



Emssperrwerk Gandersum

**Aufstau der Ems
zur Überführung der *AIDAnova*
von Papenburg nach Gandersum**

7. bis 9. Oktober 2018



Niedersachsen

Emssperrwerk Gandersum

Aufstau der Ems und Überführung der AIDAnova

von Papenburg nach Gandersum am 07. bis 09.10.2018

Auswertung der physikalisch-chemischen Messdaten

1. Einleitung und Zusammenfassung

Der Stau zur Überführung der AIDAnova fand im Rahmen des Planfeststellungsbeschlusses vom 17.07.2015, unter Aussetzung der Sauerstoff- und Salzrandbedingungen (Nebenbestimmungen A.II.2.2.1 und A.II.2.2.2b), statt. Das erweiterte Messprogramm, bei dem neben den kontinuierlichen Stationsmessungen auch mobile Messungen entlang der Stauhaltung erfolgten, bestätigte die Erfahrungen aus den vorherigen Staufällen hinsichtlich des raschen Absetzens der Schwebstoffe und der Gestalt der Flüssigschlickschicht an der Sohle. Auch die Erkenntnisse zu den Bewegungs- und Transportvorgängen im Wasserkörper infolge des Oberwasserzuflusses aus Richtung Herbrum und der Dichteströmung aus Richtung Gandersum spiegelten sich im aktuellen Stau wider, auch wenn die Randbedingungen extremer waren als in den bislang absolvierten Fällen. So ging diesem Stau eine lange Trockenwetterphase voraus, die zu außergewöhnlich hohen Salzgehaltswerten in der Ems, insbesondere unterhalb des Emssperrwerks geführt hatte. Zudem erhöhte eine Sturmflut Anfang Oktober die Salzgehalte in der Unterems bereits deutlich. Die Tideverhältnisse zu Staubeginn machten zusammen mit dem niedrigen Oberwasser eine Staudauer von vier Tiden erforderlich.

Die o.g. Ausgangsbedingungen führten dazu, dass sich hohe Salzgehalte in der Stauhaltung einstellten, insbesondere im oberen Abschnitt, so dass u.a. an der Halter Brücke Werte über 2 ‰ eintraten. Die Sauerstoffkonzentrationen nahmen über weite Strecken deutlich zu. Die Tiefenprofile bestätigten, dass vom Flüssigschlick an der Sohle keine aufsteigende Zehrung ausgeht und der Sauerstoffgradient zwischen dieser Schicht und dem darüberstehenden Wasser sehr stark ist.

Tabelle 1 Vorgaben gem. Planfeststellungsbeschluss zur Durchführung des Staus

Aspekt	Vorgabe	Eintritt im aktuellen Stau
Staudauer	≤ 52 Stunden	48 Stunden und 50 Minuten
Wasserstand	≤ NHN +2,7 m	NHN +2,6 m
Sauerstoffgehalt	Aussetzung durch Planfeststellungsbeschluss vom 17.07.2015	
Salzgehalt	Aussetzung durch Planfeststellungsbeschluss vom 17.07.2015	

2. Steuerung der Sperrwerke und Pumpen

Das Emssperrwerk war am 07.10.2018 um 11:56 Uhr geschlossen und am 09.10. um 12:46 Uhr wieder geöffnet, so dass die Staudauer 48 Stunden und 50 Minuten betrug. Zur Vorbereitung der Sperrwerksöffnung war ab dem 09.10. um 10:00 Uhr bereits damit begonnen worden, den Wasserstand der Stauhaltung stufenweise auf den Tidewasserstand unterhalb des Emssperrwerks abzusenken. Das Ledasperrwerk wurde am 07.10. um 11:20 Uhr geschlossen und am 09.10. um 16:28 Uhr wieder geöffnet.

Tabelle 2 Steuerung der Sperrwerke und Pumpen

Uhrzeit [MESZ]	Vorgang
07.10.18 11:20 Uhr	Ledasperrwerk Beginn Schließvorgang
07.10.18 11:20 bis 11:56 Uhr	Emssperrwerk Schließvorgang
07.10.18 12:20 bis 08.10.18 16:19 Uhr	Emssperrwerk Pumpeneinsatz
07.10.18 12:42 bis 07.10.18 23:03 und 08.10.18 09:12 bis 08.10.18 13:03 Uhr	Ledaschöpfwerk Pumpeneinsatz
09.10.18 10:00 bis 12:46 Uhr	Emssperrwerk Öffnungsvorgang beginnend mit langsamer Wasserstandsabsenkung in der Stauhaltung durch stufenweises Öffnen der Sperrwerkstore
09.10.18 16:28 Uhr	Ledasperrwerk Beginn Öffnungsvorgang

Zur Unterstützung des Füllvorganges der Stauhaltung wurden die Pumpen des Emssperrwerks für 28 Stunden und die des Ledaschöpfwerks für rd. 14 Stunden betrieben. Hinzu kam

ein kurzzeitiger Schöpfungsbetrieb der Entwässerungsverbände Muhder Sielacht, Sielacht Moor-merland und Unterhaltungsverband 104 „Ems IV“ (Aschendorf), der die Füllung der Stauhaltung unterstützte.

3. Überführungsfahrt der AIDAnova

Am 08.10.2018 gegen 20:00 Uhr passierte die AIDAnova die Dockschleuse und begann seine Überführungsfahrt in Richtung Gandersum. Die Öffnungen der Brücken bei Weener und Leerort wurden um 02:00 bzw. 06:30 Uhr durchfahren. Gegen 11:30 Uhr erreichte das Werftschiff die Warteposition zwischen Oldersum und Gandersum, um nach vollständiger Öffnung des Emssperrwerks seine Reise Ems abwärts fortzusetzen. Die Passage des Emssperrwerks erfolgte dann um 13:00 Uhr. Die stufenweise Öffnung des Emssperrwerks wurde bereits vor Ankunft des Schiffes bei Oldersum eingeleitet, um den Stau zum richtigen Zeitpunkt während des erwarteten Tidehochwasserscheitels beenden und eine Weiterfahrt des Werftschiffes bei ausreichendem Wasserstand gewährleisten zu können.

4. Wetterbedingungen und Wasserstandsverhältnisse vor und während des Staus

Von Februar bis September 2018 lagen die Monatssummen der Niederschläge deutlich unter dem vieljährigen Mittelwert. Anfang Oktober hatte es, bis auf geringe Niederschlagssummen in den Tagen vor Staubeginn, zuletzt am 1. und 2. Oktober geregnet (jeweils 5 – 10 mm). Entsprechend der geringen Niederschläge betrug der Abfluss der Ems lediglich $\leq 20 \text{ m}^3/\text{s}$ und der Leda $\leq 10 \text{ m}^3/\text{s}$. Damit lag dieser bei nur 30 bis 50% des mehrjährigen arithmetischen Mittelwertes dieses Zeitraumes.

Tabelle 3 Übersicht Wasserstände

Vorgang	Wasserstand [NHN]
Ledasperrwerk Beginn Schließvorgang	+1,6 ¹⁾
Emssperrwerk Beginn Schließvorgang	+1,7 ²⁾
Ende Pumpeneinsatz Emssperrwerk	+2,6 ³⁾
Ende Pumpeneinsatz Ledaschöpfwerk	+0,5 ⁴⁾
Emssperrwerk Beginn stufenweises Öffnen (max. Wasserstand in Stauhaltung)	+2,6 ³⁾
Emssperrwerk geöffnet	+1,8 ²⁾
Ledasperrwerk Beginn Öffnungsvorgang	+0,6 ⁴⁾

1) Tidewasserstand am Ledasperrwerk

2) Tidewasserstand am Emssperrwerk

3) Wasserstand am Emssperrwerk in Stauhaltung

4) Wasserstand am Ledasperrwerk in abgesperrter Leda

Der Wasserstand zu Beginn des Schließvorganges hatte bei Gandersum eine Höhe von NHN +1,7 m und lag damit rd. 10 cm über dem mittleren Tidehochwasser (MThw). Bei Papenburg trat ein Tidehochwasser (Thw) von NHN +2,15 m ein. Durch die Ausspiegelung nahm das Wasserstandsgefälle in der Stauhaltung innerhalb der ersten 1 bis 2 Stunden deutlich ab. In weiteren 5 Stunden war noch eine deutliche Schwankung des Wasserstands zu verzeichnen. Zum Ende dieser Phase hatten sich an den Pegeln von Papenburg bis Gandersum Wasserstände von rd. NN +2,1 m eingestellt. In der Folgezeit stieg das Niveau infolge des natürlichen Zulaufs und durch den Schöpfungsbetrieb an und erreichte zum Beginn der stufenweisen Öffnung des Sperrwerks seine maximale Höhe von NN +2,6 m (Pegel Gandersum).

5. Gewässergüte in der Tideems und in der Stauhaltung

a. Art und Umfang der Messungen

Die entlang der Ems zwischen Knock und Herbrum dauerhaft installierten Messstationen liefern kontinuierliche Messreihen der Parameter Wassertemperatur, Salzgehalt, Sauerstoffkonzentration, Schwebstoffgehalt und Wasserstand. Die Stationen ermöglichen die Beobachtung der aktuellen Gütesituation in der Tideems und gestatten die Interpretation vor dem Hintergrund der tide- und saisonbedingten Charakteristik. Die Stationen Gandersum, Terborg, Leerort, Weener, Papenburg Herbrum und Leer befinden sich oberhalb des Emssperrwerks, unterhalb davon liegen die Stationen Pogum, Emden und Knock.

Tabelle 4 Messprogramm während des Staus

Messung	Parameter	Zeit [MESZ]	Bem.
Stationsmessungen Knock bis Herbrum	Tw, Lf, SSI, Cs	kontinuierlich (langjährig)	1)
Erweitertes Messprogramm			
Zusätzliche Salzgehaltmessung Halter Brücke	Tw, Lf (sohlnah)	kontinuierlich	
Längsfahrten zwischen Gandersum und Herbrum mit den Messschiffen DOBBE und MEMMERT, sowie dem Messboot TIDESTROM	Tw, Lf, SSI, Cs (Tiefenprofile)	07.10.18 12:00 bis 09.10.18 12:00	2) und 3)
Messungen im Vorland zwischen Terborg und Halte (bei Tageslicht)	Lf	Am 08.10.18 07:45 bis 12:20 und 09.10.18 08:00 - 11:30	3) und 4)
Messungen im Vorland zwischen Oidersum und Papenburg	Messung Feststoffmenge durch Sedimentfallen / Kontrollflächen	kontinuierlich, Einsammeln der Sedimentfallen n. Stauende	3) und 5)
Längsfahrt Mehrfrequenz-Echolot zwischen Gandersum und Papenburg	Wassertiefe, Dicke der Flüssigschlickschicht	Ab 07.10.18 19:10	6)

1) Es werden folgende Parameter der Gewässergüte gemessen: Wassertemperatur (Tw in °C), rel. Leitfähigkeit (Lf 25°C, in mS/cm), Sauerstoffsättigungsindex (O2 SSI in %), Schwebstoffkonzentration (Cs in g/l). Anschließend erfolgt die Berechnung der Parameter

Salzgehalt (praktischer Salzgehalt Sp in PSU ~ ‰) und Sauerstoffkonzentration (O₂ in mg/l). Die Installationshöhe befindet sich rd. 2m über der festen Gewässersohle. An den Stationen Leerort und Weener wurden zudem im August 2017 O₂- und Lf-Sonden in einer höhergelegenen Messebene installiert. Diese befindet sich etwa 30 cm unter dem mittleren Tideniedrigwasser. Die Differenz zwischen beiden Messebenen beträgt ≥ 1 m.

- 2) Im aktuellen Staufall wurden vier Hin- und Rückfahrten über die Dauer des Staus verteilt, wobei die ersten mobilen Messungen direkt bei Staubeginn ausgeführt und die letzten Werte während der stufenweisen Öffnung des Sperrwerks aufgenommen wurden. Zur Ermittlung des Ausgangszustands wurde auch das im Verhältnis zu den Messschiffen schnellere Messboot TIDESTROM eingesetzt, das zeitgleich mit den Messschiffen die Arbeit aufnahm und zügig Tiefenprofile an ausgewählten Positionen zwischen Gandersum und Halte aufnahm. Die dabei ausgeführten Messungen erfolgten zumeist bis zur Oberfläche der Flüssigschlickschicht, während die Hauptmessungen, die von den Messschiffen in einem Abstand von 1 bis 2 km ausgeführt wurden, generell die Flüssigschlickschicht miteinschloss und bis zur festen Sohle reichten.
- 3) Aus Gründen der Arbeitssicherheit finden die Messungen im Vorland und der Einsatz des Messbootes generell nur bei Tageslicht statt.
- 4) Die Messungen im Vorland können generell nur an dafür geeignete Positionen, bei Tageslicht und erst nach Ausuferung erfolgen. Im aktuellen Fall begannen die Leitfähigkeitsmessungen am 08.10.18 um 07:45 Uhr bei einem Wasserstand von NHN + 2,4 m (Pegel Gandersum).
- 5) Als Sedimentfallen finden spezielle Matten und Filterflächen Verwendung. Zusätzlich erfolgt eine qualitative Beurteilung der Schlickablagerung anhand von Kontrollflächen. Die Matten und Filter wurden am 06.10.18 ausgelegt und am 10.10.18 wieder eingesammelt. Die umgebenden Flächen wurden vor und nach dem Stau zur Dokumentation abgelichtet. (Weitere Erläuterungen siehe Text)
- 6) Die Ausführung der Echolotmessung erfolgt auf dem Schiff MEMMERT zeitgleich mit der Messung der Gewässergüte. Im Verlauf des Schichtdienstes kam die MEMMERT ab dem 07.10.18 um 19:10 Uhr zum Einsatz.

Während des Aufstaus der Ems befinden sich demnach die Stationen Herbrum (oberhalb des Tidewehrs) und Leer (oberhalb des Ledasperrwerks) außerhalb der Stauhaltung und dokumentieren die Verhältnisse in deren Zulauf. An den Positionen entlang der Stauhaltung erfolgt die Messung im von der Tide abgeschnittenen Wasserkörper, während die unterhalb des geschlossenen Emssperrwerks liegenden Stationen die weiterhin tidebeeinflusste Gütesituation aufzeichnen.

Bei ungünstigen Randbedingungen der Gewässergüte findet zusätzlich zu den kontinuierlich arbeitenden Stationen ein erweitertes Messprogramm statt, mit dem eine detailliertere Beobachtung der Güteparameter im Wasserkörper der aufgestauten Tideems ermöglicht wird. Die dazu veranlassenden ungünstigen Verhältnisse sind zumeist im Sommer bei niedrigem Abfluss und hoher Wassertemperatur gegeben und äußern sich in hohen Schwebstoffkonzentrationen, hohen Salzgehalten und niedrigen Sauerstoffwerten.

Zu dem erweiterten Messprogramm gehören verschiedene Maßnahmen, wie die zusätzliche Salzgehaltsmessung an der Halter Brücke und die Durchführung mobiler Messungen in der Stauhaltung und im Deichvorland. Die temporäre Salzgehaltsmessung an der Halter Brücke überwacht das Einhalten des für diese Position vereinbarten Salzgehaltsgrenzwertes. Über zwei Messschiffe, die möglichst über die gesamte Staudauer zwischen Herbrum und Gandersum in der Fahrwassermitte Tiefenprofile der Gewässergüteparameter aufnehmen, wird eine Verdichtung der bereits bestehenden stationären Messung erreicht. Die Tiefenprofile haben einen Abstand von einem bis zwei Kilometern und werden in Tiefschritten von einem Meter von der Wasseroberfläche bis hinunter zur festen Gewässersohle, d.h. auch in der Flüssigschlickschicht, aufgenommen. Der gleichzeitige Einsatz eines Mehrfrequenz-Echolotes ermöglicht die detaillierte Aufnahme der festen Gewässersohle und der darauf befindlichen Flüssigschlickschicht. Im Weiteren kommt ein Messboot zur Unterstützung der Schiffsmessungen zum Einsatz und es finden Untersuchungen zur Schwebstoff- und Salzbelastung des Emsvorlandes statt.

Anhand der Stationsmessungen lässt sich bereits die Gewässergüteentwicklung während eines Staus interpretieren und diese z.B. der Verlagerung des Wasserkörpers zuordnen, die mobilen Messungen ermöglichen ergänzend die detaillierte Darstellung der Bewegungs- und

Transportvorgänge im Wasserkörper. Während der Überführung der AIDAnova wurde zusätzlich zu den Stationsmessungen ein erweitertes Messprogramm ausgeführt (Tabelle 4).

b. Gewässergüteverhältnisse zu Beginn des Staus

Die Wasserbeschaffenheit entlang der Tideems ist durch eine starke saisonale, tidebedingte und räumliche Variabilität gekennzeichnet. Die Unterschreitung eines kritischen Oberwasserzuflusses, welches zumeist im Sommer der Fall ist, führt zu einem stromauf gerichteten Nettotransport von Feststoffen und zu deren Akkumulation in der Unterems, oftmals bis zum Tidewehr in Herbrum. Dabei bildet sich an der Gewässersohle eine z.T. dicke Flüssigschlickschicht aus und in der Wassersäule treten hohe Schwebstoffkonzentrationen auf. Bei Zunahme der Wassertemperaturen führen diese Umstände zur Abnahme der Sauerstoffwerte. Besonders im oberen Abschnitt der Unterems sind im Sommer niedrige Sauerstoffkonzentrationen festzustellen. Von dort aus steigen die Sauerstoffgehalte in Richtung Herbrum und zur Außenems an, da einerseits über das Wehr sauerstoffreiches Wasser zufließt und andererseits der Tideeinfluss der sauerstoffreicheren Nordsee dazu führt. Generell nehmen die Salzgehalte von See her in Richtung Herbrum ab, wobei das salzhaltige Wasser mit sinkendem Oberwasserabfluss zunehmend in die Tideems vordringt. Die Charakteristik des Sommers kann sich bis weit in den Herbst hinein fortsetzen, wenn der Abfluss niedrig und die Wassertemperaturen hoch bleiben.

Die Randbedingungen des aktuellen Staus zur Überführung der AIDAnova waren geprägt durch einen niedrigen Oberwasserabfluss unmittelbar zu Staubeginn, sowie einer voran gegangenen außergewöhnlich langanhaltenden Trockenwetterphase. Die Salzgehalte, die sich in Folge dessen in der gesamten Unterems bis zum Staubeginn eingestellt hatten, waren überdurchschnittlich hoch. Als ungünstige Umstände sind weiterhin die leichte Sturmflut vom 3. Oktober, die also nur wenige Tage vor Staubeginn eingetreten war, und die erhöhte Salzkonzentration des über das Tidewehr bei Herbrum zulaufenden Wassers zu nennen. Die durch die Sturmflut verursachte deutliche Erhöhung der Salzgehalte (Halte 2,4 ‰) schien zwar bis zum Staubeginn wieder abgeklungen zu sein, dennoch ist nicht auszuschließen, dass die Salzgehaltsverteilung darüber hinaus durch dieses Ereignis beeinflusst war. Die Salzgehalte des Oberwasserzuflusses waren vermutlich wegen der geringeren Verdünnung des aus dem Steinkohlebergbau Ibbenbüren stammenden Abwassers gegenüber dem Mittelwert deutlich erhöht. Durch den Betrieb einer Steinkohlenlagerstätte (Ostfeld) und der Stilllegung des sogenannten Westfeldes im Kohleabbaugebiet Ibbenbüren (NRW) fallen seit 1981 erhebliche Mengen sehr stark mit u.a. Chlorid belastete Grubenwässer an, die in die Ibbenbürener Aa eingeleitet werden. Von dort gelangt das eingeleitete Salz über die Dreierwalder Aa, Speller Aa und Große Aa nördlich der Schleuse Gleesen in die Ems, wo je nach Oberwasserführung eine weitere Verdünnung erfolgt. Aufgrund der Trockenwettersituation fand in diesem Fall jedoch eine entsprechend geringere Verdünnung statt. Trotz der relativ geringen Zulaufmenge des Oberwassers spiegelte sich der erhöhte Salzgehalt im Abschnitt zwischen Herbrum und Papenburg mit Werten von knapp über 1 ‰ wider. Der geringe Abfluss der langen Trockenwetterphase hatte einen starken stromaufwärts gerichteten Nettotransport der Feststoffe bewirkt. Die hohe Intensität dieses Vorgangs hatte dazu geführt, dass das Material weit stromauf transportiert worden war und dieses zu einer Akkumulation von Feststoffen besonders im oberen Abschnitt der Unterems geführt hatte. Besonders im Abschnitt oberhalb von Leerort waren gegenüber dem vergleichbaren Zeitraum der Vorjahre höhere Schwebstoffkonzentrationen festzustellen. In diesem Bereich hatte sich eine mächtige Flüssigschlickschicht ausgebildet. Im Gegensatz dazu waren unterhalb von Leerort relativ niedrige Konzentrationen zu beobachten. Nach dem Temperaturmaximum Ende Juli/Anfang August war das Wasser stetig abgekühlt. Vor Staubeginn war die Wassertemperatur gegenüber dem langjährigen Mittelwert der betreffenden Kalenderwoche zwar noch leicht erhöht, trotzdem hatte das relativ niedrige Temperaturniveau insgesamt verhältnismäßig hohe Sauerstoffge-

alte zur Folge. Entsprechend der Schwebstoff-Längsverteilung war ein Gefälle des Sauerstoffniveaus festzustellen, mit höheren Sauerstoffgehalten im unteren Abschnitt der Unterems, sowie abnehmenden Werten in Richtung Papenburg.

Neben den vorgenannten saisonalen Kennzeichen weisen die Parameter Schwebstoff, Sauerstoff und Salzgehalt generell charakteristische Schwankungen innerhalb der Tide auf. So führt die Gezeit immer zur Bewegung der Abschnitte mit höherem bzw. niedrigerem Sauerstoffgehalt, was sich an den Messstationen durch Zu- bzw. Abnahme der Messwerte äußert. Das Absetzen und Aufwirbeln der Feststoffe, sowie deren Transport entlang des Flusses, führt zu einer ausgeprägten Schwankung der Schwebstoffkonzentration. Die Schwankung von Sauerstoff und Schwebstoff erfolgt entlang der Ems aus den vorgenannten Gründen nicht überall gleich. – So können während der Flutphase im unteren Abschnitt die Sauerstoffwerte zunehmen und die Schwebstoffgehalte sinken, während zur gleichen Zeit im oberen Abschnitt ein gegenläufiges Verhalten zu beobachten ist. Die Salzgehalte weisen ebenfalls stets eine typische Schwankung innerhalb der Tide auf, mit einer Zunahme während der Flut bzw. Abnahme in der Ebbephase.

Im betrachteten Zeitraum führten die vorgenannten Prozesse dazu, dass während der Flutphase im unteren Emsabschnitt, bis zur Messstation Weener, die Sauerstoffwerte zunahmen, sowie in der oberhalb davon gelegenen Strecke abnahmen. Während der Ebbe bot sich dagegen das umgekehrte Bild. Zum Schließzeitpunkt des Emssperrwerks (um Tidehochwasser) waren somit in der unteren Stauhaltung gerade die höchsten Sauerstoffwerte der zurückliegenden Flut eingetreten, während in der oberen Stauhaltung die niedrigsten Sauerstoffkonzentrationen dieser Tidephase vorhanden waren. Gleichzeitig waren zum Schließzeitpunkt im unteren Abschnitt der Stauhaltung niedrige Schwebstoffgehalte und im oberen Abschnitt hohe Konzentrationen zu verzeichnen.

Der Stau zur Überführung der AIDAnova fand im Rahmen des Planfeststellungsbeschlusses vom 17.07.2015 statt. Damit verbunden war eine Aussetzung der Sauerstoffrandbedingung, nach der, unter Berücksichtigung der aktuellen Wassertemperatur, vor Staubeinbruch ein Sauerstoffgehalt von ≥ 5 mg/l hätte vorhanden sein müssen (als Mittelwert der Flutphase vor Staubeinbruch); die tatsächliche Konzentration betrug $\geq 3,7$ mg/l (siehe Tabelle 5). Auch die Salzgehaltsrandbedingung war ausgesetzt. – In dieser ist festgeschrieben, dass während des Staus der maximale Salzgehalt an der Halter Brücke nicht über 2 ‰ betragen darf (siehe dazu nächstes Kapitel).

Tabelle 5 Übersicht der Gewässergüte zu Staubeinbruch, sowie der mittleren Sauerstoffkonzentrationen der vorhergehenden Flutphase ¹⁾

Messstation	Position [Unterems-Km] <small>(Unterems-Km 0 befindet sich bei Papenburg)</small>	Wassertemperatur zu Staubeinbruch [°C]	Mittl. Sauerstoffkonzentration vor Staubeinbruch [mg/l] ¹⁾	Sauerstoff zu Staubeinbruch [mg/l]	Salz zu Staubeinbruch [‰]	Schwebstoff zu Staubeinbruch [g/l]
Gandersum	31,7	13,5	7,4	7,5	23,0	< 0,5
Terborg	24,6		6,8	7,8	14,3	< 1
Leerort	14,7		5,3	6,2	4,4	< 2
Weener	6,9		3,7	4,5	2,6	< 25 ⁴⁾
Papenburg	0,4		3,7	2,3	1,3	< 25 ⁴⁾
Halte ²⁾	-0,7		--	--	1,2	--
Herbrum ³⁾	-12		10	10	0,9	--

- 1) Mittelwert über die Flutphase, die mit dem Staubeginn endet
- 2) Nur Leitfähigkeitsmessung (Salzgehalt)
- 3) Ohne Tideeinfluss, da Messstation oberhalb des Tidewehrs gelegen
- 4) Etwa eine 1 Stunde vor Staubeginn betrug die Schwebstoffkonzentration noch > 25 g/l. Aufgrund der zum Staubeginn vorhandenen Tideverhältnisse bzw. dem charakteristischen Tideverhalten in der oberen Unterems, bei denen geringe Strömungsgeschwindigkeiten über einen längeren Zeitraum um Tidehochwasser auftreten, hatten sich bis zum Staubeginn die Schwebstoffpartikel bereits zum größten Teil abgesetzt.

c. Verhalten der Gewässergüte während des Staus

Die Messungen zu den bisherigen Staufällen zeigen, dass die Ems im aufgestauten Abschnitt nie zur Ruhe kommt. Denn nach Schließen des Sperrwerks klingt die Tidebewegung ab und die Dichteströmung setzt zunehmend ein. Diese wird durch den Salzgehaltsunterschied entlang der Ems hervorgerufen (höherer Salzgehalt bei Gandersum als bei Papenburg). Dabei bewegt sich salzhaltigeres Wasser im Sohlbereich von Gandersum in Richtung Papenburg und an der Wasseroberfläche in die entgegengesetzte Richtung. Unterstützt wird diese Bewegung durch den steten Zufluss von Frischwasser über das Tidewehr in Herbrum. Im Weiteren findet generell eine starke Abnahme der Schwebstoffkonzentration sofort nach Staubeginn statt. Bei Vorhandensein einer Flüssigschlickschicht (Fluid Mud) an der Sohle, stellt sich eine deutliche Grenze zwischen Wasserkörper und Schlickschicht ein. Das salzhaltigere Wasser bewegt sich auf der Flüssigschlickschicht, ohne sich mit dieser in stärkerem Maße zu vermischen. Zum Ende des Staus setzt durch die stufenweise Öffnung des Emssperrwerks eine Strömung in Richtung Gandersum ein, wodurch sich ein entsprechender Versatz des Wasserkörpers und seiner Inhaltsstoffe ergibt. In den Berichten der bisherigen Staufälle ist der grundsätzliche Verlauf dieser Vorgänge detailliert dokumentiert.

Aspekt Salz

Zu Beginn des Staus lag ein Gefälle des Salzgehaltes in der Stauhaltung von Gandersum in Richtung Herbrum vor. Die sohnah installierten Messstationen zeigten im Verlauf des Staus folgende Konzentrationen an:

Tabelle 6 Übersicht der Salzgehaltentwicklung; Quelle: Messstationen und Schiffsmessungen (Messung im Sohlbereich oberhalb der Flüssigschlickschicht)

Messstation	Position [Unterems-Km] (Unterems-Km 0 befindet sich bei Papenburg)	zu Staubeginn [‰]	zu Stauende ¹⁾ [‰]
Gandersum	31,7	23,0	21,0 (23,7)
Terborg	24,6	14,3	21,4 (22,6)
Leerort	14,7	4,4	18,0 (20,8)
Weener	6,9	2,6	14,5
Papenburg	0,4	1,3	10,6
Halte	-0,7	1,2	8,2 (8,6)
Herbrum	-12	0,9	0,8

- 1) Die nach Beginn der stufenweisen Öffnung des Emssperrwerks einsetzende Strömung tritt mit zunehmender Distanz mit entsprechender zeitlichen Verzögerung ein. Es wurde an jeweiligem Ort der Salzgehalt zum Stauende ausgewählt, der unmittelbar vor Einsetzen der Strömung vorhanden war. Falls während des Staus ein höherer Salzgehalt als am Stauende vorhanden war, ist dieser Maximalwert in Klammern hinzugefügt.

Im Betriebsplan für das Emssperrwerk ist festgelegt, dass bis zum Abschluss des Staufalls an der Emsbrücke bei Halte (Unterems-Km -0,7) sohlnah ein Salzgehalt von 2 ‰ nicht überschritten werden darf. Diese Bedingung wurde mit dem Planfeststellungsbeschluss vom 17.07.2017 für insgesamt fünf zu überführende Werfschiffe ausgesetzt, u.a. für den Staufall zur Überführung der AIDAnova.

Im aktuellen Stau wurde der o.g. Grenzwert deutlich überschritten. Zu Beginn reichte der Wasserkörper mit einem Salzgehalt von ≥ 2 ‰ bis etwa Km 4,5 (zwischen Mark und Stapelmoor). Während des Staus bewegte sich das salzhaltige Wasser im Sohlbereich stromauf, so dass an der Messstation Halte ein maximaler Salzgehalt von 8,6 ‰ erreicht wurde. Der Grenzwert von 2 ‰ wurde an der Brücke in der rd. 32. Stunde überschritten. Zum Ende des Staus reichte das Wasser mit einem Salzgehalt von ≥ 2 ‰ bis etwa Km -5,3 (Brual).

Nach dem Schließen des Emssperrwerks und dem Ausklingen der Tidebewegung tritt generell die Dichteströmung zunehmend in Erscheinung. Ursache dafür ist der Salzgehaltsgradient, und damit das Dichtegefälle entlang der Stauhaltung. Das daraus resultierende Vordringen des salzhaltigen Wassers aus Richtung Gandersum erfolgt in einer Gestalt, die auch als Salzunge oder Salzkeil umschrieben und die Spitze als Salzfront bezeichnet wird. Der Vortrieb wird durch den Pumpbetrieb des Emssperrwerks unterstützt. Im aktuellen Fall waren die Pumpen in den ersten rd. 28 Stunden eingeschaltet und förderten in dieser Zeit Wasser mit einem Salzgehalt von Mittel 26 ‰ in die Stauhaltung. Beim Eintreffen der Salzfront steigt der Salzgehalt an jeweiligem Ort zügig, zumeist sogar sprunghaft an. Als Reaktion darauf setzt an der Wasseroberfläche der Stauhaltung eine Gegenströmung in Richtung Gandersum ein, mit der salzärmeres Wasser in den unteren Abschnitt fließt. An der Messstation Leerort betrug der Salzgehalt bis 07.10. um 19:45 Uhr rd. 5 ‰ und stieg anschließend auf rd. 21 ‰ an. An der Messstation Weener war bis 08.10. um 06:00 Uhr ein Salzgehalt von rd. 3 ‰ vorhanden und nahm im weiteren Verlauf bis rd. 14 ‰ zu. An der Messstation Papenburg stieg der Salzgehalt am 08.10. nach 16:35 Uhr von 1,5 auf 9,5 ‰ und an der Messstation Halte nach 17:35 Uhr von 1,5 auf 8,6 ‰ (jeweils an der Gewässersohle).

Die von den Messschiffen und dem Messboot aufgenommenen Tiefenprofile zeigen ein detailliertes Bild der Salzgehaltsverteilung im Wasserkörper. Dabei werden die Unterschiede in der zeitlichen Entwicklung im Sohlbereich und an der Wasseroberfläche verdeutlicht. Zu Beginn des Staus vollzog sich im Sohlbereich, oberhalb der Flüssigschlickschicht, eine leichte Abnahme der Salzgehalte unterhalb von etwa Km 26 (unterhalb Terborg) bis Gandersum. Ursache dafür war offenbar das in diesem Abschnitt große Salzgehaltsgefälle und die dadurch zügig einsetzende Strömung in Richtung Terborg, sowie die Ausgleichströmung an der Wasseroberfläche, durch die salzärmeres Wasser aus Richtung Terborg nach Gandersum floss und den Salzgehalt bis in den Sohlbereich anhub. Offenbar wurden die dortigen Verhältnisse durch das Zufließen salzärmeren Wassers bestimmt und nicht durch das über den Schöpfbetrieb zugeführte salzhaltigere Wasser. Zwischen Km 24 (oberhalb Terborg) und etwa Km -5,3 (Brual) führte im weiteren Verlauf des Staus das Vordringen salzhaltigen Wassers zum Anstieg der Salzgehalte im Sohlbereich. Zwischen Brual und Herbrum war kaum eine Änderung feststellbar. Die Schiffspassage führte im Sohlbereich zur Abnahme der Salzgehalte. Dabei wurde eine Verminderung um 2 bis 3 ‰ bis Terborg beobachtet. Nachdem das Werfschiff Terborg passiert hatte, begann die stufenweise Öffnung des Sperrwerks, womit eine Strömung in Richtung Gandersum und damit eine Abnahme der Salzgehalte in der Stauhaltung einsetzte.

An der Wasseroberfläche vollzog sich unterhalb von Km 16 (Bingum) eine Abnahme der Salzgehalte, am deutlichsten im Abschnitt unterhalb von Km 22 (Jemgum). Oberhalb von Km 16 waren an der Wasseroberfläche kaum Änderungen zu verzeichnen. Die Passage des Werfschiffes verursachte eine Vermischung im Wasserkörper und führte dadurch zur Zunahme der Salzgehalte an der Wasseroberfläche zwischen Km 0 (Papenburg) und etwa 25 (Terborg), am stärksten oberhalb von Km 15 (Leerort).

Die im Sohlbereich installierten stationären und zeitlich hoch aufgelösten Messungen bestätigen die mobilen, räumlich hoch aufgelösten Aufnahmen, so dass die Bewegungs- und Transportvorgänge im Wasserkörper der Stauhaltung entsprechend detailliert beschrieben werden können.

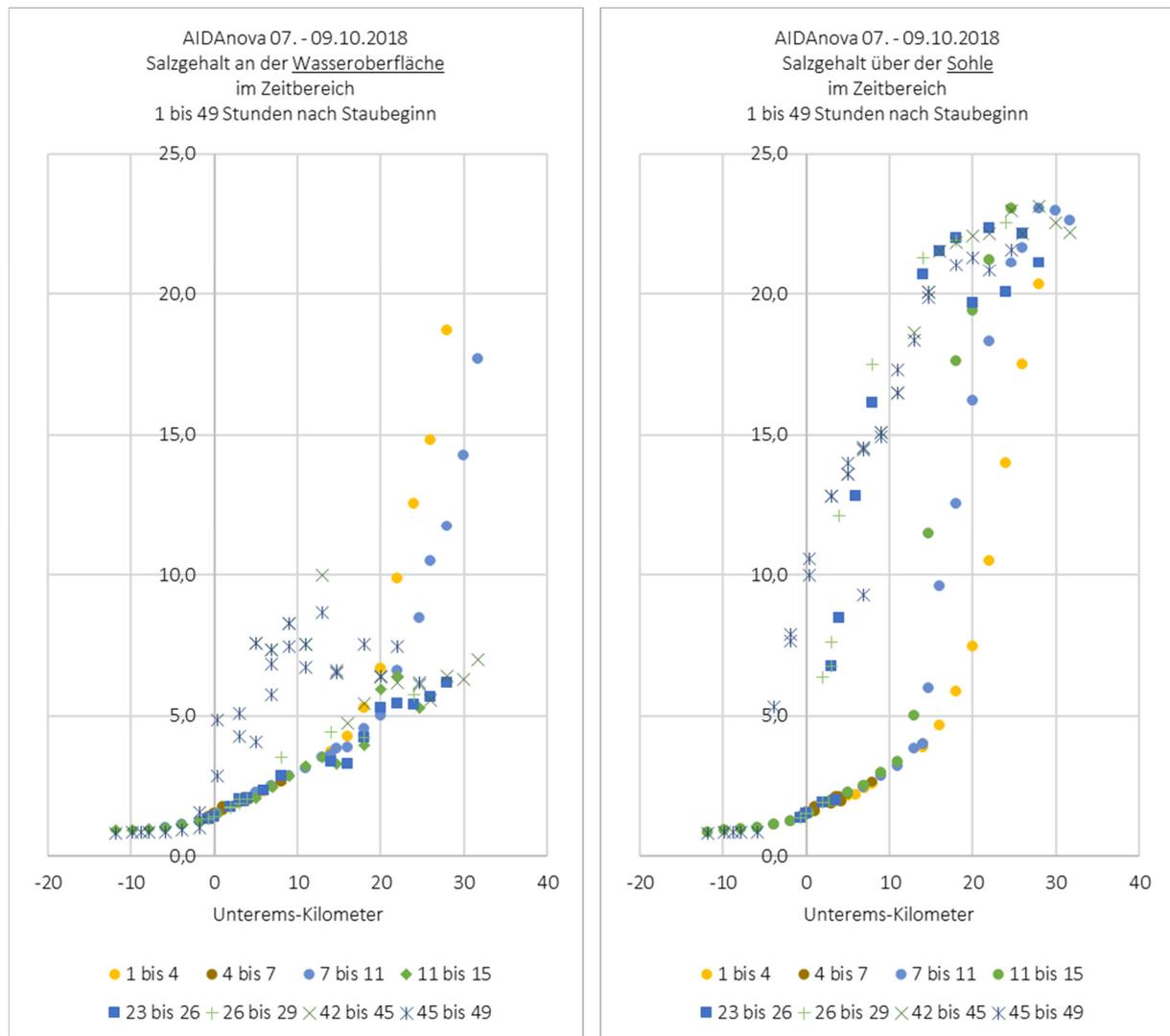


Abbildung 1 Salzgehalt [%] zwischen Herbrum und Gandersum (Ems-Kilometrierung auf x-Achse) an der Wasseroberfläche und im Sohlbereich (oberhalb der Flüssigschlickschicht) in den jeweiligen Zeitbereichen, Angabe der Zeitbereiche in Stunden nach Staubbeginn; Quelle: Längsfahrten der Messschiffe und des Messbootes

Zwischen Terborg und Halte wurden an insgesamt zehn Stationen die Salzgehalte im Vorland aufgenommen. Die erste Messung fand nach Ausuferung am Vormittag des 08.10. statt und die zweite Messung erfolgte am Vormittag des 09.10., und damit nach der Schiffspassage und nur kurze Zeit vor Abnahme der Salzgehalte in Folge der stufenweisen Öffnung des Emssperwerks. Damit kann die zeitliche Entwicklung der Salzgehalte auf dem Vorland, unter Einfluss der Salzausbreitung in der Stauhaltung und der Durchmischung durch die Überführungsfahrt des Werfschiffes, nachvollzogen werden. Das nach Ausuferung auf dem Vorland befindliche Wasser wies kaum andere Salzgehalte als an der Wasseroberfläche der Ems auf. Dabei war zumeist kein Quergefälle auf dem Vorland, von der Ems zum Deichfuß, festzustellen. Bis zur darauf folgenden Messung waren die Salzgehalte der Ems angestiegen (s.o.). Zudem hatte das Werfschiff seine Überführungsfahrt von Papenburg nach Gandersum

bereits absolviert. Die Messungen zeigten unterhalb von Leerort und bei Halte keine Änderung der Salzgehalte auf den Vorländern. Im Abschnitt zwischen Leerort und Papenburg wurden am Ende des Staus auf den Vorländern in Ufernähe höhere Salzwerte als zu Beginn der Ausuferung gemessen. Allerdings waren dort niedrigere Salzgehalte als in der Fahrwassermitte der Ems zu verzeichnen, so dass sich deren Erhöhung nicht bis auf das Vorland durchgesetzt hatte. Auf dem Vorland existierte ein deutlicher Salzgehaltsgradient von der Ems zum Deichfuß. Dabei waren die Werte in Vorlandmitte gegenüber der Vormessung nur gering oder gar nicht erhöht. In Deichfußnähe war in allen Fällen keine Änderung der Salzgehaltswerte festzustellen.

Entwicklung der Schwebstoffkonzentration

Die hohe tidebedingte Schwebstoffkonzentration nahm zu Beginn des Staus mit Abklingen der Tidebewegung stark ab. Im weiteren Verlauf des Staus setzte sich dieser Vorgang fort. Die Tiefenprofile der ersten Messfahrt zeigten neben den bereits stark reduzierten Schwebstoffkonzentrationen bereits eine geringe Variabilität der Werte von der Wasseroberfläche bis zur Flüssigschlickschicht an der Sohle. Zum Ende des Staus waren entlang der gesamten Stauhaltung über die gesamte Wassertiefe Werte von $< 0,1$ g/l vorhanden. Dabei stimmen die oberhalb der Schlickschicht ermittelten Daten der Messstationen gut mit den entsprechenden Werten der mobilen Messungen überein.

Tabelle 7 Übersicht der Schwebstoffentwicklung; Quelle: Messstationen und Schiffsmessungen (Messwerte im Sohlbereich oberhalb der Flüssigschlickschicht)

Messstation	Position [Unterems-Km] <small>(Unterems-Km 0 befindet sich bei Papenburg)</small>	zu Staubeginn ¹⁾ [g/l]	zu Stauende ⁴⁾ [g/l]
Gandersum	31,7	0,2 (2,1)	<0,1
Terborg	24,6	0,7 (2,5)	<0,1
Leerort	14,7	1,9 (9,3)	<0,1
Weener	6,9	>10 ²⁾	<0,1
Papenburg	0,4	>10 ²⁾	<0,1
Halte	-0,7	³⁾	<0,1
Herbrum	-12	³⁾	<0,1

- 1) Sofern in der vorhergehenden Flutphase höhere Schwebstoffkonzentrationen als zu Staubeginn vorhanden waren, sind diese als Klammerwert aufgeführt.
- 2) Durch die sohlnahe Installation der Sonden tauchten diese vermutlich bereits vor Tidehochwasser in die Flüssigschlickschicht ein, so dass für den Sohlbereich kein repräsentativer Wert anzugeben ist.
- 3) An der Station Herbrum, oberhalb des Tidewehres, und an der Station Halte erfolgt keine Messung der Schwebstoffkonzentration. Zwischen Tidewehr und Papenburg existieren somit lediglich mobile Messungen. Die Messung der ersten Fahrt erfolgte bei Halte rd. 4 Stunden nach Schließen des Emssperrwerks. Die Schwebstoffgehalt wird zu Staubeginn in etwa so hoch gewesen sein wie an der rd. 1,1 Km unterhalb gelegenen Station Papenburg. Im Abschnitt zwischen Tidewehr Herbrum und Halte erfolgte die erste Messung etwa 11 Stunden nach Staubeginn, so dass die dabei ermittelten Werte nicht mehr den Ausgangszustand repräsentieren.
- 4) Schwebstoffkonzentration vor stufenweiser Öffnung des Emssperrwerks.

An den Messstationen Papenburg, Weener und Leerort war durch den Überführungsvorgang eine kurzfristige Zunahme der Konzentrationen zu registrieren. Auch die mobilen Messungen

zeigten bereits kurze Zeit nach der Überführungsfahrt kaum noch erhöhte Werte. Da die Sonden der Stationen sohlennah installiert sind, tauchten diese bei Papenburg und Weener durch Verlagerung der Flüssigschlickschicht bzw. Anhebung deren Oberfläche temporär darin ein, so dass für geraume Zeit eine hohe Feststoffmenge registriert wurde. Allerdings ist davon auszugehen, dass die Schwebstoffkonzentration durch Vorbeifahrt des Schiffes ansteigt, die an den Stationen gemessenen sehr hohen Werte aber nicht den tatsächlichen Schwebstoffkonzentrationen des Wassers oberhalb der Schlickschicht entsprach, sondern durch die o.g. Anhebung der Flüssigschlickschicht beeinflusst waren. Der Setzungsprozess der Schlickschicht nach Durchfahrt des Werftschiffes und des damit einhergehenden Absinkens der Schlickoberfläche gab die Sonden nach bestimmter Zeit wieder frei, so dass diese danach wieder im Wasser statt im Schlick gemessen hatten. Das plötzliche Absinken des Konzentrationswertes zu diesem Zeitpunkt ist ein deutliches Zeichen dieses Vorgangs. Unterhalb von Leerort war an den Messstationen keine Zunahme der Schwebstoffkonzentration durch Vorbeifahrt des Werftschiffes feststellbar.

Die Flüssigschlickschicht an der Gewässersohle war zwischen Emssperwerk und der Übertiefe bei etwa Km 26 (unterhalb von Terborg) nur sehr dünn ($<<0,5\text{m}$). Oberhalb dieses Abschnittes befand sich um Km 25 (Terborg) eine Schicht von 1 bis 1,5 m Dicke, die in Richtung Km 21 (etwa Jemgum) auslief. Im Abschnitt bis Km 15 (Leerort) waren Schichtdicken von $<0,5\text{ m}$ anzutreffen. Oberhalb davon war bis etwa Km 10 (Weekeborger Bucht) eine Stärke von etwa 1 m vorhanden, die in Richtung Papenburg auf eine Mächtigkeit von 4 m zunahm.

Die Messung der Feststoffablagerung auf dem Vorland erfolgte an ausgewählten Positionen zwischen Oldersum und Papenburg. Bei Oldersum (Unterems-Km 30), Sautel (etwa Km 23), Nüttermoor (etwa Km 20), Middelstenborgum (etwa Km 12), Weener (etwa Km 7) und Papenburg (Km 0,4) weisen die Vorländer eine ausreichende Breite auf, um das Absetzverhalten in einem Querschnitt vom Ufer in Richtung Deichfuß zu ermitteln. Dabei erfolgte die Messung zumeist in Ufernähe, in der Mitte des Vorlandes und in Deichfußnähe, und zwar jeweils an mehreren Punkten. Die Verteilung der Querschnitte verleiht einen Eindruck über das Absetzverhalten entlang der Stauhaltung, die Anordnung der Messlokationen innerhalb des Querschnittes ermöglicht eine Bewertung der Ablagerung zwischen Emsufer und Deichfuß, die redundante Messung an jeder Messlokation lässt einen Rückschluss auf die Streuung des Absetzvorgangs zu.

Breits bei Präparation der Testflächen wurden die Vorländer z.T. nass vorgefunden und ein Grauschleier auf der Vegetation festgestellt. Ursache dafür war die nur wenige Tage vor Staubeginn eingetretene Sturmflut (03.10.2018), deren Scheitel etwa 1,3 m über dem mittleren Tidehochwasser lag und damit alle Vorländer mit stark schwebstoffhaltigem Wasser überflutet hatte.

In Ufernähe wurde in Oldersum mit etwa 6 g/m^2 der geringste Wert und im Papenburg mit etwa 95 g/m^2 der höchste Wert festgestellt (jeweils Mittelwert). Im Abschnitt dazwischen wurden in Ufernähe zwischen 12 g/m^2 (Sautel) und 44 g/m^2 (Nüttermoor) ermittelt. Optisch wurde nur ein leichter Grauschleier auf der Vegetation und eine Ablagerung am Boden von zumeist $< 1\text{mm}$ und in Ausnahmen (Papenburg) $<2\text{ mm}$ wahrgenommen. Die bei Papenburg in Ufernähe gemessene Ablagerung weicht signifikant von der an den anderen Messpositionen festgestellten Mengen ab. Es ist davon auszugehen, dass die stärkere Ablagerung durch die Schiffspassage verursacht wurde, so wie es auch schon bei vorhergehenden Schiffsüberführungen an dieser Stelle beobachtet wurde. Der Grund dafür ist, dass unweit von der Messposition die Überführungsfahrt mit der Passage der Dockschleuse beginnt und danach das Werftschiff im Fahrwasser auszurichten ist. Bei diesem Manöver kann durch den Antrieb des Werftschiffes oder der unterstützenden Schlepper schwebstoffhaltiges Wasser aus dem engen Flussquerschnitt auf das Vorland gespült werden.

Im Bereich des Deichfußes lagerten sich zwischen 0 g/m² (Weener) und 15 g/m² (Middelstenborgum) ab. Bei Oldersum wurden etwa 2 g/m² und bei Papenburg etwa 6 g/m² ermittelt. Damit wurde ein deutliches Gefälle der Ablagerungen vom Ufer zum Deich festgestellt. In der Mitte der Vorländer waren Werte zwischen etwa 8 g/m² und 24 g/m² zu bestimmen.

Mit Zunahme der mittleren Ablagerungsmenge an einer Messlokation nahm auch die Streuung der Einzelwerte zu. Es ist somit davon auszugehen, dass gerade höhere Ablagerungen nicht gleichmäßig stattfanden, sondern es in jeweiligen Bereichen auch Stellen mit höherer oder niedrigerer Sedimentation gab. Dieses trifft besonders für den Uferbereich des Profils Papenburg zu.

Bereits vor dem Stau wies die Vegetation z.T. einen Grauschleier auf. Ursache dafür war die Sturmflut des 03.10.18. An einigen Positionen wurde nach dem Stau sogar ein weniger intensiver Grauschleier als vor dem Stau beobachtet. Es ist nicht auszuschließen, dass die nach dem Stau auf den Testflächen befindlichen Feststoffmengen von einer Umlagerung auf dem Vorland stammten und nicht während des Staus aus der Ems kamen.

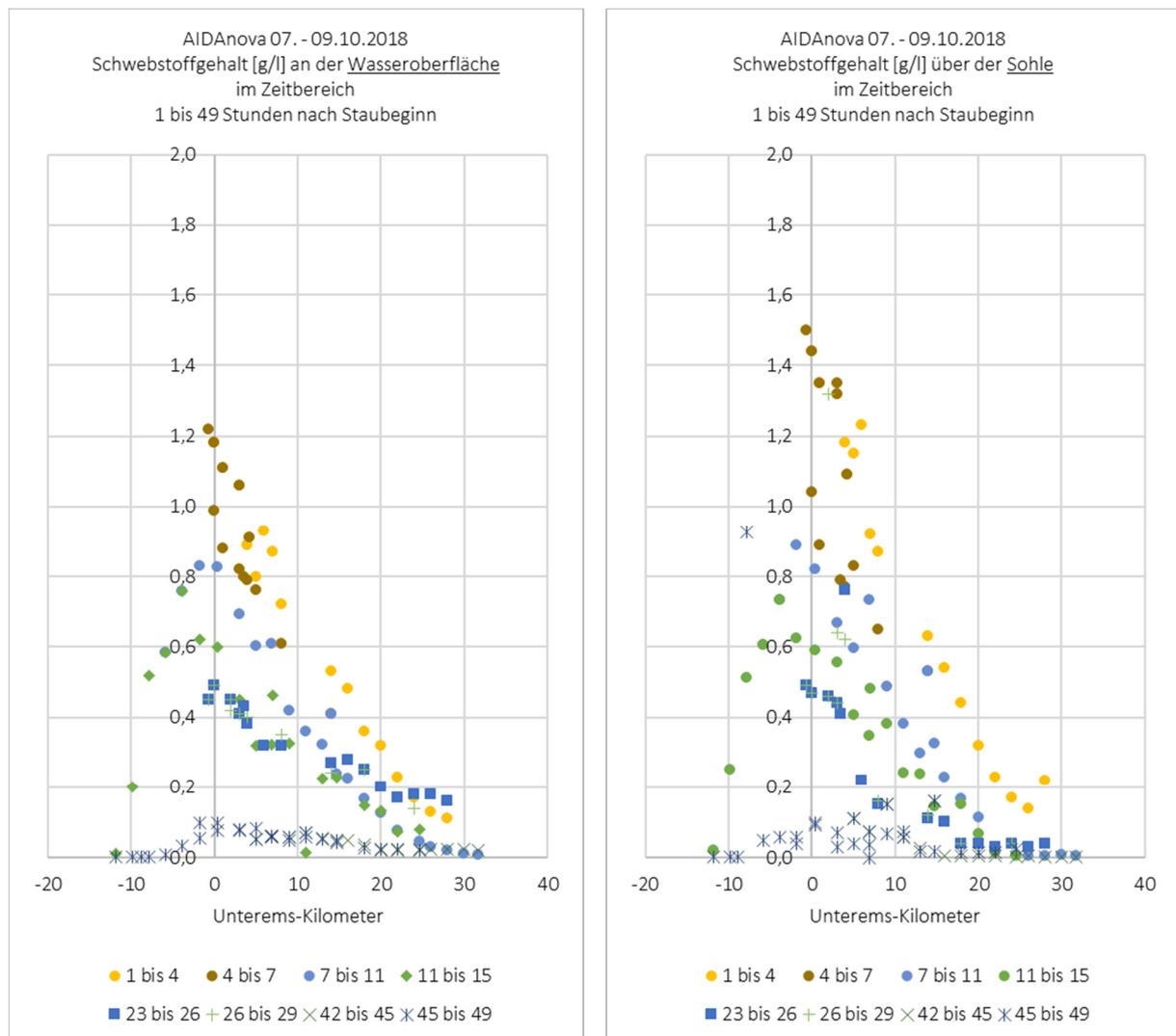


Abbildung 2 Schwebstoffgehalt [g/l] zwischen Herbrum und Gandersum (Ems-Kilometrierung auf x-Achse) an der Wasseroberfläche und im Sohlbereich (oberhalb der Flüssigschlickschicht) in den jeweiligen Zeitbereichen, Angabe der Zeitbereiche in Stunden nach Staubeginn; Quelle: Längsfahrten der Messschiffe und des Messbootes

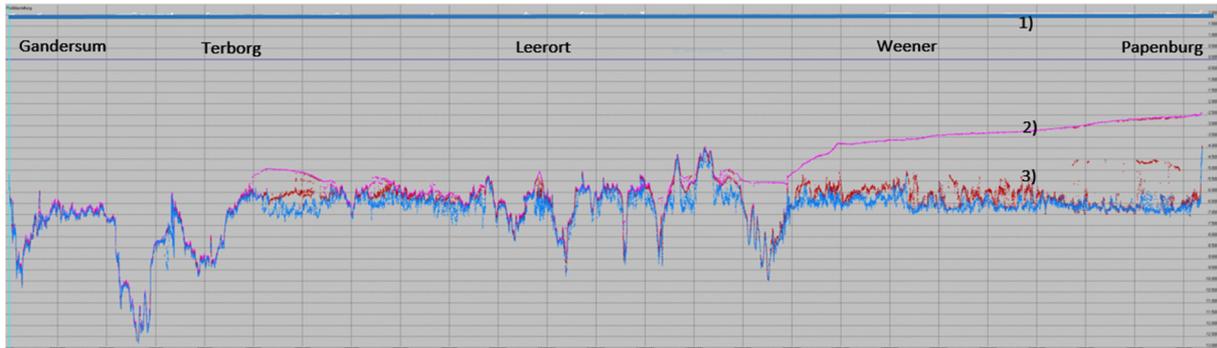


Abbildung 3 Gestalt der Flüssigschlickschicht im Sohlbereich zwischen Gandersum und Papenburg während der ersten Vermessungsfahrt (7 bis 11 Stunden nach Staubeginn); Skalierung der horizontalen Gitternetzlinien: 0,5 m (Quelle: NLWKN Forschungsstelle Küste Norderney)

- 1) Wasserstand (NHN + 2,1 bis + 2,2 m)
- 2) Oberfläche der Flüssigschlickschicht
- 3) Feste Sohle

Aspekt Sauerstoff

Zu Beginn des Staus lag eine für das Sommerhalbjahr typische Verteilung der Sauerstoffgehalte in der Stauhaltung vor. Entsprechend der Schwebstoff-Längsverteilung war ein Gefälle des Sauerstoffniveaus festzustellen, mit höheren Sauerstoffgehalten im unteren Abschnitt der Unterems, sowie abnehmenden Werten in Richtung Papenburg. Nach dem Temperaturmaximum Ende Juli/Anfang August war das Wasser stetig abgekühlt. Vor Staubeginn war die Wassertemperatur gegenüber dem langjährigen Mittelwert der betreffenden Kalenderwoche zwar noch leicht erhöht, trotzdem hatte das relativ niedrige Temperaturniveau insgesamt verhältnismäßig hohe Sauerstoffgehalte zur Folge. Die sohnah installierten Messstationen zeigten im Verlauf des Staus folgende Konzentrationen an (Tab. 8).

Tabelle 8 Übersicht der Sauerstoffentwicklung; Quelle: Messstationen und Schiffsmessungen (Messung im Sohlbereich oberhalb der Flüssigschlickschicht)

Messstation	Position [Unterems-Km] (Unterems-Km 0 befindet sich bei Papenburg)	zu Staubeginn [mg/l]	zu Stauende ¹⁾ [mg/l]
Gandersum	31,7	7,5	7,1 (7,7)
Terborg	24,6	7,8	7,9 (8,0)
Leerort	14,7	6,2	7,1 (7,6)
Weener	6,9	4,5	7,5 ²⁾
Papenburg	0,4	2,3	5 – 6 ³⁾
Halte ⁴⁾	-0,7	--	--
Herbrum ⁵⁾	-12	10	10

- 1) Die nach Beginn der stufenweisen Öffnung des Emssperrwerks einsetzende Strömung tritt mit zunehmender Distanz mit entsprechender zeitlichen Verzögerung ein. Es wurde an jeweiligem Ort der Sauerstoffhalt zum Stauende ausgewählt, der vor Einsetzen der Strömung vorhanden war. Falls während des Staus ein höherer Sauerstoffgehalt als am Stauende vorhanden war, ist dieser Maximalwert in Klammern hinzugefügt.
- 2) Ausfall der Sauerstoffmessung 38. Stunden nach Staubeginn. Zu diesem Zeitpunkt betrug der Sauerstoffgehalt 7,5 mg/l.
- 3) stark schwankend

- 4) Bei Halte erfolgt keine stationäre Sauerstoffmessung. In diesem Abschnitt existieren somit lediglich Schiffsmessungen. Die Messung der ersten Messfahrt erfolgte hier mehrere Stunden nach Schließen des Emssperrwerks ($> 6 \text{ mg/l}$) und repräsentiert somit nicht die Sauerstoffverhältnisse zu Staubeginn. Rund eine Stunde vor Beginn der stufenweisen Öffnung des Sperrwerks fand im Bereich Halte die letzte Aufnahme eines Tiefenprofils statt.
- 5) Ohne Tideeinfluss, da Messstation oberhalb des Tidewehrs gelegen

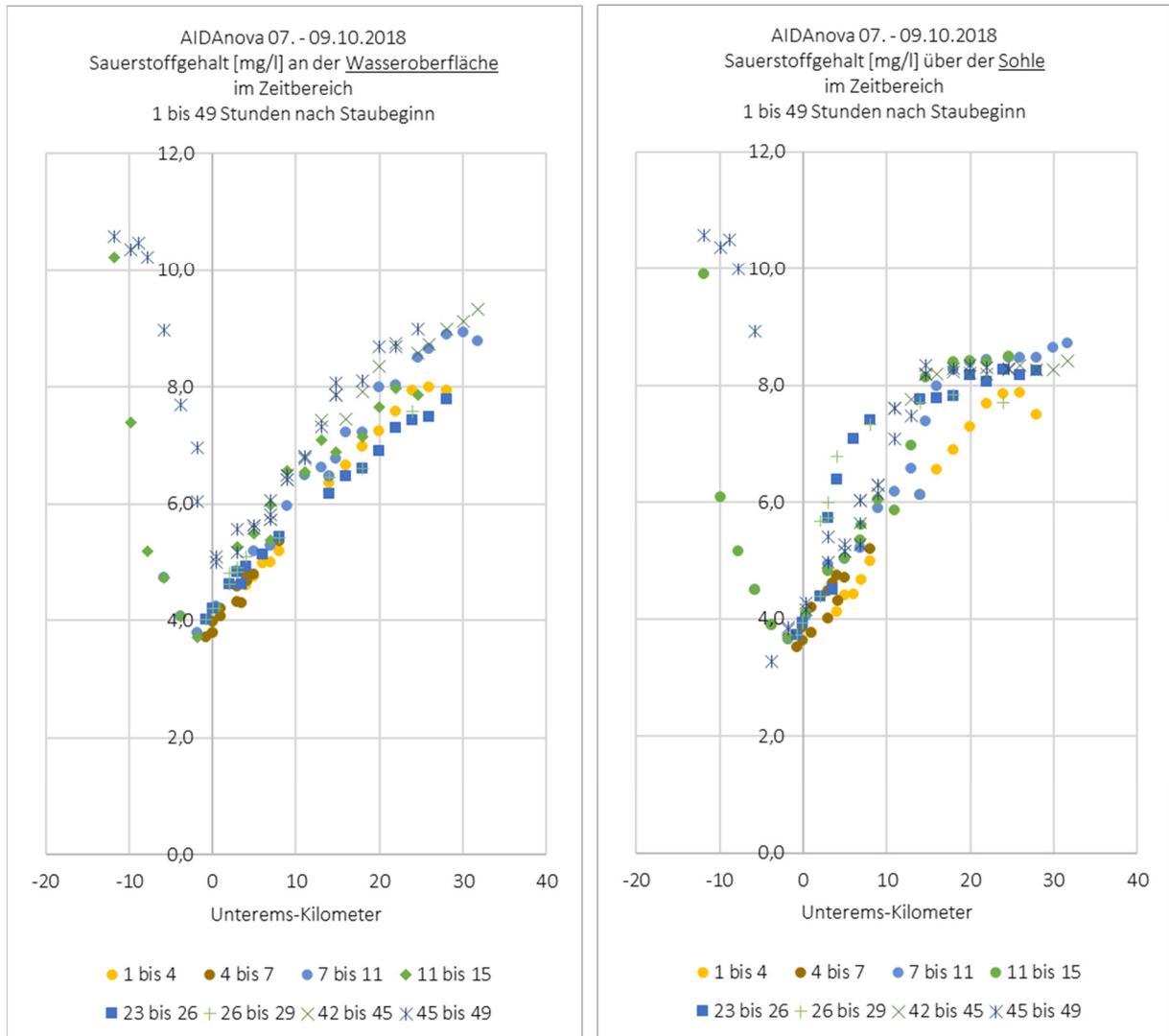


Abbildung 4 Sauerstoffgehalt [mg/l] zwischen Herbrum und Gandersum (Ems-Kilometrierung auf x-Achse) an der Wasseroberfläche und im Sohlbereich (oberhalb der Flüssigschlickschicht) in den jeweiligen Zeitbereichen, Angabe der Zeitbereiche in Stunden nach Staubeginn; Quelle: Längsfahrten der Messschiffe und des Messbootes

Anhand der von den Messschiffen aufgenommenen Tiefenprofile lässt sich eine Zunahme des Sauerstoffgehaltes an der Wasseroberfläche ermitteln. Am stärksten nahmen die Sauerstoffwerte oberhalb von Papenburg zu. Die in Abbildung 4 dargestellten Sauerstoffgehalte zeigen keine niedrigeren Werte im Zeitbereich nach Durchgang des Werfschiffes (nach 42. Stau-stunde). Somit ist davon auszugehen, dass die Schiffspassage allenfalls für nur sehr kurze Zeit zur Abnahme der Sauerstoffwerte an der Wasseroberfläche im Abschnitt zwischen Papenburg und Gandersum führte.

Auch im Sohlbereich nahm die Sauerstoffkonzentration deutlich zu. Am stärksten war die Zunahme im Abschnitt oberhalb von Papenburg, sowie zwischen etwa km 3 (Stapelmoor) und

etwa km 20 (im Bereich Jemgum). Die deutliche Zunahme der Sauerstoffgehalte im Sohlbereich unterhalb von Stapelmoor war auf die Dichteströmung und das über die Sperrwerkspumpen hinzugefügte Wasser zurückzuführen (siehe *Aspekt Salzgehalt*). Da das salzhaltigere Wasser im unteren Abschnitt der Ems ebenfalls einen höheren Sauerstoffgehalt besaß, breitete sich mit der Dichteströmung sauerstoffreiches Wasser von Gandersum in Richtung Papenburg aus.

Nach der Schiffspassage wurde im Sohlbereich ein niedrigerer Sauerstoffwert als vor dem Durchgang des Schiffes registriert (s. Abbildung 4), da dieses den sauerstoffarmen Flüssigschlück aufgewirbelt hatte. Am stärksten nahm der Sauerstoff im Abschnitt zwischen Stapelmoor und etwa Leerort ab, also dort, wo vorher eine starke Zunahme festgestellt worden war. Unterhalb von Leerort sanken die Sauerstoffwerte nur geringfügig durch die Schiffspassage. Die Konzentrationen blieben überall über den Werten zu Beginn des Staus (siehe auch Abbildung 5).

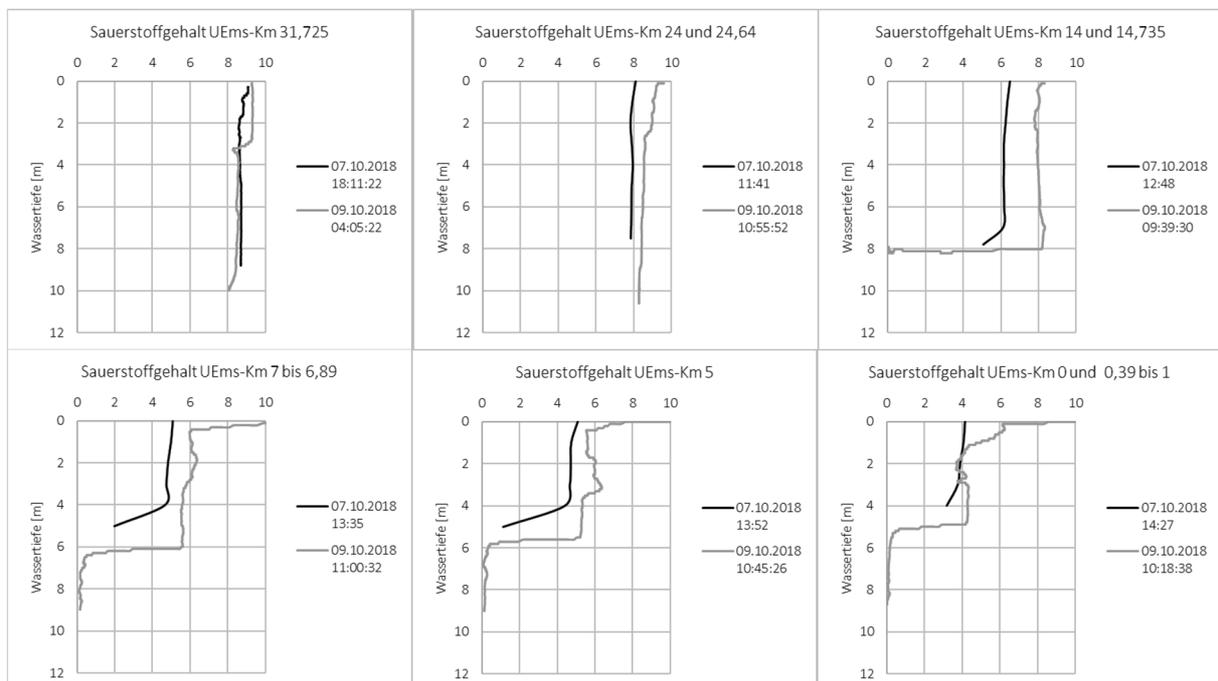


Abbildung 5 Tiefenprofile des Sauerstoffgehalts der ersten (schwarz) und letzten (grau) Messfahrt. (Anmerkung: die Messungen, die gleich zu Staubeginn möglich zügig entlang der Stauhaltung vom Messboot TIDESTROM ausgeführt wurden, erfolgten zumeist bis zur Oberfläche der Flüssigschlückschicht, während die Hauptmessungen, die von den im Verhältnis zum Messboot langsameren Messschiffe aus erfolgten, bis zur festen Sohle reichten. Siehe auch Tabelle 4). Da im Flüssigschlück nahezu kein gelöster Sauerstoff vorhanden ist, sank die gemessene Sauerstoffkonzentration bei Eintauchen in den Schlück sofort stark ab; Gandersum (Unterems-Km 31,725), Terborg (Km 24,64), Leerort (Km 14,735), Weener (Km 6,89), Mitling-Mark (Km 5) und Papenburg (Km 0,39; Angaben der Konzentrationen in mg/l; Quelle: Längsfahrten des Messbootes und der Messschiffe

6. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Mit einem umfangreichen Messprogramm wurden die relevanten chemisch-physikalischen Parameter Wassertemperatur, Sauerstoffkonzentration, Salzgehalt und Schwebstoffkonzentration während des Staus zur Überführung des Werftschiffes AIDAnova am 07. bis 09.10.2018 aufgezeichnet. Neben den Messstationen an der Unterems wurden auch mobile Messungen im Wasserkörper der Stauhaltung und auf dem Vorland ausgeführt, um eine detaillierte Kenntnis über die Auswirkung des Stauvorganges zu erhalten. Der Stau zur Überführung der AIDA-

nova erfolgte im Rahmen des Planfeststellungsbeschlusses vom 17.07.2015, unter Aussetzung der Sauerstoff- und Salzrandbedingungen (Nebenbestimmungen A.II.2.2.1 und A.II.2.2.2b).

Der Stau stand unter Einfluss eines sehr niedrigen Oberwasserzuflusses, sowie einer vorhergehenden, außergewöhnlich langen Trockenwetterphase. Somit war viel Schwebstoff, Flüssigschlack und Salz, sowie eine für das Sommerhalbjahr typische Verteilung dieser Parameter in der Unterems vorhanden. Auch die Sauerstoffgehalte waren im oberen Abschnitt der Unterems niedrig, waren jedoch aufgrund der relativ niedrigen Wassertemperatur höher als unter sommerlichen Bedingungen. Die Messungen bestätigten die Erkenntnisse der Bewegungs- und Transportvorgänge im Wasserkörper der Stauhaltung infolge der Dichteströmung aus Richtung Gandersum, sowie die Erfahrungen hinsichtlich des raschen Absetzens der Schwebstoffe und der Gestalt der Flüssigschlackschicht an der Sohle. Der Einfluss des Oberwasserzuflusses aus Richtung Herbrum war im aktuellen Stau aufgrund der immer noch anhaltenden Trockenwetterbedingungen sehr gering.

Die Tiefenvermessung mit einem mehrfrequenten Echolot und Tiefenprofile der Gewässergütemessung geben die Dicke und Oberflächenlage der Schlackschicht an der Sohle wider. Oberhalb der Ledamündung stieg die Mächtigkeit der an der Gewässersohle befindlichen Flüssigschlackschicht auf bis zu etwa 4 m (Papenburg) an. Die gemessenen Gewässergütedaten verdeutlichen die Bewegung des Wassers oberhalb dieser Schicht, wie etwa das Aufgleiten des salzhaltigen Wassers von Gandersum in Richtung Papenburg infolge der Dichteströmung.

Bereits zu Beginn des Staus erfolgt generell eine rasche Abnahme der Schwebstoffgehalte in der Stauhaltung. Eine vorübergehende Erhöhung der Konzentrationen durch die Passage des Werftschiffes war im Sohlbereich gemessen worden. Allerdings ist davon auszugehen, dass diese auch bis zur Wasseroberfläche durch den Überführungsvorgang zunahm. Dabei kann jedoch angenommen werden, dass die Werte an der Wasseroberfläche nur sehr kurz erhöht waren, da sowohl die stationären als auch die mobilen Messungen bereits kurze Zeit nach der Überführungsfahrt kaum noch erhöhte Werte zeigten. Die hohe Sinkgeschwindigkeit der Schwebstoffpartikel ist die Ursache der anschließenden raschen Abnahme deren Konzentration.

Auf den Vorländern entlang der Stauhaltung wurde in Ufernähe eine höhere Sedimentation als in Deichnähe festgestellt. Während die Ablagerung im Uferbereich von Papenburg auf die Schiffspassage zurückzuführen ist, wurden an den anderen Stationen bereits vor dem Stau, bei Präparation der Testflächen, die Vorländer z.T. vorbelastet vorgefunden. Ursache dafür war die leichte Sturmflut des 03.10.2018. Es ist somit nicht auszuschließen, dass die nach dem Stau auf den Testflächen befindlichen Feststoffmengen von einer Umlagerung auf dem Vorland stammten und damit nicht alleine durch den Stauvorgang verursacht wurden. Neben den auf den Testflächen quantifizierten Ablagerungsmengen wurde optisch auf der Vegetation zumeist ein leichter Grauschleier und auf dem Boden eine Ablagerungsdicke von zumeist < 1mm festgestellt.

Die Beobachtung der 2 PSU-Isohaline ergab, dass sich diese während des Staus etwa von Km 4,5 (zwischen Mark und Stapelmoor) bis etwa Km -5,3 (Brual) bewegte. An der Messstation Halte, an der nach dem hier ausgesetzten Planfeststellungsbeschluss ein Grenzwert von 2 ‰ gilt, wurde ein maximaler Salzgehalt von 8,6 ‰ erreicht. Der Grenzwert von 2 ‰ wurde dort in der rd. 32. Stunde überschritten. Die Passage des Werftschiffes und die dadurch verursachte Durchmischung führte oberhalb von etwa Leerort (Km 15) zur deutlichen Anhebung des Salzgehaltes an der Wasseroberfläche, sowie zur leichten Abnahme in Sohlbereich.

Durch die Ausbreitung des salzhaltigen Wassers von Gandersum in die Stauhaltung hinein nahmen auch die Salzwerte im Uferbereich zu. Auf den Vorländern zwischen Leerort und Papenburg wurden am Ende des Staus in Ufernähe höhere Salzwerte als zu Beginn der Ausuferung gemessen. Allerdings waren diese niedriger als in der Fahrwassermitte der Ems,

so dass sich die Zunahme der Salzgehalte nicht bis auf das Vorland durchgesetzt hatte. Auf dem Vorland existierte ein deutlicher Salzgehaltsgradient von der Ems zum Deichfuß. Dabei waren die Werte in Vorlandmitte gegenüber der Vormessung nur gering oder gar nicht erhöht. In Deichfußnähe war in allen Fällen keine Änderung der Salzgehaltswerte festzustellen.

Die Tiefenprofile bestätigten den bereits in den vorhergehenden Staufällen festgestellten starken Sauerstoffgradienten zwischen Schlickschicht und dem darüberstehenden Wasser. Insgesamt nahmen die Sauerstoffwerte in der Stauhaltung zu. Die sohnah ansteigenden Sauerstoffwerte unterhalb etwa Stapelmoor (Km 3) waren auf den Zustrom des sauerstoffreicheren Wassers aus der unteren Stauhaltung zurückzuführen (Dichteströmung und Pumpeneinsatz). Es ist davon auszugehen, dass der Anstieg der Sauerstoffgehalte oberhalb von Papenburg auch durch den Zufluss des Oberwassers aus Richtung Herbrum hervorgerufen wurde, obwohl aufgrund der Trockenwetterbedingungen relativ wenig sauerstoffreiches Wasser über das Tidewehr der Stauhaltung zulief. Die Durchfahrt des Werfschiffes führte im Sohlbereich zwischen etwa Stapelmoor (Km 3) und etwa Leerort (Km 15) zur Abnahme der Sauerstoffwerte. Die Konzentrationen blieben überall über den Werten zu Beginn des Staus. An der Wasseroberfläche war keine derartige Abweichung festgestellt worden, obwohl eine kurzzeitige Abnahme nicht auszuschließen ist. Es wurde keine signifikante Sauerstoffzehrung im gestauten Wasserkörper der Ems festgestellt.

Aufgestellt

gez. Post / Engels
Aurich, Juni 2019

