasserstand gemäß M_{Sp}Thw – 10 cm. Diese Werte sind unverändert gewählt worden im Vergleich zur Stellungnahme der BAW für eine gehobene wasserrechtliche Erlaubnis zur Überführung von zwei Kreuzfahrtschiffen über die Ems in Verbindung mit zwei Probestaus in der zweiten Septemberhälfte 2012 und 2014 (BAW 2012a) .

3.3 Randwerte Pumpen

Pumpen Emssperrwerk: 90 m³/s (unverändert zur Stellungnahme BAW 2012a) mit einem Salzgehalt von 25 PSU (unverändert zur Stellungnahme BAW 2012a)

Pumpen Ledasperrwerk: 40 m³/s für 14 Stunden (unverändert zur Stellungnahme BAW 2012a) mit einem Salzgehalt von 4 PSU abnehmend auf 1 PSU (unverändert zur Stellungnahme BAW 2012a)

3.4 Randwerte Oberwasserzufluss

21,5 m³/s (unverändert zur Stellungnahme BAW 2012a)

3.5 Wassertiefe Unterems

Bedarfstiefe NHN-6,2 m/ NHN-6,3 m (30 cm tiefer als in der Stellungnahme BAW 2012a)

4 Ergebnisse zum Vordringen der Brackwasserzone

Während eines Staufalls bleibt das Emssperrwerk geschlossen und das Tidesignal ist nicht länger die wichtigste antreibende Kraft für die Hydrodynamik und den Salzgehalt. In Fällen wie den hier untersuchten Szenarios wird der barokline Druckgradient zur Hauptantriebskraft für die Hydrodynamik und den Salzgehalt. Der barokline Druckgradient ergibt sich aus der unterschiedlich verteilten Dichte des Wasserkörpers. Die Dichte des Wasserkörpers ist eine Funktion des Salzgehalts, der Temperatur und der Schwebstoffkonzentration. In dieser Stellungnahme wird nur der Einfluss des Salzgehalts auf die Dichte des Wasserkörpers berücksichtigt, weil der Salzgehalt üblicherweise den größten Einfluss auf die Dichte des Wasserkörpers hat.

Im Verlauf der Simulationen werden die Zuflüsse (Oberwasserzufluss und Pumpwassermengen) in die Stauhaltung unter Berücksichtigung der verschiedenen Salzgehalte durch die spezifizierten Randwerte berücksichtigt. Hierdurch kommt es zu einem allmählichen Anstieg des Wasserstands bis zum Stauziel inkl. Sicherheitsreserve. Gleichzeitig verändern sich die Salzgehalte im Wasserkörper der Stauhaltung und damit auch die Lage der Brackwasserzone. Die für den Anfangszustand vertikal verlaufenden Isohalinen (vertikal vollständig durchmischter Wasserkörper) nehmen im berechneten Endzustand eine Schräglage an. Schichtungseffekte treten deutlich in Erscheinung, weil das Wasser mit hohen Salzgehalten insbesondere in der tiefen Rinne bodennah nach stromauf vordringt.

4.1 Einfluss der unterschiedlichen Anfangswerte des Salzgehalts auf den bodennahen Stromauftransport während eines Staufalls

Die Anfangswerte des Salzgehalts für das Szenario 2009 (s. Tabelle 1) und für das Szenario 2011/2013 (s. Tabelle 2) unterscheiden sich derart, dass das Szenario 2009 auf den ersten 10 km ab Emssperrwerk nach stromauf die höheren Salzgehalte aufweist, dafür aber im Szenario 2011/2013 weiter oberstrom der Salzgehalt höher ist. Die Brackwasserzone reicht weiter nach stromauf an Papenburg vorbei bis in den Dortmund-Ems-Kanal hinein (s. Bild 1).

Im Szenario 2009 ist der Salzgehalt am Emssperrwerk zu Beginn des Staufalls höher als im Szenario 2011/2013. Ebenfalls höher ist der horizontale Salzgehaltsgradient, d. h. der Salzgehalt ändert sich auf dem Weg nach oberstrom schneller als im Szenario 2011/2013. Das bedeutet, dass die antreibende Kraft für den bodennahen Stromauftransport des salzreichen Wasserkörpers im Szenario 2009 höher ist als im Szenario 2011/2013.

Im Szenario 2011/2013 ist der Salzgehalt ab Leerort und weiter stromauf höher als im Szenario 2009, das Salz ist bereits zu Beginn des Staufalls weiter nach oberstrom verschoben. Deshalb ist der horizontale Salzgehaltsgradient geringer als im Szenario 2009, die antrei-

bende Kraft für den bodennahen Stromauftransport entsprechend geringer und ebenso die Geschwindigkeit, mit der sich das Salz bodennah nach oberstrom bewegt.

Der Vergleich der Simulationsergebnisse beider Szenarios zeigt, dass unter Berücksichtigung der gewählten Anfangs- und Randwerte im Szenario 2009 die Salzfront weiter nach stromauf kommt, als im Szenario 2011/2013 (s. Bild 2). Bild 2 zeigt auch, dass der Salzgehalt im Szenario 2011/2013 großflächig niedriger ist als im Szenario 2009. Es ist über die gesamte Stauhaltung aufsummiert weniger Salz vorhanden als im Szenario 2009. Daraus folgt, dass auch zu Beginn des Staufalls das Szenario 2011/2013 weniger Salz enthält als Szenario 2009, denn die in die Stauhaltung gepumpte Salzmenge ist in beiden Szenarios gleich.

Deshalb wird im weiteren Verlauf dieser Stellungnahme nur noch das Szenario 2009 als das worst-case-Szenario betrachtet.

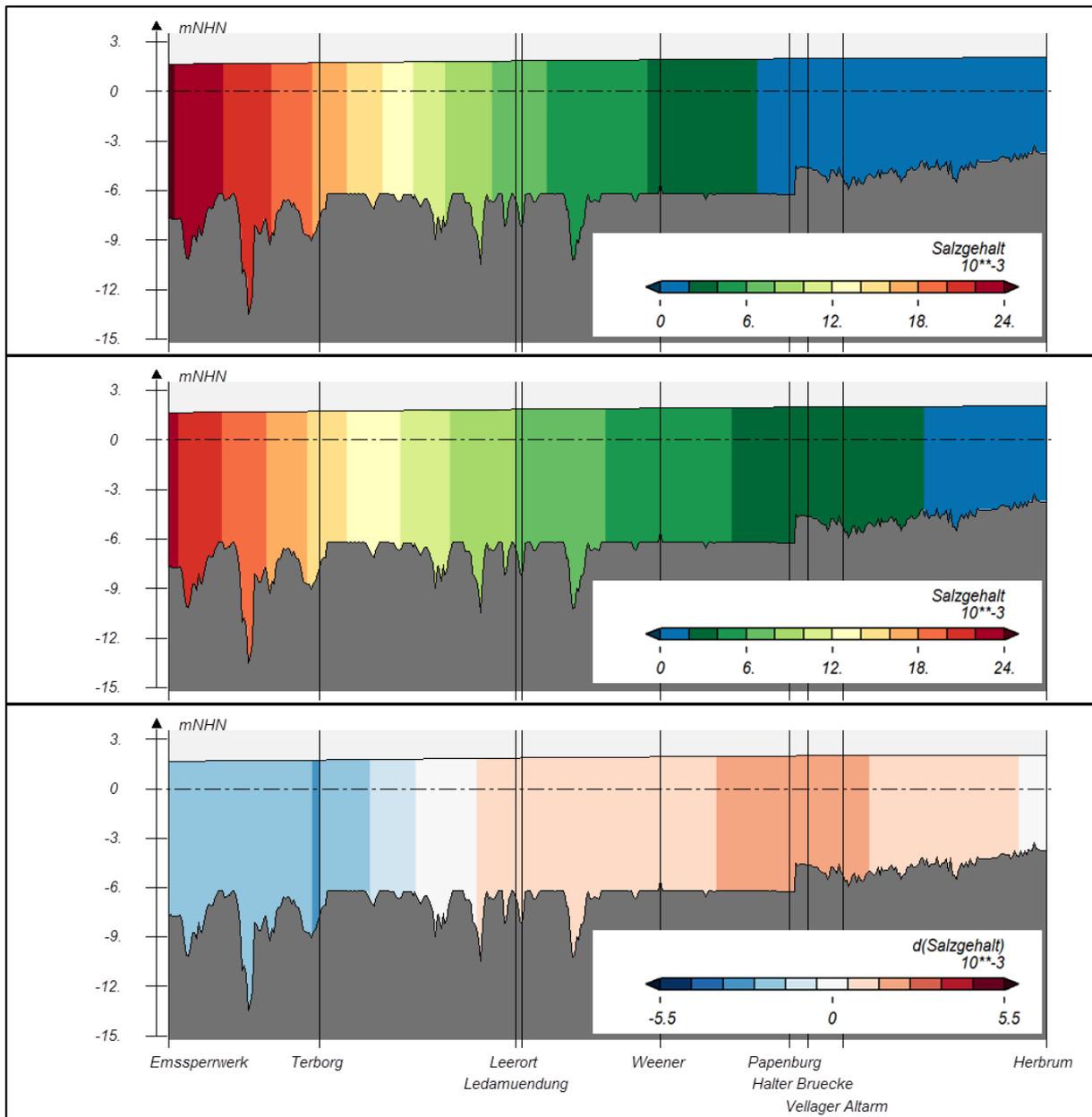


Bild 1: Salz-Anfangsverteilung in der Stauhaltung zwischen Emssperwerk (links) und Herbrum (rechts) in Fahrinnenmitte. Oben für das Szenario 2009, in der Mitte für das Szenario 2011/2013 und unten die Differenz. Blaue Differenzfarben bedeuten, dass der Salzgehalt im Szenario 2011/2013 niedriger ist als im Szenario 2009, rote Differenzfarben entsprechend umgekehrt. In der Differenz-Darstellung entspricht jede Farbkategorie eine Differenz von 1 PSU. Differenzen, die dem Betrag nach kleiner als 0,5 PSU sind, werden mit der Farbkategorie weiß dargestellt.

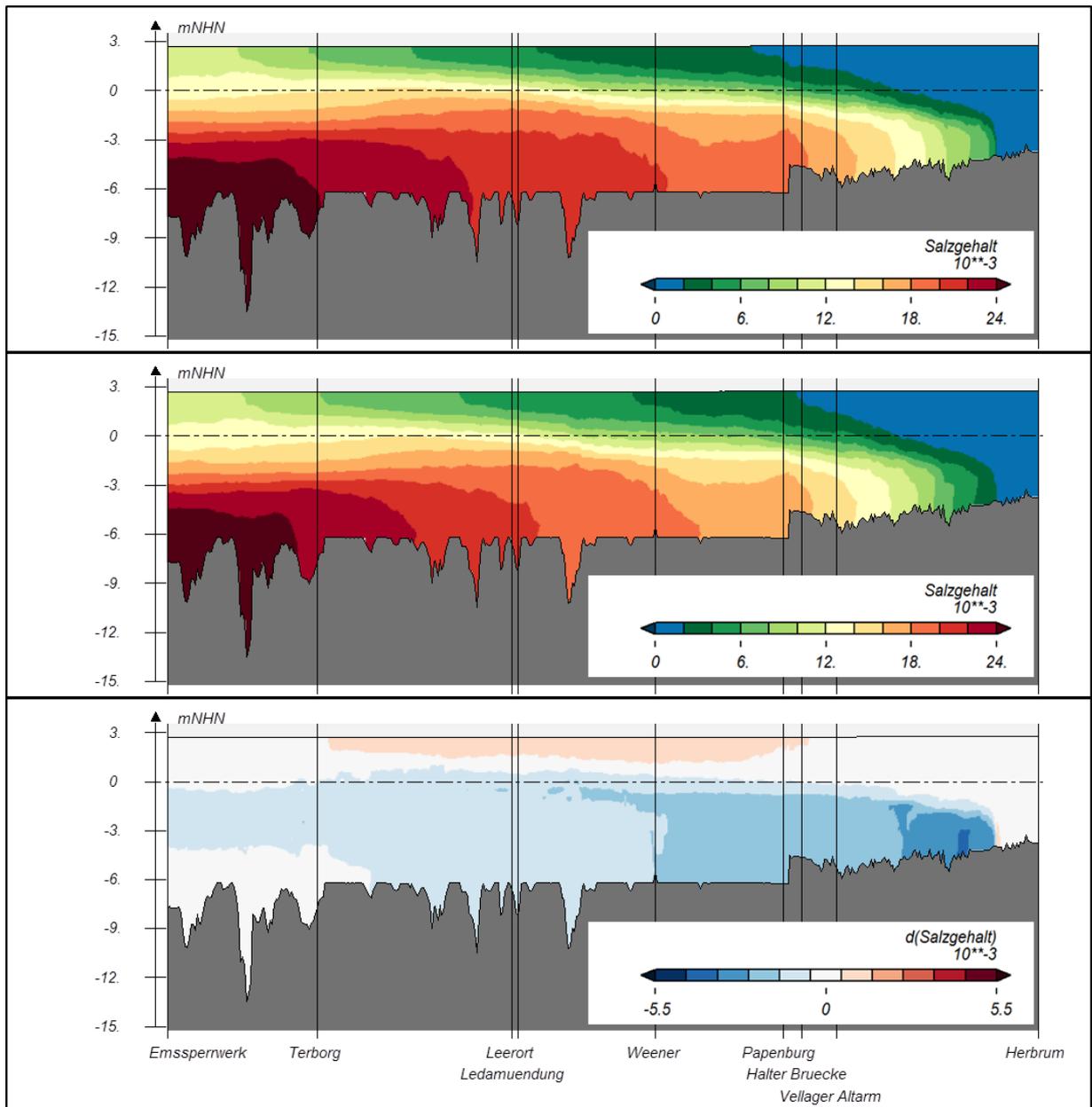


Bild 2: Salzgehalts-Verteilung in der Stauhaltung zwischen Emssperrwerk (links) und Herbrum (rechts) in Fahrrinnenmitte zum Zeitpunkt, wenn das Werftschiff die Liegewanne am Emssperrwerk erreicht hat und die Angleichung der Wasserstände außen- und binnenseits des Emssperrwerks beginnt. Oben für das Szenario 2009, in der Mitte für das Szenario 2011/2013 und unten die Differenz. Zu den Farbklassen siehe Bild 1.

4.2 Szenario 2009

Der temporäre Stau der Unterems bis zum Emssperrwerk auf NHN+2,7 m im Herbst für die Überführung großer Werftschiffe von Papenburg in die Nordsee ist unter Beachtung der angeführten Anfangs- und Randwerte (Szenario 2009) mit Hilfe des dreidimensionalen mathematischen Verfahrens *UnTRIM* simuliert worden. Die Stauzeit beträgt ca. 48 Stunden. Die

Stauzeit beginnt, wenn der Schließvorgang des Emssperrwerks eingeleitet wird und sie endet nach der Schiffsüberführung und der Entleerung, wenn kein Tor des Emssperrwerks den Querschnitt der Ems mehr einengt (Ausnahme: Drehsegmentverschluss der Hauptschiff-fahrtsöffnung). Tabelle 4 zeigt den zeitlichen Ablauf für das Szenario 2009 im Detail.

Stauzeit [hh:mm]	Ereignis	Pumpleistung Sperrwerk Ems / Leda [m³/s]	Entleerungs-Volumenstrom Emssperrwerk [m³/s]
1 00:00	Beginn Schließ- und Stauzeit Beginn Schließung Emssperrwerk	- / -	-
00:10	Beginn Schließung Ledasperrwerk	- / -	-
00:25	Emssperrwerk geschlossen Start der ersten Pumpe	0 / 0	0
2 00:30	Ledasperrwerk geschlossen Start des Ledaschöpfwerks Modellstart	6,2 / 0	0
00:36	Volle Leistung Ledaschöpfwerk	13,6 / 40	0
00:40	Volle Leistung der ersten Pumpe	18,5 / 40	0
00:55	Volle Leistung der zweiten Pumpe	37,0 / 40	0
01:10	Volle Leistung der dritten Pumpe	55,5 / 40	0
01:25	Volle Leistung der vierten Pumpe	67,0 / 40	0
01:40	Volle Leistung der fünften Pumpe	78,5 / 40	0
01:55	Volle Leistung der sechsten Pumpe	90,0 / 40	0
3 14:30	Ledaschöpfwerk aus	90,0 / 40 → 0	0
4 36:36	Stauziel erreicht (NHN+2,7m bei Ems-KM 0)	90 / 0	0
5 37:06	Beginn Schiffspassage (½ h nach Stauziel) Ausschalten der Pumpen am Emssperrwerk	90 → 0 / 0	0
6 45:06	Ende Schiffspassage, Schiff in Liegewanne Differenzwasserstand = 2,93 m Ende Schließzeit, Beginn Entleerung (Öffnen von NÖ1-5 und BSÖ je 0,5 m)	0 / 0	0 → 900
45:24	Differenzwasserstand < 2,4 m, Öffnen von NÖ1-5 und BSÖ je 1 m	0 / 0	900 → 1700
7 48:08	Ausgleich der Wasserstände Ende Stauzeit	0 / 0	1700

Tabelle 4: Zeitlicher Ablauf des Staufalls für Szenario 2009

In Bild 3 sind die berechneten Wasserstände für das Szenario 2009 für die Pegel Gandersum, Leerort und Papenburg dargestellt.

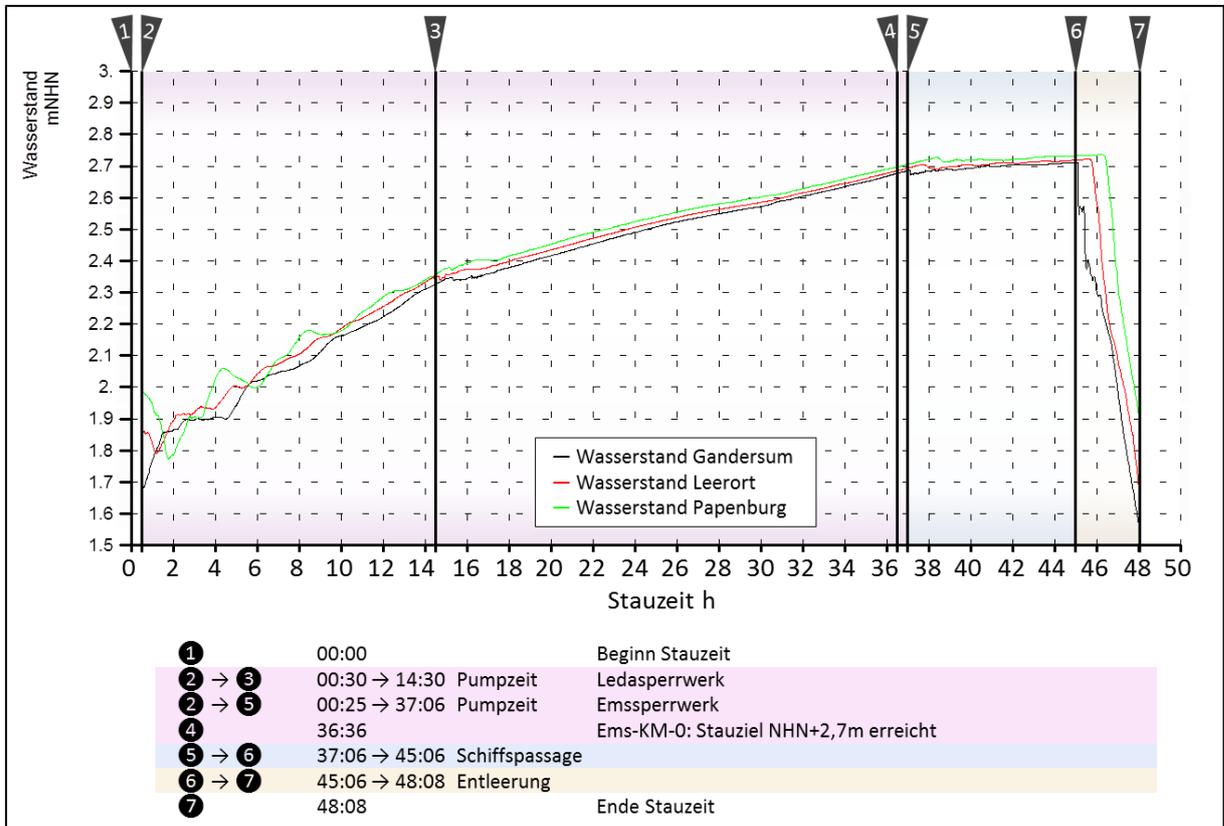


Bild 3: Szenario 2009: Berechneter Wasserstand für die Pegel Gandersum (schwarz), Leerort (rot) und Papenburg (grün).

Bild 4 zeigt die berechneten Salzgehalte für die Pegelstationen Gandersum, Terborg, Leerort, Weener, Papenburg und Halter Brücke (sohlnah).

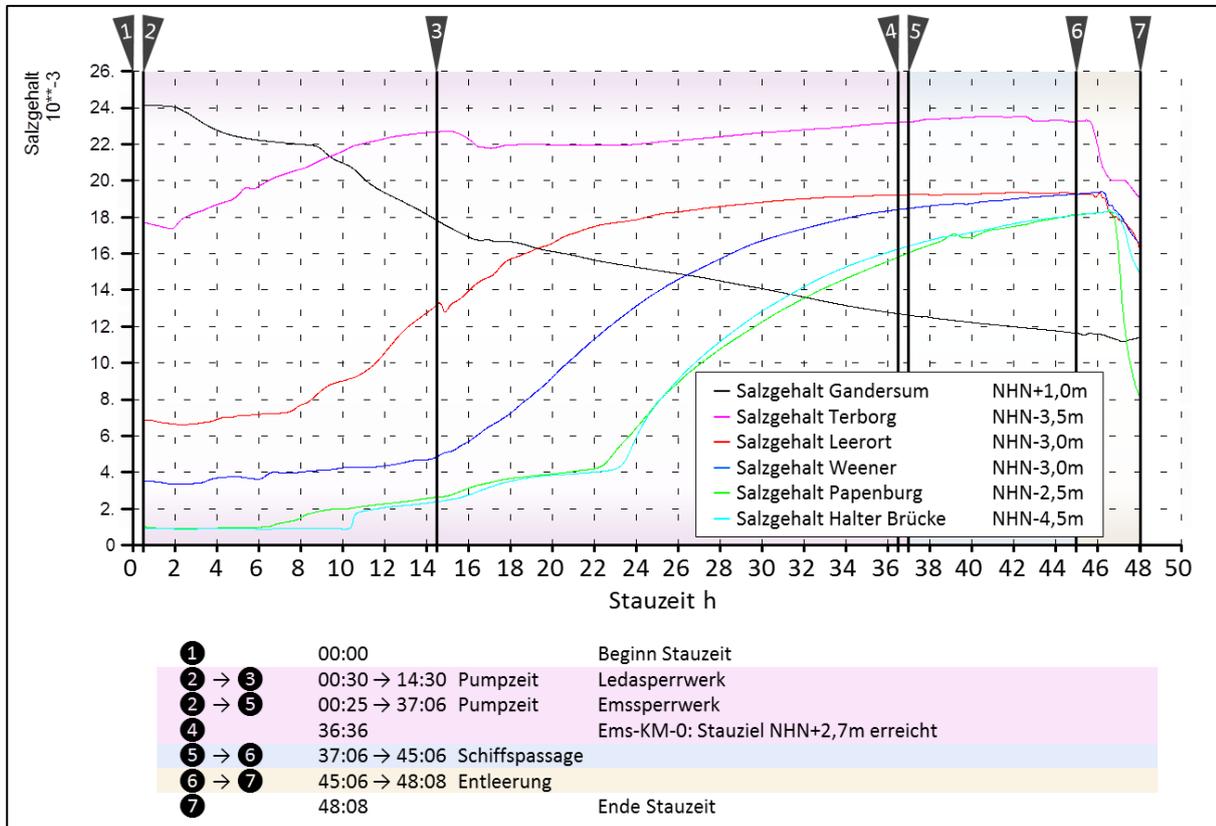


Bild 4: Szenario 2009: Berechneter Salzgehalt für die Pegelstationen Gandersum (schwarz, NHN+1,0m), Terborg (magenta, NHN-3,5m), Leerort (rot, NHN-3,0m), Weener (blau, NHN-3,0m), Papenburg (grün, NHN-2,5m) und Halter Brücke (cyan, sohlnah, NHN-4,5m)

Die oberflächennahen Salzgehalte an den Pegelstationen Gandersum, Terborg, Leerort, Weener, Papenburg und Halter Brücke zeigt Bild 5. Für jede Pegelstation ist der Salzgehalt der drei vertikalen Schichten NHN+1,5m, NHN+2,0m und NHN+2,5m dargestellt.

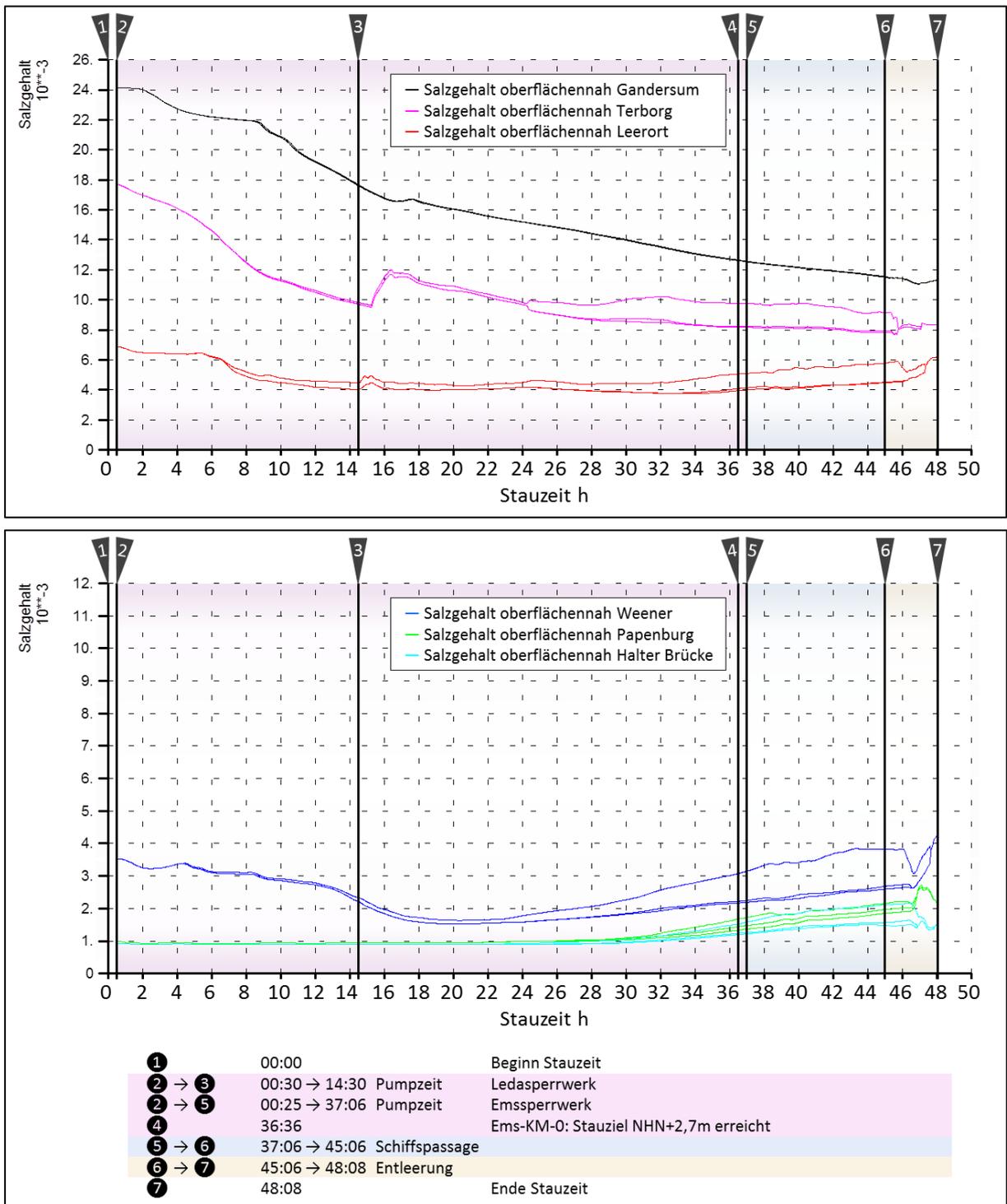
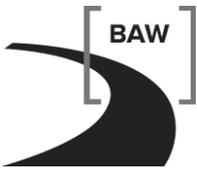


Bild 5: Szenario 2009: Berechneter Salzgehalt für die oberflächennahen vertikalen Schichten NHN+1,5m, NHN+2,0m und NHN+2,5m. Oben für die Pegelstationen Gandersum (schwarz), Terborg (magenta) und Leerort (rot) auf einer Skala von 0 bis 26 PSU und unten für die Pegelstationen Weener (blau), Papenburg (grün) und Halter Brücke (cyan) auf einer Skala von 0 bis 12 PSU.



Schiffsüberführungen sind bei einem Stauziel von $NHN+2,7$ m unter den angenommenen Anfangs- und Randwerten nicht durchführbar, ohne den Grenzwert von 2 PSU an der Halter Brücke zu überschreiten.

Die Überführung des Werftschiffes von Papenburg bis zum Emssperrwerk ist nicht simuliert worden. Die Aussagen in (BAW 2008) zu diesem Thema sind vollständig weiter gültig.

5 Eintrittswahrscheinlichkeit des worst-case-Szenarios

Die Wahrscheinlichkeit des Eintretens der im worst-case-Szenario verwendeten Anfangs- und Randwerte soll in diesem Kapitel bestimmt werden. Dafür werden Messwerte der Untereins statistisch ausgewertet. Repräsentativ für die Anfangs- und Randwerte des worst-case-Szenarios sind folgende Messzeitreihen und Grenzwerte gewählt worden:

- Repräsentativ für den Abfluss der Ems:
Oberwasserzufluss am Pegel Versen Wehrdurchstich $\leq 21,5 \text{ m}^3/\text{s}$
- Repräsentativ für die Höhe der auflaufenden Tide:
Tidehochwasser am Pegel Pogum $\leq \text{NHN}+1,62 \text{ m}$
- Repräsentativ für die Lage der Brackwasserzone:
Maximaler Salzgehalt am Pegel Leerort $\geq 6,75 \text{ PSU}$

5.1 Betrachtung der zugrundeliegenden Daten

Für die statistische Auswertung werden sowohl eine ausreichende Menge an Messwerten benötigt als auch Messwerte, die den derzeitigen Zustand des Emsästuars repräsentieren. Es wurde mit dem NLWKN abgestimmt, die letzten zehn Jahre zu betrachten (2004 bis 2013). Zudem sollen die Messwerte den betreffenden Zeitabschnitt des Jahres repräsentieren, weshalb nur die Daten vom 16. September bis 15. November betrachtet werden. Daraus ergeben sich 10 mal 118 Tiden = 1180 Tiden. Für diese Untersuchung werden insgesamt 37 Tiden nicht betrachtet, weil eine Beeinflussung des Wasserstandes (oberhalb des Sperrwerks) und/oder des Salzgehaltes durch eine Schiffsüberführung gegeben ist.

Somit stehen für die statistische Auswertung 1143 Tripel mit dem Oberwasserzufluss bei Versen, dem Tidehochwasser bei Pogum und dem maximalen Salzgehalt bei Leerort für den betrachteten Zeitraum zur Verfügung.

5.1.1 Oberwasserzufluss bei Versen

Am Pegel Versen Wehrdurchstich wird der Wasserstand alle 15 Minuten gemessen. Nach der Abflusstafel Nr. 12 werden vom WSA Meppen daraus Tageswerte des Abflusses abgeleitet und über das System WISKI zur Verfügung gestellt. Für die statistische Auswertung der Eintrittswahrscheinlichkeit des worst-case-Szenarios werden diese Tageswerte durch ein *linear mapping* auf die Eintrittszeiten des Thw von Pogum interpoliert.

Für die statistische Betrachtung wird der im worst-case-Szenario verwendete Wert von $21,5 \text{ m}^3/\text{s}$ herangezogen.

5.1.2 Tidehochwasser bei Pogum

Als Referenzmessstelle für den Wasserstand wird der Pegel Pogum herangezogen, der dem Sperrwerk der Ems nahe ist und für den Tidescheitelwerte vom WSA Emden über das System WISKI bezogen werden können.

Für die statistische Betrachtung wird der im worst-case-Szenario verwendete Wert von NHN+1,62 m herangezogen. Dieser Wert entspricht dem mittleren Spring-Tidehochwasser (M_{SpThw}) für Pogum minus 10 cm (siehe Tabelle 3).

5.1.3 Maximaler Salzgehalt bei Leerort

Die Salzgehaltsmessung im Betrachtungszeitraum an der Messstelle des NLWKN ist in den Zeiträumen 7.11.2007 bis 15.11.2007 sowie 7.11.2011 bis 15.11.2011 für insgesamt 34 Tiden unterbrochen. Für diese Zeiträume wird die Salzgehaltsmessung bei Leerort B des WSA Emden verwendet, die ebenfalls am rechten Ufer positioniert ist und im zeitlichen Vorfeld der Datenlücken vergleichbare Daten liefert.

Ermittelt werden die maximalen Salzgehalte durch ein VBA-Programm, das zwischen zwei Tideniedrigwasser am Pegel Leerort den höchsten Salzgehalt am Pegel Leerort ermittelt und als neue Zeitreihe speichert.

Der Anfangswert des Salzgehalts bei Leerort für das gewählte worst-case-Szenario beträgt 6,75 PSU plus 0,1 PSU für die zu erwartende Zunahme durch die Vertiefung der Außenems bis Emden (siehe Tabelle 1). Für die statistische Betrachtung wird nur der Anfangssalzgehalt von 6,75 PSU herangezogen, weil die Vertiefung der Außenems bis Emden in den Messwerten nicht sichtbar ist.

5.2 Eintrittswahrscheinlichkeit für die Anfangs- und Randwerte des verwendeten worst-case-Szenarios

Gesucht ist die gemeinsame Eintrittswahrscheinlichkeit P in Abhängigkeit von den drei Größen Oberwasserzufluss (OWZ), maximaler Salzgehalt bei Leerort (S_x) und Tidehochwasser bei Pogum (Thw) so, wie sie als Anfangs- und Randwerte für das worst-case-Szenario gewählt wurden (siehe Kapitel 3):

$$P((Q \leq 21,5 \text{ m}^3/s) \cap (S_x \geq 6,75 \text{ ppt}) \cap (Thw \leq 1,62 \text{ mNHN}))$$

Im ersten Schritt wird die Abhängigkeit dieser Größen untereinander ermittelt. Tabelle 5 zeigt, dass eine Korrelation zwischen dem Oberwasserzufluss und dem maximalen Salzgehalt bei Leerort existiert.

	Thw Pogum	OWZ Versen	Sx Leerort
Thw Pogum	1		
OWZ Versen	0.115	1	
Sx Leerort	0.110	-0.478	1

Tabelle 5: Korrelation der Tripel von Oberwasserzufluss (OWZ) Versen, Tidehochwasser (Thw) Pogum und maximalem Salzgehalt (S_x) Leerort.

Somit kann die die Eintrittswahrscheinlichkeit des worst-case-Szenarios nicht als Produkt der Eintrittswahrscheinlichkeiten der einzelnen Größen beschrieben werden. Jedoch lässt sich das Tidehochwasser bei Pogum separat betrachten, da diese Größe nur in geringem Umfang mit den anderen Größen korreliert:

$$\begin{aligned} P((Q \leq 21,5 \text{ m}^3/\text{s}) \cap (Sx \geq 6,75 \text{ ppt}) \cap (Thw \leq 1,62 \text{ mNHN})) \\ = P_1(Thw \leq 1,62 \text{ mNHN}) * P_2((Q \leq 21,5 \text{ m}^3/\text{s}) \cap (Sx \geq 6,75 \text{ ppt})) \end{aligned}$$

Die Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeiten der beiden Faktoren P_1 und P_2 wird in den Kapiteln 5.2.1 und 5.2.2 beschrieben. Mit den dort ermittelten Ergebnissen ergibt sich eine Spannbreite der gemeinsamen Eintrittswahrscheinlichkeit P von:

$$\begin{aligned} P = P_1 * P_2, \text{ mit } P_1 = 0,59 \wedge P_2 = 0,00235 \pm 0,00025 \\ \Rightarrow P = 0,00139 \pm 0,00015 \end{aligned}$$

Diese Wahrscheinlichkeit ist gleichbedeutend mit der Aussage, dass zu erwarten ist, dass 1,2 bis 1,5 Ereignisse (Tiden) pro 1000 Tiden die Anfangs- und Randwerte des worst-case Szenarios einhalten, bzw. dass in einem Zeitraum von 10 Jahren zu erwarten ist, dass 1,4 bis 1,7 Ereignisse die genannten Bedingungen einhalten (innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1143 Tiden in zehn Jahren). Auf ganze Ereignisse gerundet ist zu erwarten, dass in 10 Jahren ca. 1 bis 2 Tiden im Zeitfenster 16. September bis 15. November gleichzeitig alle drei Bedingungen einhalten (Oberwasserzufluss Versen $\leq 21,5 \text{ m}^3/\text{s}$, maximaler Salzgehalt bei Leerort $\geq 6,75 \text{ PSU}$, Tidehochwasser bei Pogum $\leq 1,62 \text{ mNHN}$).

5.2.1 Eintrittswahrscheinlichkeit des Tidehochwassers

Zur Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit, dass das Tidehochwasser bei Pogum kleiner oder gleich dem Grenzwert von 1,62 mNHN ist, stehen 1143 Werte aus den Datentripeln des Betrachtungszeitraums zur Verfügung. Aufgrund dieser hohen Zahl und einem Grenzwasserstand, der mit 6 cm wenig vom Mittelwert abweicht (Abweichung $< 0,2 * \sigma$), kann die Eintrittswahrscheinlichkeit empirisch ermittelt werden. 669 Werte sind kleiner oder gleich dem Grenzwert und 474 Werte größer als der Grenzwert. Es sind folglich 58,53 % der Werte kleiner oder gleich dem Grenzwert, was einer auf zwei signifikante Stellen gerundeten Wahrscheinlichkeit von 0,59 entspricht.

Zur Kontrolle dieses Wertes werden verschiedene Verteilungsfunktionen an die Messwerte angelegt. Danach zeigt die „t location-scale“-Verteilung die geringste Abweichung zum Histogramm und wird im Folgenden weiter verwendet. Bild 6 zeigt das Histogramm, sowie die „t location-scale“-Verteilung im Vergleich mit der Normalverteilung.

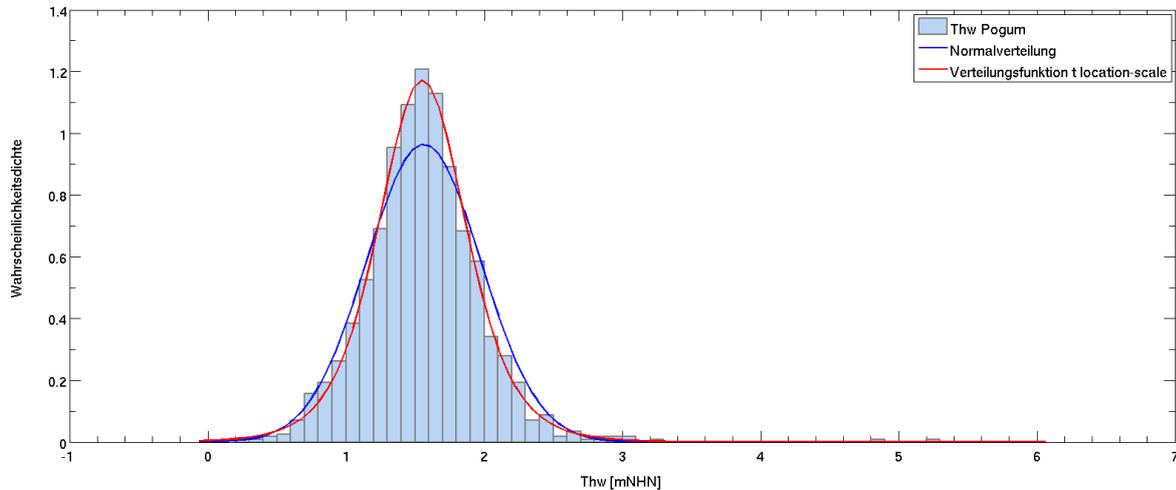


Bild 6: Histogramm und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen des Tidehochwassers bei Pogum für den Betrachtungszeitraum.

Mithilfe dieser Anpassungen können die Wahrscheinlichkeiten kumuliert aufgetragen und für den Grenzwert berechnet werden (s. Bild 7).

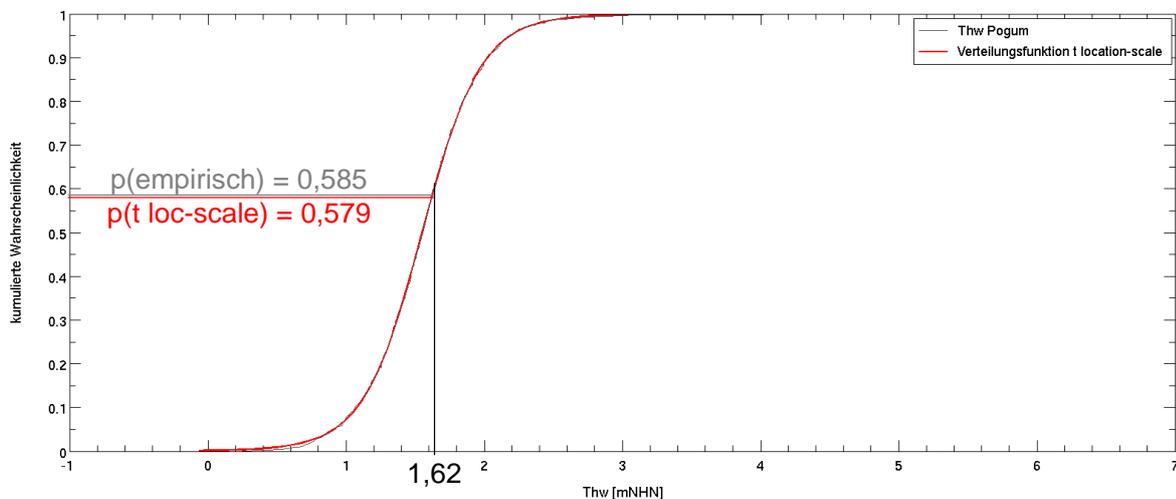


Bild 7: Kumulierte Wahrscheinlichkeit des Tidehochwassers bei Pogum für den Betrachtungszeitraum.

Aus der Verteilungsfunktion t-location-scale ergibt sich eine Wahrscheinlichkeit von 0,58. Dieser Wert stimmt gut mit dem empirischen Wert überein.

5.2.2 Eintrittswahrscheinlichkeit von Oberwasserzufluss und Salzgehalt

Der bei Leerort gemessene Salzgehalt korreliert mit dem Oberwasserzufluss, wie auch Bild 8 zeigt. Die Messwerte des Salzgehalts bei Leerort sind hier für den Betrachtungszeitraum über den Oberwasserzufluss bei Versen aufgetragen.

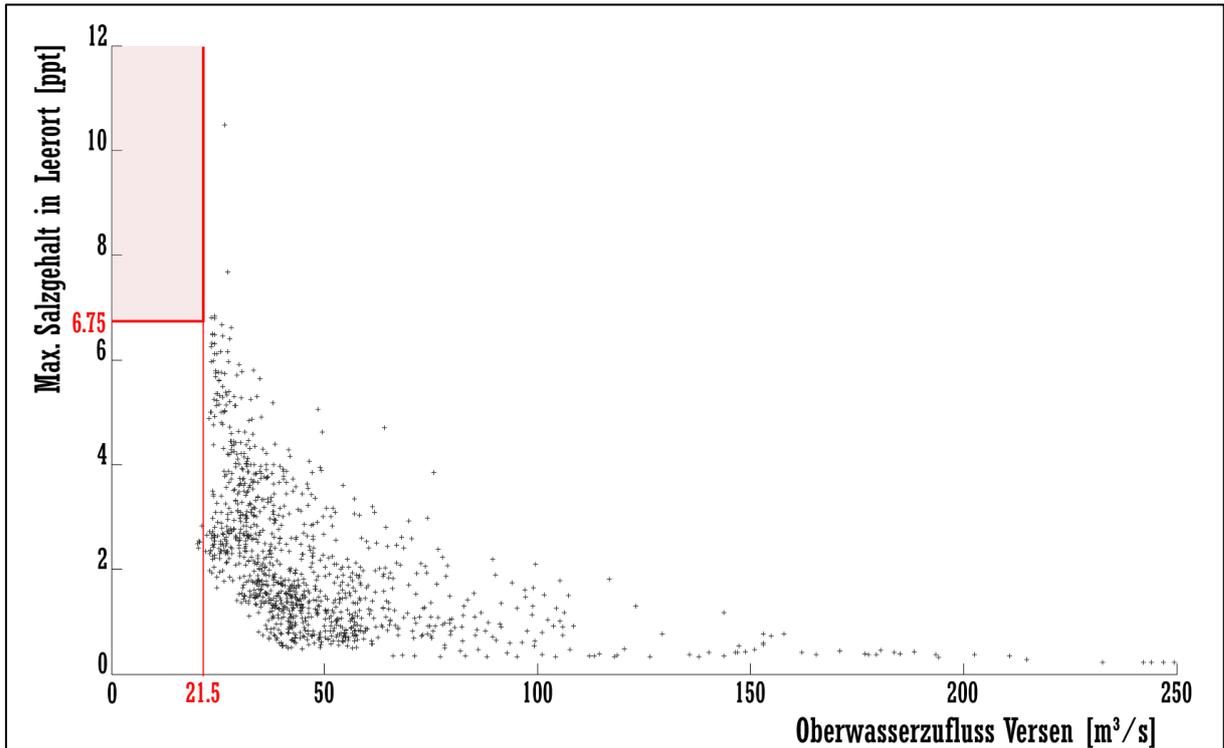


Bild 8: Max. Salzgehalt bei Leerort über Oberwasserzufluss Versen. Betrachtungszeitraum: 16. September bis 15. November der Jahre 2004 bis 2013. 1143 Wertepaare. In rot sind die definierten Grenzwerte beider Größen dargestellt.

In Bild 8 ist zu erkennen, dass im gesuchten Wertebereich (rotes Kästchen) keine Werte aufgetreten sind. Eine empirische Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit ist somit ausgeschlossen und die Erzeugung einer Dichtefunktion notwendig. Weiterhin zeigen weder die Messwerte des maximalen Salzgehaltes bei Leerort, noch der Oberwasserzufluss eine Gaußsche Normalverteilung. Somit kann keine bivariate Gaußsche Dichtefunktion erzeugt werden.

Ein Standardverfahren zur Erzeugung einer Dichtefunktion für nicht normalverteilte Daten ist die *kernel density estimation* (KDE) (Kerndichteschätzung / Parzen-Fenster-Methode, s. Wikipedia). Bei dieser Methode wird für jeden Messwert eine separate Einzel-Verteilung (z. B. Gaußverteilung) angenommen. Diese Einzel-Verteilungen sind die so genannten Kernel. Im zweidimensionalen Fall können die Kernel die Form einer rotationssymmetrischen 3D-Glocke haben. Das Integral über alle diese Kernel ergibt die Dichtefunktion der Messwertverteilung. Die Form dieser Dichtefunktion ist abhängig von der verwendeten Bandbreite dieser Kernel. Je größer die Bandbreite, desto breiter (größeres Sigma) sind die Kernel und desto geglätteter ist die resultierende Dichtefunktion.

Für die Wahl der Bandbreite wird für den betrachteten bivariaten Fall die Faustregel von Bowman und Azzalini (1997) S.31ff verwendet. Voraussetzung für das Verfahren von Bowman und Azzalini (1997) ist, dass der Wertebereich der verwendeten Größen von $-\infty$ bis $+\infty$

reicht. Dies wird durch die Logarithmierung der Messwerte gewährleistet. Bild 9 zeigt die Messwertpaare nach Logarithmierung.

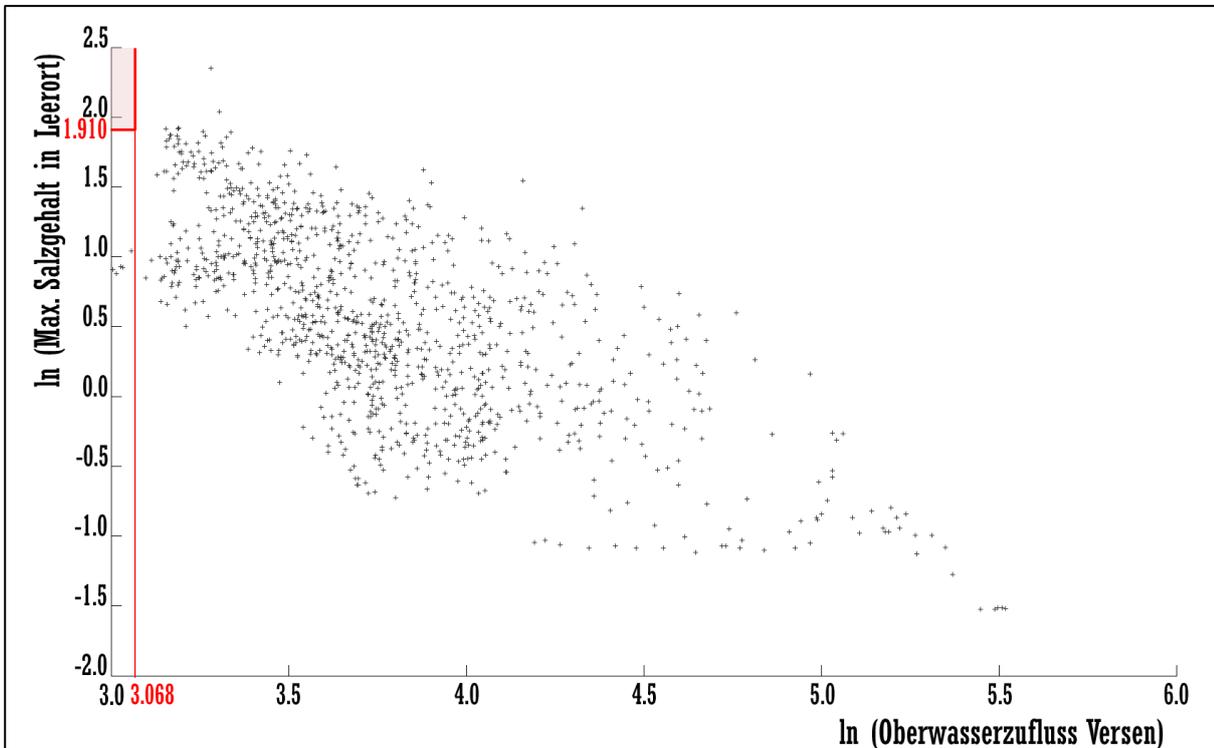


Bild 9: Max. Salzgehalt bei Leerort über Oberwasserzufluss Versen nach Logarithmierung der Wertepaare für den Betrachtungszeitraum. In rot sind die definierten Grenzen beider Größen dargestellt.

Des Weiteren wird bei dem Verfahren von Bowman und Azzalini (1997) eine Diskretisierung für beide Wertebereiche vorgenommen. Die Anzahl der Unterteilungen (N) ist dabei variierbar. Beispielhaft sind im oberen Teil von Bild 10 die Häufigkeiten der Messwertpaare für einer Diskretisierung von 28 mal 28 Zellen dargestellt (N=28), wobei die rechte Seite die logarithmierten Werte darstellt. In diesem Beispiel reicht der Wertebereich für den logarithmierten Oberwasserzufluss von +2,65 bis +5,87 mit einer Spaltenbreite von konstant 0,12 und für den logarithmierten maximalen Salzgehalt von -2,18 bis +3,01 mit einer konstanten Zeilenhöhe von 0,19. Die auf der rechten Seite konstant breiten und hohen Zellen sind auf der linken Seite im ursprünglichen Wertebereich unterschiedlich breit und hoch. In der unteren Hälfte von Bild 10 ist die dazugehörige berechnete Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion abgebildet.

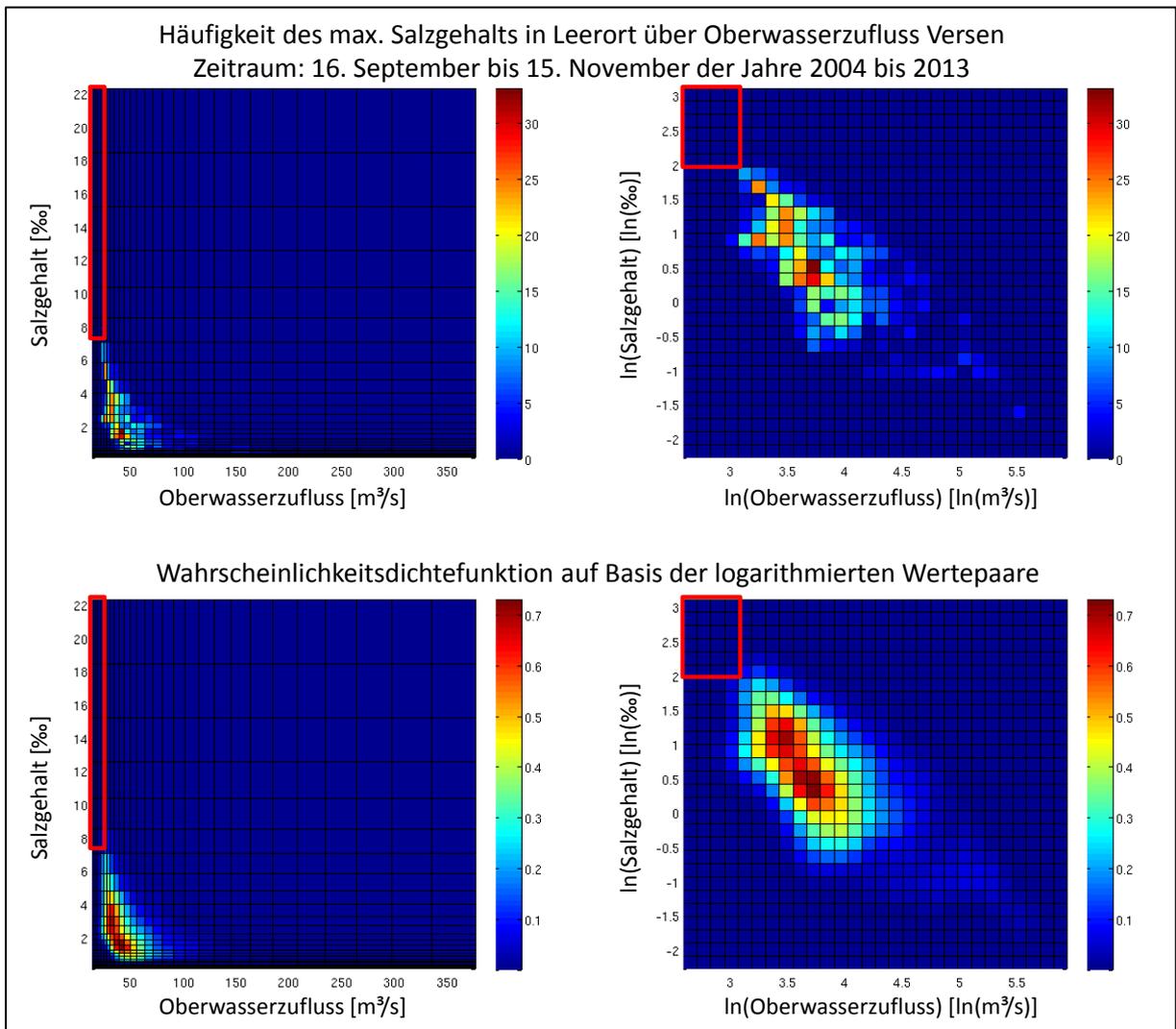


Bild 10: Häufigkeitsverteilung (oben) und Dichtefunktion (unten) der Messwertpaare von max. Salzgehalt bei Leerort und Oberwasserzufluss bei Versen für den ursprünglichen Wertebereich (links) und in logarithmierter Form (rechts) für den Betrachtungszeitraum und einer Diskretisierung von 28 mal 28 Zellen ($N=28$). In rot sind die definierten Grenzen beider Größen dargestellt.

Um von dieser Dichtefunktion zu einer Eintrittswahrscheinlichkeit zu kommen, muss nun das Volumen unter der Fläche im gesuchten Bereich (Salzgehalt $\geq 6,75$ PSU und Oberwasserzufluss $\leq 21,5$ m^3/s) ermittelt werden (s. Bild 11), wobei das Gesamtvolumen unter der Dichtefunktion normiert ist.

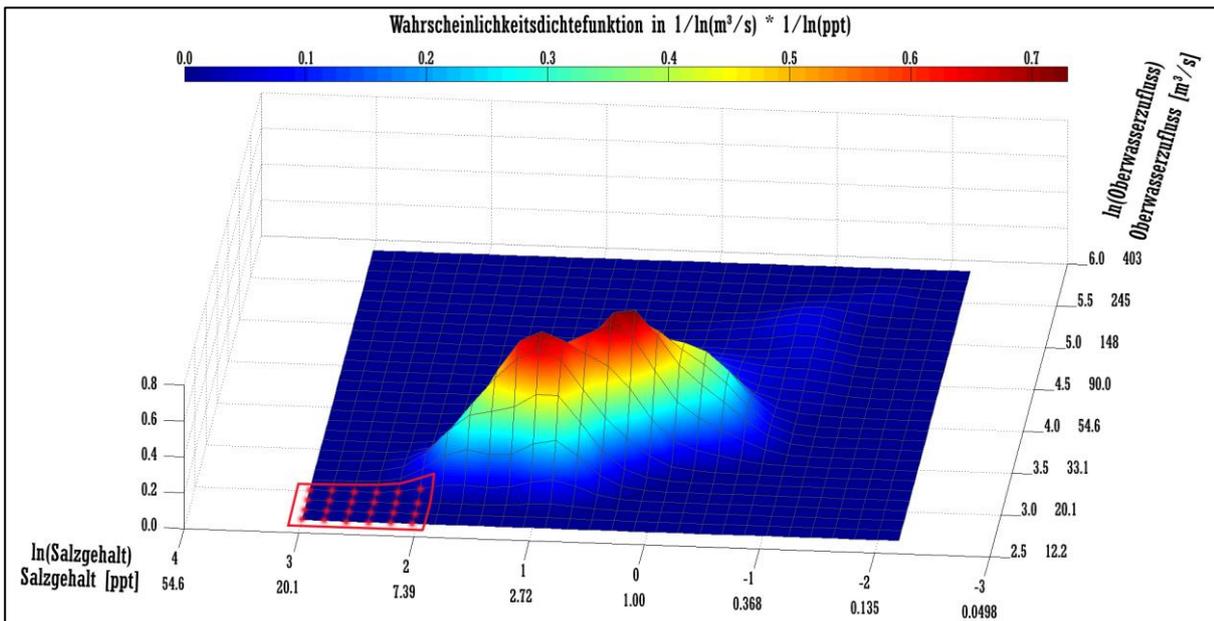


Bild 11: Dreidimensionale Darstellung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Messwertpaare von max. Salzgehalt bei Leerort und Oberwasserzufluss bei Versen in logarithmierter Form für den Betrachtungszeitraum und einer Diskretisierung von 28 mal 28 Zellen (Flächenzentren bilden die Knoten der Darstellung). In rot sind die definierten Grenzen beider Größen dargestellt und damit die Fläche über der das Volumen integriert werden muss.

Die Integration der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion wird dabei für alle Zellen durchgeführt, deren Mittelpunkt die Grenzwertkriterien erfüllt. Es ist offensichtlich, dass ein gewisser Diskretisierungsfehler in Kauf genommen wird, weil der Rand einer Zelle die Grenzwertkriterien verletzen kann. Dieser Diskretisierungsfehler wird umso kleiner, je größer die Diskretisierung gewählt wird, also die Anzahl der Unterteilungen N zunimmt. Deshalb wird im letzten Schritt die Diskretisierung von $N=10$ auf $N=140$ erhöht. Bild 12 zeigt die Abhängigkeit der Eintrittswahrscheinlichkeit von der Anzahl der Unterteilungen N . Im Ergebnis konvergiert die Eintrittswahrscheinlichkeit gegen die gesuchte Lösung.

Die gesuchte Eintrittswahrscheinlichkeit (max. Salzgehalt bei Leerort $\geq 6,75$ PSU und gleichzeitig Oberwasserzufluss bei Versen $\leq 21,5$ m^3/s) konvergiert gegen den Wert $0,00235 \pm 0,00015$. Das entspricht 2,1 bis 2,6 Ereignissen (Tiden) pro 1000 Tiden oder auf ganze Zahlen gerundet 2 bis 3 Tiden innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1143 Tiden in zehn Jahren.

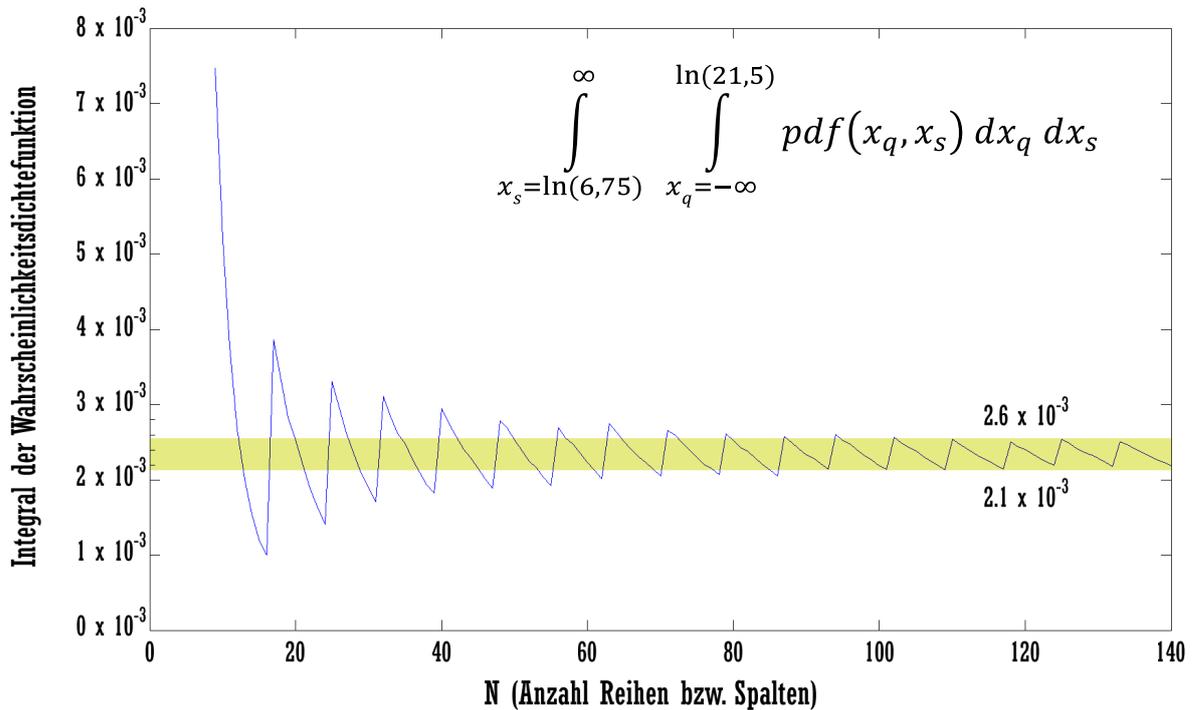
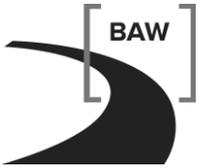


Bild 12: Integrierte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Messwertpaare von max. Salzgehalt bei Leerort $\geq 6,75$ PSU und Oberwasserzufluss bei Versen $\leq 21,5$ m³/s bei Erhöhung der Diskretisierung von N=10 bis zu N=140.

6 Zusammenfassung

In dieser Stellungnahme ist ein worst-case-Szenario bezüglich der Salzgehaltsverteilung in der Unterems während eines Staufalls untersucht worden. Die Modellierung zeigt, dass der bodennahe Salzgehalt bei Halte bereits nach weniger als zwölf Stunden Stauzeit den Grenzwert von 2 PSU überschreitet. Im weiteren Verlauf steigt der bodennahe Salzgehalt bei Halte auf über 18 PSU an, bis die Wirkung der Entleerung bei Halte merkbar wird (siehe Bild 4). Schiffsüberführungen mit einem Stauziel von NHN+2,7 m sind unter den angenommenen Anfangs- und Randwerten (worst-case) nicht durchführbar, ohne den Grenzwert von 2 PSU an der Halter Brücke zu überschreiten.

Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen der für das worst-case-Szenario gewählten Anfangs- und Randwerte ist auf Basis repräsentativer Messwerte-Tripel (Oberwasserzufluss Versen, Tidehochwasser bei Pogum und maximaler Salzgehalt bei Leerort) bestimmt worden. Dazu sind die letzten 10 Jahre (2004 bis 2013) analysiert worden, für jedes Jahr der Zeitraum vom 16. September bis zum 15. November (Betrachtungszeitraum). Es ist zu erwarten, dass in 10 Jahren ca. 1 bis 2 Tiden im Zeitfenster 16. September bis 15. November gleichzeitig alle drei Bedingungen einhalten (Oberwasserzufluss Versen $\leq 21,5$ m³/s, maximaler Salzgehalt bei Leerort $\geq 6,75$ PSU, Tidehochwasser bei Pogum $\leq 1,62$ mNHN). In den letzten 10 Jahren ist dieser Fall nicht aufgetreten.



Die Eintrittswahrscheinlichkeit des worst-case-Szenarios sagt aber nichts darüber aus, wie wahrscheinlich das Überschreiten des Grenzwertes von 2 PSU bei Halte im Betrachtungszeitraum ist.

Bundesanstalt für Wasserbau
Hamburg, Juli 2014

Im Auftrag

Bearbeiter

gez. Winkel
Dr. rer. nat. N. Winkel

gez. Jürges
Dipl.-Ing. (FH) J. Jürges

gez. Hesser
Dipl.-Geol. F. Hesser

7 Literaturverzeichnis

BAW (2008): Flexibilisierung des Sommerstaufalls in der Tideems. Gutachten für eine wasserbauliche Systemanalyse als Grundlage für eine Umweltverträglichkeitsuntersuchung. Bundesanstalt für Wasserbau - Dienststelle Hamburg (BAW-DH). Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg (Gutachten, BAW A3955 03 10124).

BAW (2012a): Antrag auf gehobene wasserrechtliche Erlaubnis zur Überführung von zwei Kreuzfahrtschiffen über die Ems in Verbindung mit zwei Probestaus in der zweiten Septemberhälfte 2012 und 2014. Stellungnahme der BAW. Bundesanstalt für Wasserbau - Dienststelle Hamburg (BAW-DH). Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg (Stellungnahme, BAW A3955 03 10188).

BAW (2012b): Vertiefung der Außenems bis Emden - Gutachten zu den ausbaubedingten Änderungen von Hydrodynamik, Transport und Seegang. Bundesanstalt für Wasserbau - Dienststelle Hamburg (BAW-DH). Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg (Gutachten, BAW A3955 03 10144).

Bezirksregierung Weser-Ems (1999): Planfeststellungsbeschluss zum Emssperrwerk und Bestickfestsetzung vom 14. August 1998. in der Fassung des Planergänzungsbeschlusses gem. § 75 Abs. 1a VwVfG vom 22. Juli 1999.

Bezirksregierung Weser-Ems (2001): Planänderungsbeschluss gem. § 76 Abs. 2 VwVfG. betreffend den "Planfeststellungsbeschluss zum Emssperrwerk" vom 14. August 1998 in der Fassung des Planergänzungsbeschlusses gem. § 75 Abs. 1a VwVfG vom 22. Juli 1999 und des Planergänzungsbeschlusses vom 24. März 2000.

Bowman, A. W.; Azzalini, Adelchi (1997): Applied smoothing techniques for data analysis. The kernel approach with S-Plus illustrations. Oxford, New York: Clarendon Press; Oxford University Press (Oxford science publications, 18).