

Emssperrwerk Gandersum

**Überführung der CELEBRITY
EQUINOX von Papenburg nach
Gandersum am 19./20.06.09**



Emssperrwerk Gandersum

Überführung der CELEBRITY EQUINOX von Papenburg nach Gandersum am 19./20.06.09

Auswertung der physikalisch-chemischen Messdaten

1. Zielsetzung

Für Überführungen von Werftschiffen mit einem Tiefgang größer gleich 8,0 m von Papenburg in die Nordsee sind entsprechende Wassertiefen in der Unterems erforderlich. Erhöhte Wassertiefen können nur durch Einstau der Ems über ein Stauziel von mehr als NN +1,75 m erreicht werden, was normalerweise eine Stauzeit >12 h erfordert. Ein derartig längerer Stau war bislang im Rahmen des gültigen Planfeststellungsbeschlusses für das Emssperrwerk in den Sommermonaten, bzw. unter sommerlichen / frühherbstlichen Verhältnis durch den Planfeststellungsbeschluss von 1998 zum Bau des Emssperrwerks nicht genehmigt. Aufgrund der anstehenden Schiffsüberführungen ist eine Änderung des Planfeststellungsbeschlusses zur Anhebung des Stauziels auf 2,2 m NN mit einer Staudauer von jeweils 25 Stunden erfolgt, und zwar für den hier beschriebenen Stau zur Überführung des Werftschiffes CELEBRITY EQUINOX, sowie für einen im Juli 2011 vorgesehenen Staufall. Die Schiffsüberführung wurde, wie auch bei vorhergehenden Fällen und den Probetaus erfolgreich praktiziert und messtechnisch intensiv begleitet, um die Auswirkung auf den Sauerstoffgehalt des Wasserkörpers in der Stauhaltung zu ermitteln. Der hier vorliegende Bericht dokumentiert die Entwicklung der Sauerstoffverhältnisse in der Stauhaltung während des Staus.

2. Randbedingungen des Staus

Am 19.06.09 wurde um 21:30 Uhr begonnen, das Emssperrwerk zu schließen. Der Schließvorgang war um 22:05 Uhr beendet. Aufgrund des hohen Ausgangswasserstandes wurde im Anschluss über rd. 1 Stunde Wasser aus der Stauhaltung abgeschlagen. Neben den Wasserstandsschwankungen durch die noch vorhandene restliche Tidedynamik in der Stauhaltung, führte in Überlagerung dazu der Wasserabschlag zu starken Schwankungen, die nur wegen des großen Wasserüberschusses in der Stauhaltung bei der Schiffsüberführung nicht zu Problemen führten. Am 20.06.09 gegen 07:30 Uhr wurde damit begonnen, den Wasserstand der Stauhaltung dem Außenwasserstand anzugleichen. Nach einer Staudauer von 11¾ Stunden war das Sperrwerk am 20.06.09 um 09:50 Uhr wieder geöffnet. Das Thw Gandersum zu Beginn des Staus lag 36 cm über dem MThw. Die Pumpen des Emssperrwerkes, des Ledaschöpfwerkes und der Entwässerungsverbände wurden nicht eingesetzt. Der Oberwasserzufluss der Ems betrug 31 m³/s. Der Wasserstand stieg durch zufließendes Oberwasser im Laufe des Staus auf NN +2,15 m (Gandersum) an. Das Wetter war wechselhaft; durch Schauer fielen während des Staus rd. 2 mm Niederschlag. Die Lufttemperatur lag um 17 °C. Der Wind wehte zunächst aus WSW, drehte dann auf SSW und zum Ende des Staus wieder zurück auf WSW, wobei der Wind von anfangs rd. 6 m/s auf rd. 4 m/s nachließ und zum Ende wieder auf rd. 9 m/s auffrischte. Die Wassertemperatur lag im Abschnitt Gandersum - Terborg im Bereich von 17 °C (mittlere Wassertemperatur Juni Terborg 17,4°C) und im Abschnitt Leerort – Papenburg im Bereich von 18 °C.

Wie auch bei vorhergehenden Staufällen festzustellen war, befanden sich vor allem im Abschnitt oberhalb von Leerort hohe Schwebstoffkonzentrationen im Wasserkörper und dicke „fluid mud“-Lagen an der Gewässersohle. Die Sauerstoffverteilung in der Stauhaltung, gekennzeichnet durch höhere Sauerstoffwerte in der unteren und niedrige Sauerstoffwerte in der oberen Stauhaltung, entsprach den üblichen Verhältnissen im Sommer.

Uhrzeit [MESZ]	Vorgang
Schließen	
19.06.09 ca. 20:00	Ledasperrwerk wird geschlossen
19.06.09 21:30 bis 22:05	Schließvorgang Emssperrwerk, beginnend mit Hauptschifffahrtsöffnung (HSÖ)
19.06.09 ab 22:08	Abschlag von überschüssigem Wasser aus der Stauhaltung; Dauer: rd. 1 Stunde
Öffnen	
20.06.09 07:30 bis 09:50	Öffnungsvorgang Emssperrwerk, beginnend mit langsamer Wasserstandsangleichung
20.06.09 13:15	Ledasperrwerk ist geöffnet

Tab. 1 Betriebsablauf des Emssperrwerks vom 19. bis zum 20.06.09

Weitere Randbedingungen des Staus ergeben sich aus der Hydrodynamik eines Tidegewässers, die durch den Einsatz des Emssperrwerkes eine spezielle Form annimmt. Die Vorgänge sind in „Flexibilisierung des Sommerstaufalles in der Tideems- Gutachten für eine wasserbauliche Systemanalyse als Grundlage für eine Umweltverträglichkeitsuntersuchung“ [BAW 2008] beschrieben und im Sommer-Probetau bestätigt worden:

Unmittelbar nach dem Schließen des Sperrwerks klingt die noch vorhandene potentielle und kinetische Energie in einer gedämpften Schwingung allmählich aus. Es handelt sich hierbei um eine ausklingende periodische Bewegung, die wechselnde Strömungsrichtungen aufweist. Während dessen klingen auch die advektiven Transportprozesse aus, so dass es zur Sedimentation der in der Wassersäule befindlichen Schwebstoffe kommt.

Gleichzeitig verändern sich die Salzgehalte im Wasserkörper der Stauhaltung. Da schon nach kurzer Zeit keine starke Strömungsturbulenz mehr vorhanden ist, treten deutlich Schichtungseffekte in Erscheinung, weil das Wasser mit hohen Salzgehalten sohnah stromaufwärts vordringt. Dieses geschieht, da die Wasserdichte im unteren Bereich der Stauhaltung größer als im oberen Abschnitt ist und sich somit ein deutliches Druckgefälle ausbildet (barokliner Druckgradient). Aus dem baroklinen Druckgradienten resultiert eine stromauf gerichtete Kraft, die in Sohnähe am größten ist. Demzufolge ergibt sich in der Stauhaltung eine Strömungssituation, in welcher bodennah ein stromauf gerichteter Wasser- und Salztransport einsetzt, der aus Gründen der Kontinuität von einem oberflächennahen entgegengesetzt gerichteten Transport begleitet wird. Eine „Salzzunge“ fließt in der unteren Hälfte des Wasserkörpers stromauf und salzarmes Wasser gleitet an der Oberfläche in die entgegengesetzte Richtung.

Wie auch in den vorhergehenden Staufällen, können die vorgenannten Prozesse in diesem Stau anhand der Messungen (Stations- und Schiffsmessungen) verdeutlicht werden, insbesondere wird auf die Ergebnisse der Probetaus im Sommer und Herbst 2008 hingewiesen.

Die Überführung der CELEBRITY EQUINOX stellt eine weitere Randbedingung des Probebaus dar. Die Auswertung der Messdaten wird unter Berücksichtigung der Schiffspassage erfolgen. In der nachfolgenden Tabelle ist der zeitliche Ablauf der Schiffspassage aufgelistet.

MESZ	Ems-km	Bemerkung
20.6.09 01:10	0	Passage Dockschleuse; Messstation Papenburg Ems-km 0,391
20.6.09 03:05	7	Passage Eisenbahnbrücke Weener; Messstation Weener Ems-km 6,89
20.6.09 05:30	15	Passage Jann-Berghaus Brücke; Messstation Leerort Ems-km 14,738
20.6.09 07:22	24,64	Messstation Terborg
20.6.09 09:05	30	Liegewanne Oldersum; Messstation Gandersum Ems-km 31,725

Tab. 2 Zeitablauf der Schiffsüberführung CELEBRITY EQUINOX am 20.06.09

3. Messungen

Die Messung der Sauerstoffverhältnisse erfolgte über 10 ständig installierte Messstationen und zwei zusätzlich installierte Messeinrichtungen (Halte und Terborg) (siehe Abb. 1). Die 10 Messstationen an der Tideems werden das ganze Jahr über ohne Unterbrechung betrieben und weisen bereits eine mehrjährige Zeitreihe auf. Die in Halte zusätzlich installierte Messeinrichtung wird aufgebaut, wenn eine Ausbreitung der Salzfront bis oberhalb von Weener zu erwarten ist. Die in Terborg installierte Messeinrichtung nahe der Wasseroberfläche, als Zusatz für die dort bereits an der Sohle ständig messenden Station, wurde speziell für den Sommer- und Herbst-Probestau installiert. Zudem wurden während des Staubetriebs Längsprofil- und Tiefenprofil-Messungen von den Messschiffen aus durchgeführt. Diese erfolgten in Pendelbewegung zwischen Gandersum und Herbrum (analog zu vorhergehenden Staufällen). Bei dieser Schiffsüberführung wurde auf das unmittelbare Begleiten des Werftschiffes durch ein Messschiff verzichtet, da aus Erfahrung bisheriger Messfahrten diese keinen zusätzlichen Erkenntnisgewinn bringt. Stattdessen erfolgte eine Messfahrt in einem zeitlichen Abstand von ca. 2 Stunden zum vorhergehenden Werftschiff (analog zu vorhergehenden Staufällen) und eine weitere, nochmals zeitlich versetzte Messung im südlichen Abschnitt der Stauhaltung.

3.1 Messstationen

An den Messstationen Herbrum (oberhalb Wehr), Papenburg, Weener, Leerort, Terborg, Gandersum, Pogum, Emden und Knock, sowie in der Leda oberhalb des geschlossenen Ledasperrwerkes wurden die Parameter Wassertemperatur, Sauerstoffkonzentration, Salzgehalt und Schwebstoffkonzentration gemessen. Der Salzgehalt wird über die elektrische Leitfähigkeit erfasst und als „praktischer Salzgehalt“ angegeben (Einheit 1 PSU entspricht ungefähr 1 ‰). An den Stationen Gandersum und Leer (Leda) erfolgt die Messung ca. 1 m unterhalb der Wasseroberfläche, an den übrigen Stationen ca. 1 bis 1,5 m oberhalb der Sohle. Das Messsystem wurde durch zwei mobile Messeinrichtungen ergänzt. Es handelt sich um die mobile Messeinrichtung Halte, an der die Parameter Salzgehalt und Temperatur an der Sohle erfasst wurden und um eine zusätzliche Messeinrichtung an der bereits bestehenden Messstation Terborg, durch die ca. 1 m unterhalb der Wasseroberfläche Sauerstoff und Temperatur gemessen wurde.

Die Messstationen bzw. -einrichtungen Halte, Papenburg, Weener, Leerort, Terborg und Gandersum liegen in der Stauhaltung. Die Messergebnisse an diesen Stationen werden im Folgenden näher erläutert.

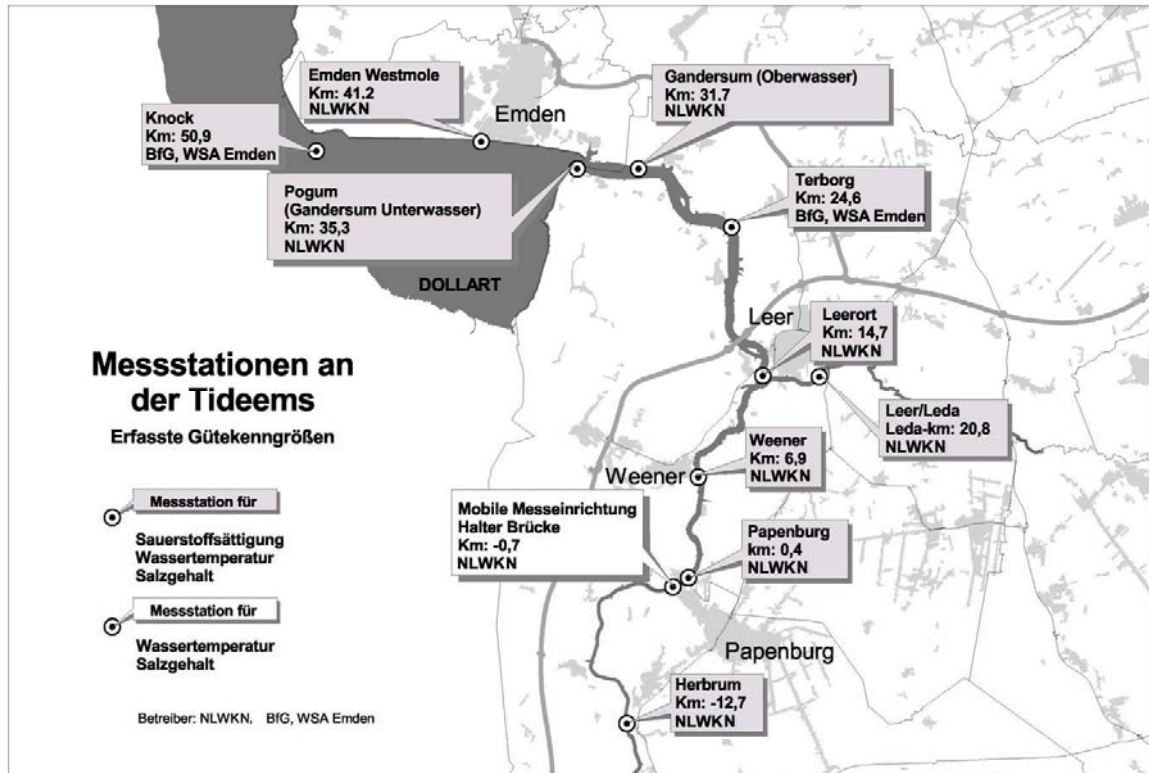


Abb. 1 Messstationen an der Tideems

3.1.1 Überblick der Stationsmessungen

Salzgehalt

Im Tidefluss gibt es eine longitudinale Salzgehaltsverteilung; die Salzgehaltskonzentration nimmt stromauf ab.

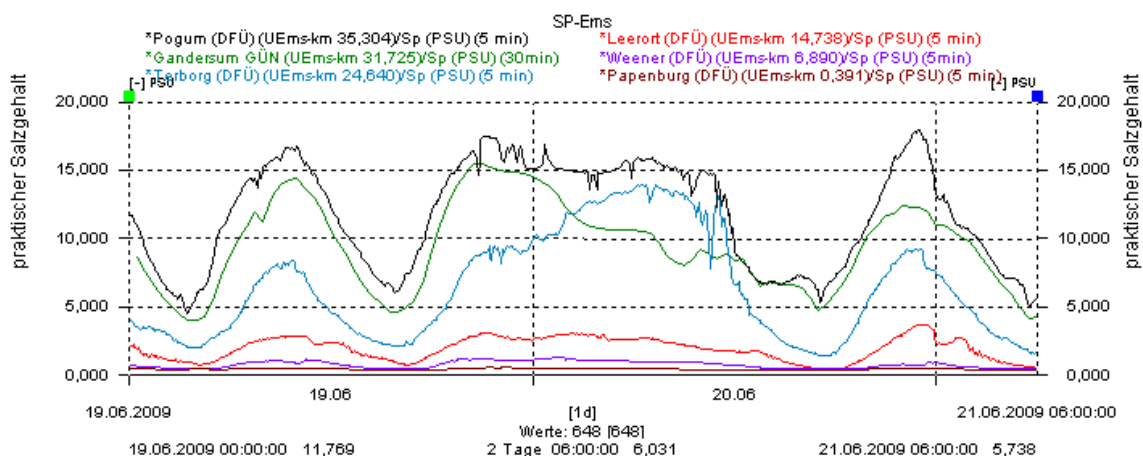


Abb. 2 praktischer Salzgehalt vom 19.06. bis zum 21.06.09 von Pogum (schwarz) bis Papenburg (rotbraun) [Zeitangaben in MEZ]

Durch den Stau kommt es in der Wassersäule zu einer Salzsichtung und einer stromauf gerichteten Salzausbreitung an der Gewässersohle. An der Wasseroberfläche erfolgt ein entgegengesetzter Strom salzärmeren Wassers in Richtung Gandersum. Deutlich wird dies an der Abnahme des Salzgehaltes an der oberflächennah messenden Station Gandersum und dem Anstieg dessen an der sohnah messenden Station Terborg, wobei die Station Leerort nicht mehr von salzhaltigerem Wasser erreicht wird.

Sauerstoffkonzentration

Im Tidefluss gibt es eine longitudinale Verteilung der Sauerstoffkonzentration. In Abbildung 3 (zur besseren Lesbarkeit vergrößerte Abbildung im Anhang) ist zu erkennen, dass der Sauerstoffgehalt von Gandersum nach Weener abnimmt und nach Papenburg wieder leicht ansteigt. Weiterhin ist ersichtlich, dass es tidebedingt lokale starke Schwankungen im Sauerstoffgehalt gibt.

Bei der Betrachtung einer längeren Zeitreihe als in Abb. 3 ist zu beobachten, dass es neben der Schwankung, die von einer einzelnen Tide hervorgerufen wird, auch eine Veränderung der Sauerstoffkonzentration durch andere Einflussfaktoren gibt (Abb. 4, zur besseren Lesbarkeit vergrößert im Anhang). Hier sind die Faktoren Tidehub, Oberwasserzufluss und Wassertemperatur zu nennen. Direkt vor dem Stau waren niedrige Sauerstoffkonzentrationen oberhalb von Leerort, zu verzeichnen.

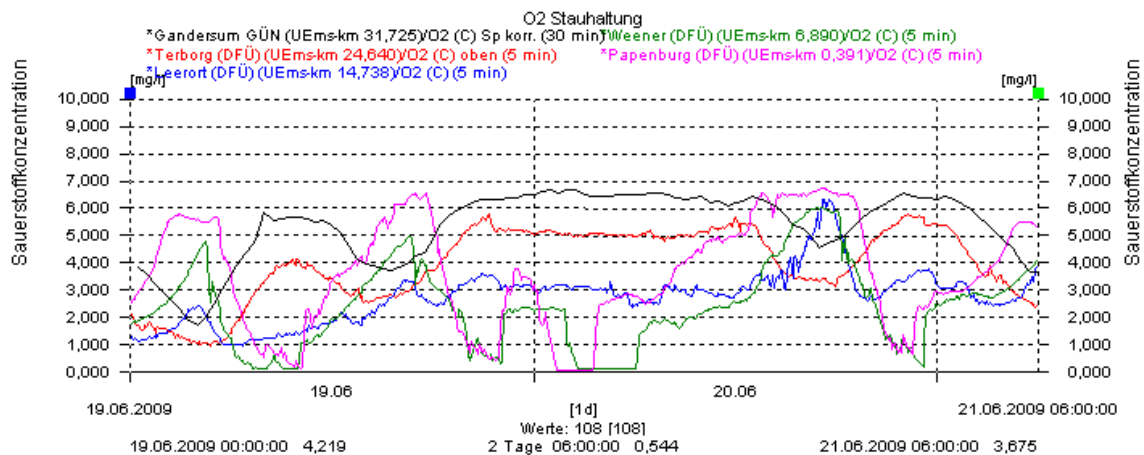


Abb. 3 Sauerstoffkonzentration vom 19.06. bis zum 21.06.09 im Bereich der Stauhaltung von Gandersum (schwarz) bis Papenburg (pink) (Zeitangaben in MEZ); siehe auch Anhang

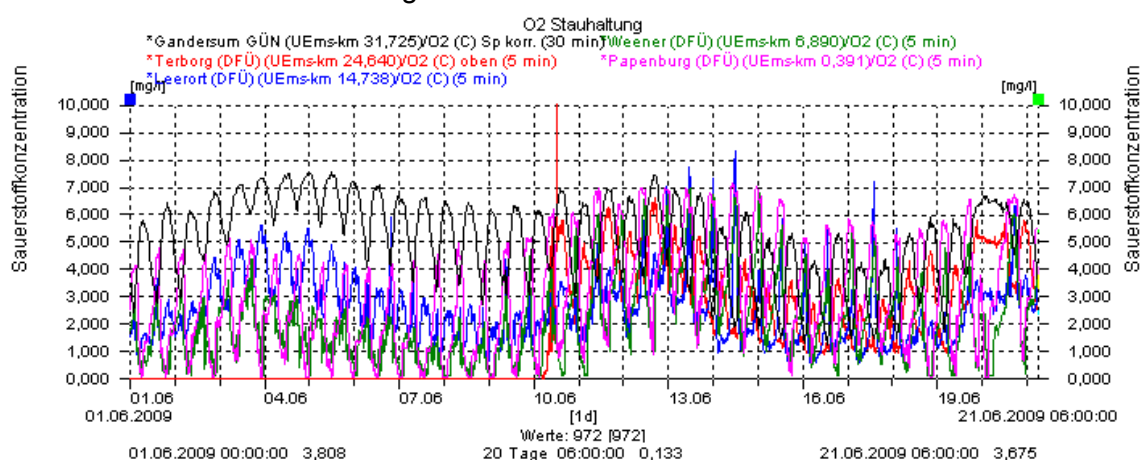


Abb. 4 Entwicklung der Sauerstoffkonzentration vom 01.06. bis zum 21.06.09 von Gandersum bis Papenburg (Zeitangaben in MEZ); siehe auch Anhang

Wie in den Abbildungen 3 und 4 zu erkennen, lagen die Sauerstoffwerte während des Staufalls zum Teil deutlich höher als das tidebedingte Minimum vor dem Staufall. Die an den Messstationen aufgezeichneten Sauerstoffkonzentrationen treten auch im natürlichen Tidegeschehen auf.

An den Messstationen Gandersum (Oberfläche) und Terborg (Oberfläche) ist der Sauerstoffgehalt schwankend auf gleichem Niveau geblieben; an der Sohle war in Terborg eine deutliche Zunahme zu verzeichnen. Das Verhalten des Sauerstoffs in Leerort ist als nahezu konstant zu bezeichnen. An den Stationen Weener und Papenburg erfolgte zunächst eine Zunahme, später eine Abnahme des Sauerstoffgehaltes, die mit der Schiffspassage einherging. Anschließend war wieder ein Anstieg des Sauerstoffgehaltes zu verzeichnen. Auch an der Station Leerort war eine leichte Abnahme während der Passage festzustellen.

Die während des Staus registrierten Änderungen der Sauerstoffkonzentration resultieren vorwiegend nicht aus einer Zehrung oder einer Zunahme des im Wasser gelösten Sauerstoffs, sondern ergeben sich aus der Verlagerung (innerhalb) des Wasserkörpers, resultierend aus dem Gefälle des Wasserspiegels (während der Ausspiegelung), der Dichtedifferenz (im Wesentlichen Salz), dem Zufluss von Oberwasser und durch Abfluss über das Emsperrwerk. Zudem erfolgt ein Absetzen der Schwebstoffe und ein Konsolidieren des „fluid mud“ an der Gewässersohle, sowie eine Aufwirbelung dessen bei Vorbeifahrt des Werftschiffes mit anschließender erneuter Konsolidierung.

Der Wasserkörper wird nicht über die ganze Stauhaltung gleichförmig beeinflusst. Die hohe Schichtdicke des „fluid mud“ an der Gewässersohle und die engen Flussquerschnitte oberhalb von Leerort führen bei der Passage des Werftschiffes dazu, dass in jenem Abschnitt eine bis dahin an der Gewässersohle abgelagerte Schwebstoffe deutlich resuspendiert, sowie die bis dahin zum Teil konsolidierte „fluid mud“-Schicht angehoben wurde. Daraus resultierte eine rasche Abnahme der Sauerstoffwerte an den Messstationen Papenburg und Weener, da diese nach der Schiffspassage zunächst im „fluid mud“ lagen und durch die danach einsetzende erneute Konsolidierung später wieder oberhalb dieser Schicht gemessen haben. Die longitudinale Salzgehaltsdifferenz führte besonders unterhalb von Leerort zu einer deutlichen dichtebedingten Verlagerung des Wasserkörpers, welche sich durch die Zunahme des Sauerstoffgehaltes bei Terborg an der Sohle äußerte.

Wie bereits an Abbildung 3 erläutert, existierte ein horizontaler Gradient der Sauerstoffkonzentration. Wird der Wasserkörper verlagert, so wird von den Messstationen eine entsprechende Sauerstoffentwicklung registriert. Nachfolgend wird die Entwicklung der Sauerstoffkonzentration an den einzelnen Messstationen dargestellt.

3.1.2 Betrachtung der einzelnen Messstationen

Messstation Gandersum

An der Messstation Gandersum wird die Gewässergüte rd. 1 m unterhalb der Wasseroberfläche gemessen.

Die Sauerstoffkonzentration (Abb. 5) zu Beginn des Staus betrug 6,3 mg/l und schwankte während des Staus zwischen 6,3 und 6,7 mg/l; zum Stauende betrug die Konzentration wieder 6,3 mg/l. Die o.g. Schwankungen sind auf stromabwärts gerichtete Wasserbewegungen (Dichteströmung), auf das Schwanken des Wasserkörpers durch den Schließvorgang und den Wasserabschlag zurück zu führen.

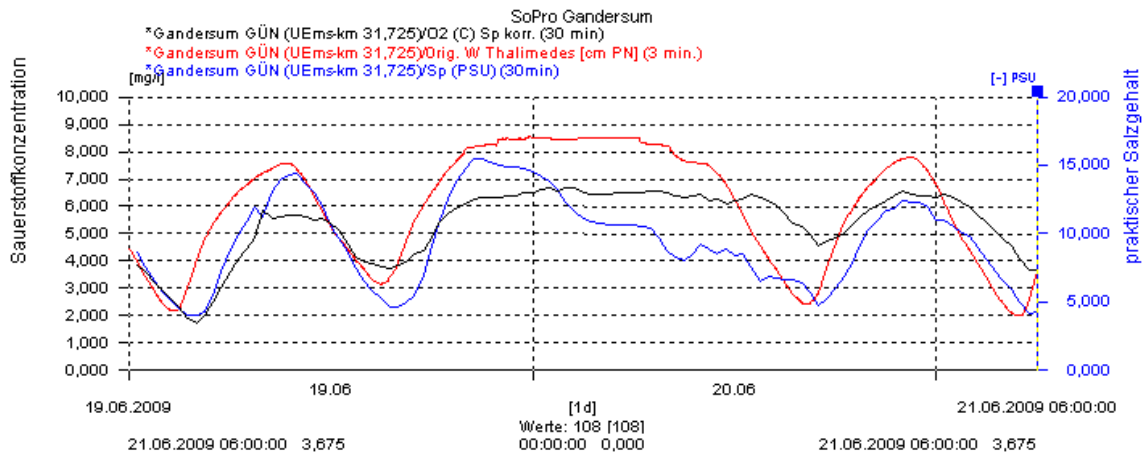


Abb. 5 Verlauf der Sauerstoffkonzentration (schwarz), des Wasserstands (rot) und des Salzgehaltes (blau) an der Messstation Gandersum; (Zeitangaben in MEZ)

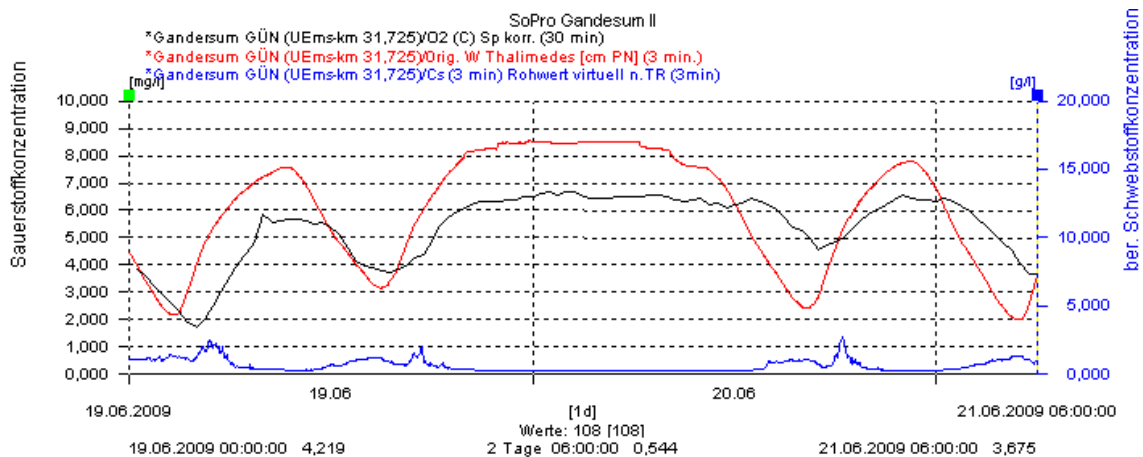


Abb. 6 Verlauf der Sauerstoffkonzentration (schwarz), des Wasserstands (rot) und der Schwebstoffkonzentration (blau) der Messstation Gandersum; (Zeitangaben in MEZ)

Betrag der Salzgehalt zu Beginn des Staus noch rd. 15 PSU, waren zum Ende oberflächennah nur noch rd. 8 PSU zu messen. Die Schwebstoffkonzentration (Abb. 5) nahm bereits 3 Stunden vor Staubeginn nach dem tidebedingten Maximum (ca. 2,0 g/l) stark ab. Zu Beginn und während des Staus betrug die Konzentration ca. 0,3 g/l.

Messstation Terborg

An der Messstation Terborg wird die Gewässergüte rd. 1 m oberhalb der Gewässersohle gemessen. Zusätzlich erfolgte die Erfassung von Sauerstoffkonzentration und Wassertemperatur auch noch rd. 1 m unterhalb der Wasseroberfläche.

Die Sauerstoffkonzentration zu Beginn des Staus betrug an der Wasseroberfläche und im Sohlbereich ca. 5,5 mg/l und stieg in der folgenden $\frac{3}{4}$ Stunde aufgrund der noch vorhandenen Tidedynamik noch leicht auf ca. 5,7 mg/l an. Bedingt durch die Ausspiegelung und dem Abschlag überschüssigen Wassers, erfolgte eine Verlagerung des Wasserkörpers in Richtung Gandersum. Da der Sauerstoffgehalt in Richtung Leerort abnahm, folgte während die-

ses Zeitraumes an der Sohle und an der Wasseroberfläche eine Abnahme des Sauerstoffgehaltes auf 5,1 bis 5,2 mg/l. Ab ca. 01:30 MESZ war die Dichteströmung dominant, so dass durch die daraus resultierende stromauf gerichtete Strömung an der Sohle, sauerstoffreicheres Wasser aus Richtung Gandersum nach Terborg transportierte und dort eine Konzentration von 6,3 mg/l entstehen lies. Aus der flussaufwärts gerichteten Strömung an der Sohle ergibt sich generell eine entgegengesetzte Strömungsrichtung an der Wasseroberfläche, woraus eine Abnahme des Sauerstoffgehaltes in der oberen Wassersäule zu erwarten wäre. Nach dem o.g. Zeitraum der Ausspiegelung und des Wasserabschlags ergab sich keine eindeutige Tendenz der Sauerstoffentwicklung an der Wasseroberfläche; sie bewegte sich zwischen 4,9 und 5,2 mg/l.

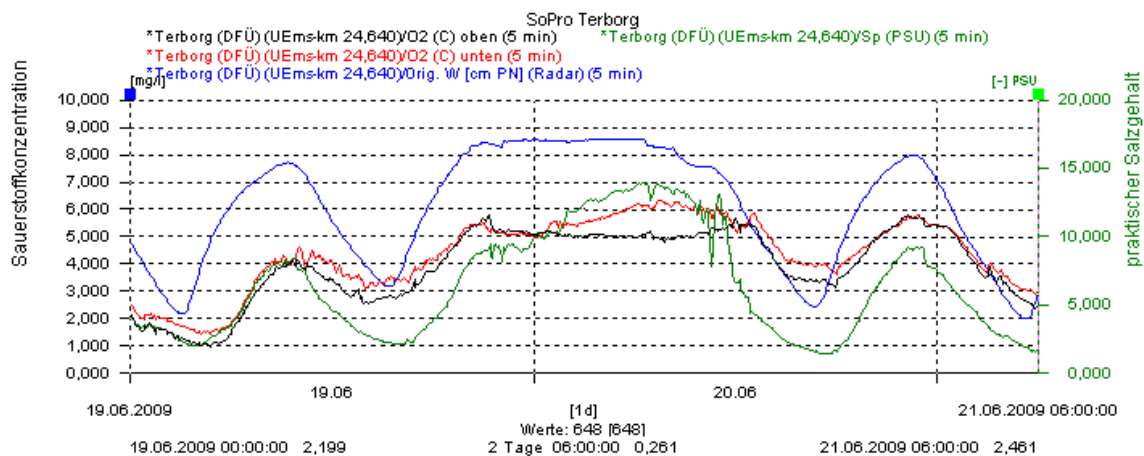


Abb. 7 Verlauf der Sauerstoffkonzentration (schwarz/oberflächennah, rot/sohlnah) des Wasserstands (blau) und des Salzgehaltes (grün/sohlnah) an der Messstation Terborg; (Zeitangaben in MEZ)

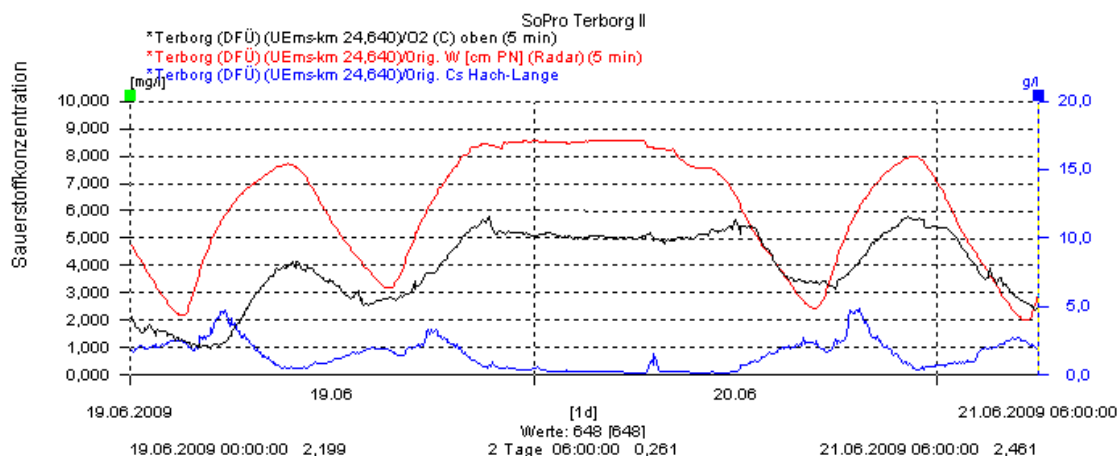
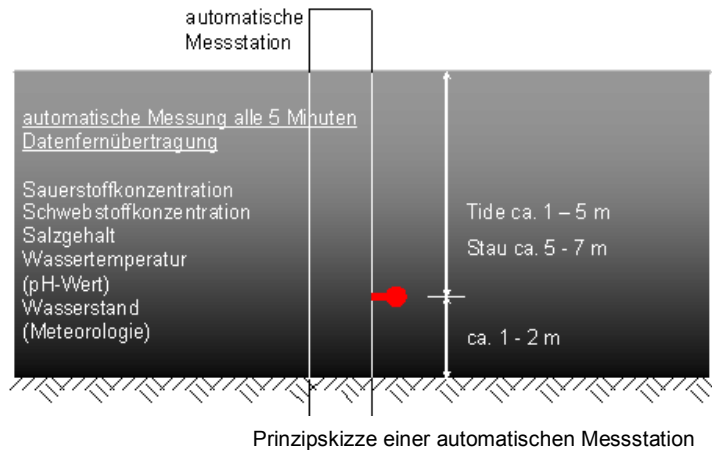


Abb. 8 Verlauf der Sauerstoffkonzentration (schwarz) des Wasserstands (rot) und der Schwebstoffkonzentration (blau) an der Messstation Terborg; (Zeitangaben in MEZ)

Der Salzgehalt betrug zu Staubeginn rd. 9 PSU und stieg bis zum Beginn der Wasserstandsangleichung auf rd. 14 PSU an, und sank danach auf 13 PSU (Abb. 7). Die Schwebstoffkonzentration nahm nach dem tidebedingten Maximum (rd. 3 g/l) stark ab. Zu Beginn des Staus betrug die Konzentration ca. 1 g/l und nahm bis zur Passage des Schiffes auf 0,2 g/l ab. Durch die Vorbeifahrt des Werftschiffes stieg der Schwebstoffgehalt kurzzeitig auf 1,6 g/l an, fiel danach wieder auf das vorhergehende Niveau (Abb.8).



Messstation Leerort

An der Messstation Leerort wird die Gewässergüte rd. 1,5 m oberhalb der Gewässersohle gemessen. Die Sauerstoffkonzentration betrug zu Beginn des Staus 3,3 mg/l und stieg in der folgenden $\frac{3}{4}$ Stunde durch die noch wirkende Tidedynamik auf 3,5 mg/l an. Durch den Vorgang der Ausspiegelung und des Wasserabschlags ergab sich eine leichte Abnahme des Sauerstoffgehaltes auf ein Niveau von 3,0 bis 3,2 mg/l. Mit der Passage des Werftschiffes sank die Sauerstoffkonzentration aufgrund der Durchmischungsprozesse und der Beeinflussung der Messung durch die sich vollziehende Anhebung des „fluid mud“- Horizontes leicht auf ca. 2,5 mg/l ab. Dieser Zustand war jedoch zeitlich begrenzt, denn nach dem erneuten Setzen des „fluid mud“ stieg der Sauerstoff rasch wieder auf das vorhergehende Niveau. Der zu Beginn des Staus vorhandene Salzgehalt von 3,3 PSU nahm zunächst durch den Zufluss von Oberwasser leicht und während Wasserstandsangleichung entsprechend schneller ab, so dass zum Stauende ein Wert von 2,3 PSU zu messen war (siehe Abb. 9). Das tidebedingte Maximum der Schwebstoffkonzentration lag vor Staubeginn und betrug rd. 10 g/l.



Ansicht Messstation Leerort

Zu Beginn des Staus betrug die Schwebstoffkonzentration rd. 3 g/l und nahm bis zur Passage des Werftschiffes auf 0,5 g/l ab. Durch die Schiffspassage stieg die Konzentration kurzzeitig auf rd. 5 g/l und sank danach bis zum Stauende auf einen Wert von 0,8 g/l (Abb. 10).

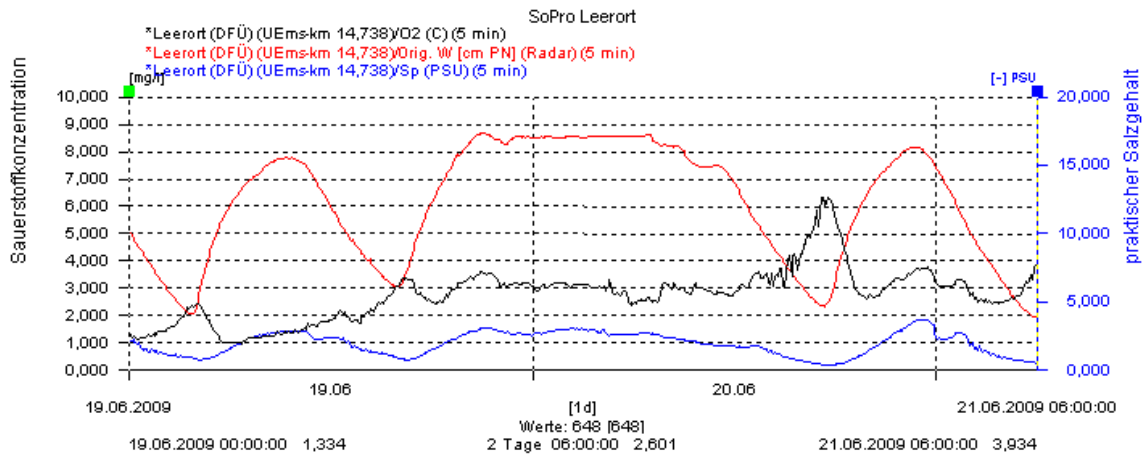


Abb. 9 Verlauf der Sauerstoffkonzentration (schwarz), des Wasserstands (rot) und des Salzgehaltes (blau); vgl. auch Abb. 2a; (Zeitangaben in MEZ)

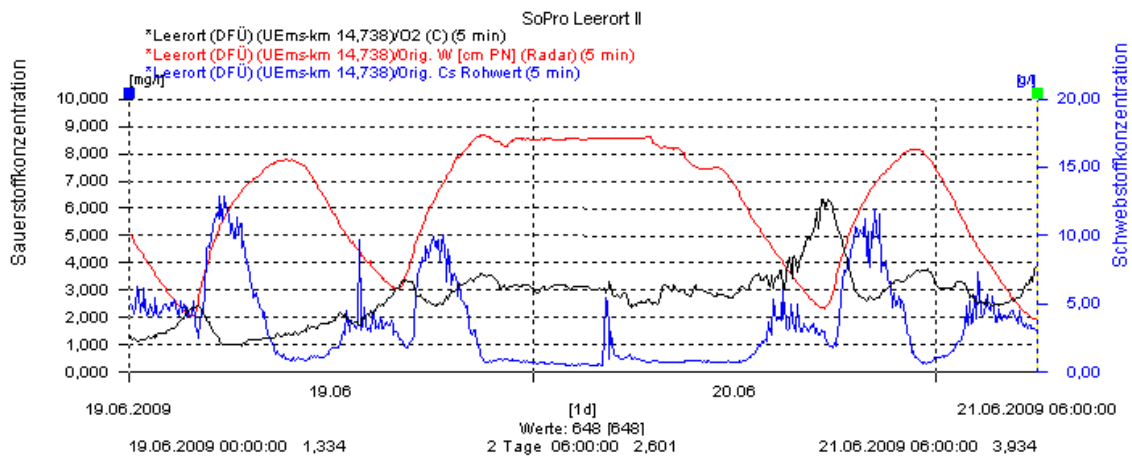


Abb. 10 Verlauf der Sauerstoffkonzentration (schwarz), des Wasserstands (rot) und der Schwebstoffkonzentration (blau); (Zeitangaben in MEZ)

Messstation Weener

An der Messstation Weener wird die Gewässergüte rd. 1,5 m oberhalb der Gewässersohle gemessen.

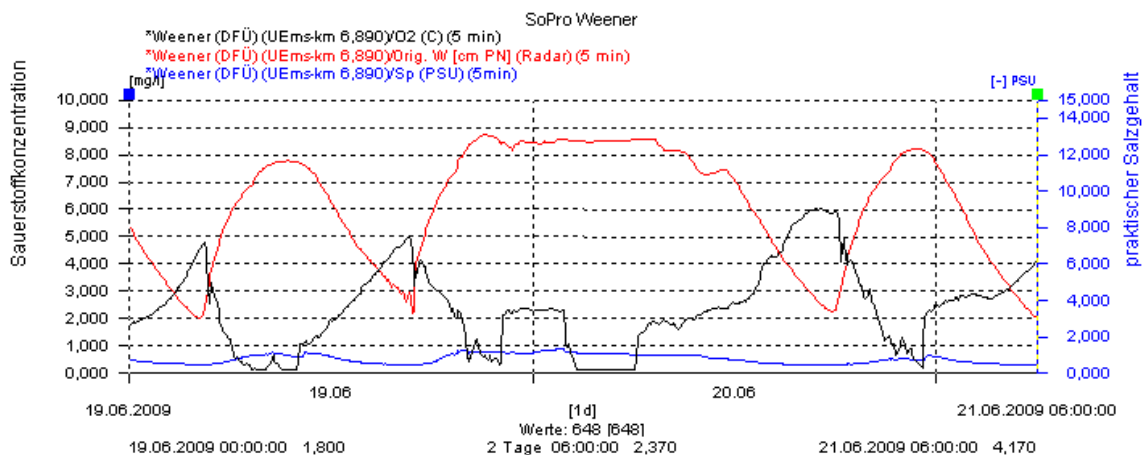


Abb. 11 Verlauf der Sauerstoffkonzentration (schwarz), des Wasserstands (rot) und des Salzgehaltes (blau); (Zeitangaben in MEZ)
 NLWKN Aurich Stau zur Überführung der CELEBRITY EQUINOX am 19./ 20.06.09

Die Sauerstoffkonzentration zu Beginn des Staus lag zwischen 0,5 und 1,2 mg/l. Darauf folgte, durch Absetzen der Schwebstoffe während des Staus, ein sprunghaftes Ansteigen der Sauerstoffkonzentration auf Werte knapp über 2 mg/l (Abb. 11). Mit der Passage des Werftschiffes sank der Sauerstoffgehalt auf rd. 0,1 mg/l ab und verblieb für rd. 3 Stunden auf diesem Niveau. Dass es sich bei der Abnahme des Sauerstoffgehaltes um keine Sauerstoffzehrung, sondern um eine Reaktion auf die Schiffspassage handelte, zeigt die Gegenüberstellung der Sauerstoffkonzentration mit dem Schwebstoffgehalt (Abb. 12). Die Schiffspassage führte durch Aufwirbelung der mehrere Meter dicken „fluid mud“- Schicht dazu, dass die Sonde in den „fluid mud“ eintauchte und so den Sauerstoffgehalt darin gemessen hat, statt in der Wassersäule. Mit zunehmender Konsolidierung des „fluid mud“ an der Gewässersohle, trat die Sonde wieder aus dieser Schicht hervor und erfasste den Sauerstoffgehalt der Wassersäule, der bis zum Ende des Staus knapp unter 2 mg/l lag, also niedriger als vor der Schiffspassage.

Der zu Beginn des Staus vorhandene Salzgehalt von ca. 1,2 PSU nahm während des Staus nahezu kontinuierlich auf 1,0 PSU ab.

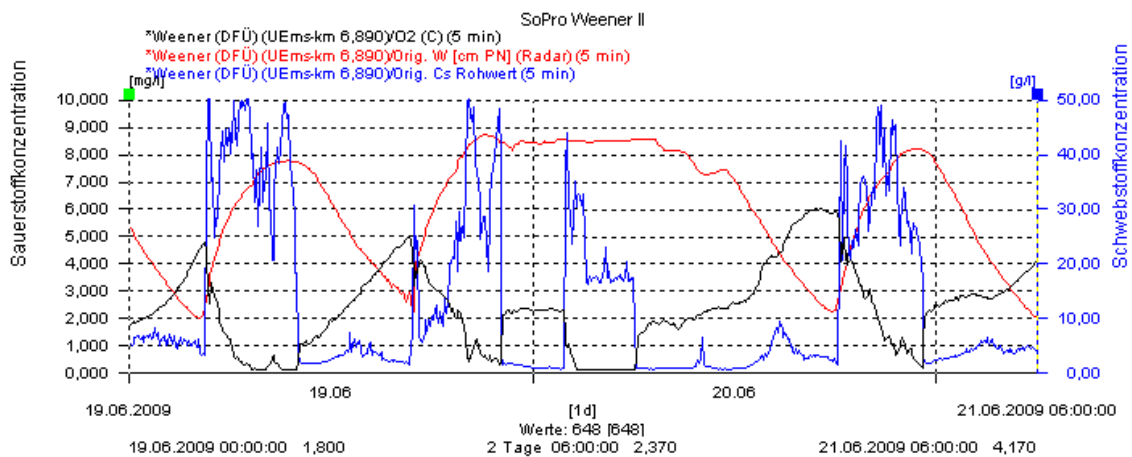


Abb. 12 Verlauf der Sauerstoffkonzentration (schwarz), des Wasserstands (rot) und der Schwebstoffkonzentration (blau); (Zeitangaben in MEZ)

Zu Beginn des Staus waren sehr hohe Schwebstoffwerte vorhanden. Durch die Sedimentation der Schwebstoffe und Konsolidierung an der Gewässersohle wurde in den ersten Stunden des Staus eine hohe Konzentration gemessen. Erst nachdem die Sonde durch die Konsolidierung aus dem „fluid mud“ hervortrat, konnte diese in der Wassersäule messen. Nach der vorgenannten Übergangsphase sank die Konzentration auf zunächst rd. 2 g/l und bis zur Passage des Werftschiffes weiter auf rd. 1 g/l. Durch die Resuspendierung von Feststoffen während der Vorbeifahrt des Werftschiffes tauchte die Schwebstoffsonde wieder in die „fluid mud“- Schicht ein und registrierte darauf hin für rd. 4 Stunden Schwebstoffgehalte von zunächst 30 bis 40 g/l und dann 17 bis 23 g/l. Nach erneuter Konsolidierung des „fluid mud“ wurde bis zum Ende des Staus eine Konzentration von rd. 1 g/l gemessen.

Messtation Papenburg

An der Messtation Papenburg wird die Gewässergüte rd. 1 m oberhalb der Gewässersohle gemessen.

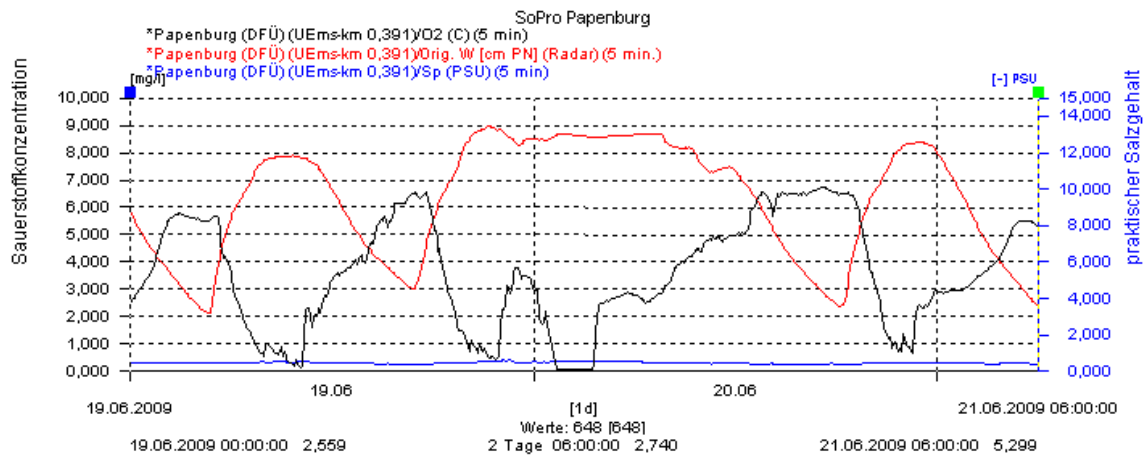


Abb. 13 Verlauf der Sauerstoffkonzentration (schwarz) des Wasserstands (rot) und des Salzgehaltes (blau); (Zeitangaben in MEZ)

Die Sauerstoffkonzentration zu Beginn des Staus lag zwischen 0,9 und 0,6 mg/l. Der sauerstoffarme Bereich in der Trübungszone wurde bei den vorherrschenden Verhältnissen in der Ems mit der Flut in Richtung Papenburg verfrachtet, so dass dort die Sauerstoffkonzentration während der Flutstromphase abnahm. Durch die stromauf gerichtete Restströmung nach Beginn des Staus, fiel somit die Sauerstoffkonzentration weiter ab. Im Anschluss daran wechselte die Strömungsrichtung durch das Auspendeln des Wasserkörpers und das Ablassen von überschüssigem Wasser aus der Stauhaltung. Zusammen mit dem Absetzen der Schwebstoffe bewirkte dies, dass die Sauerstoffkonzentration erheblich anstieg, wie auch bei früheren 12h-Staus in Papenburg bereits beobachtet, um dann wieder mit erneut wechselnder Strömungsrichtung abzufallen. Dieser Vorgang wurde ab der Schiffspassage durch die bereits an der Messtation Weener ausführlich erläuterten Aufwirbelungs-, Sedimentations- und Konsolidierungsprozesse überlagert. (Abb. 13 u. 14).

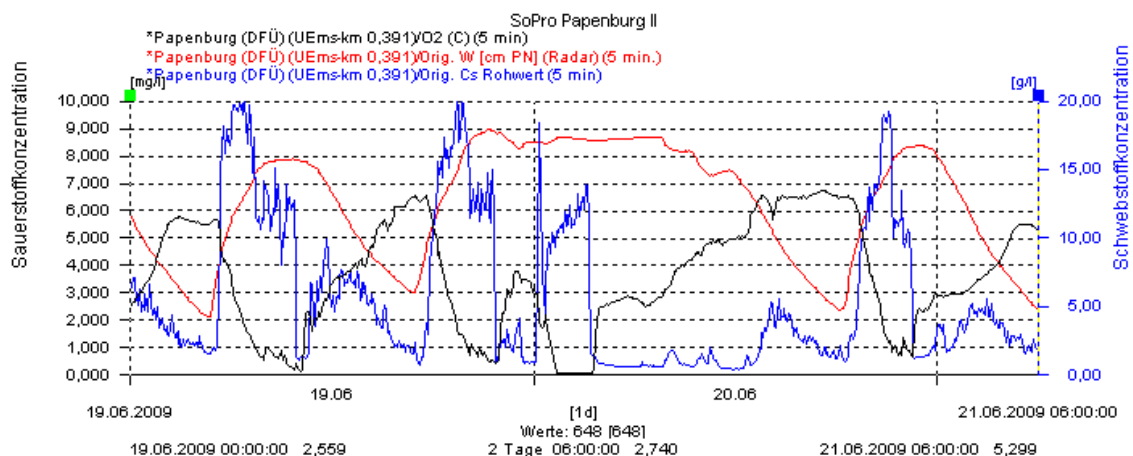


Abb. 14 Verlauf der Sauerstoffkonzentration (schwarz) des Wasserstands (rot) und der Schwebstoffkonzentration (blau); (Zeitangaben in MEZ)

Vor der Passage lag die Sauerstoffkonzentration bei etwa 3 mg/l. Zunächst sank der Sauerstoffmesswert an der Station Papenburg aufgrund der Passage des Werftschiffes (die Sonde befand sich nach Resuspendierung des zuvor an der Sohle konsolidierten Materials wieder im „fluid mud“). Nach der erneuten Konsolidierung der Feststoffe an der Sohle wurde der Sauerstoffgehalt wieder im Wasserkörper gemessen. Die Konzentration lag nach der o.g. Phase der Schiffsüberführung mit Feststoffumlagerung bei zunächst bei 2,5 dann wieder bei 3 mg/l, also kaum niedriger als vor der Schiffspassage, und nahm anschließend bis zum Ende des Staus auf > 4 mg/l zu. Während des Staus nahm der Salzgehalt kontinuierlich von rd. 0,6 auf 0,5 PSU minimal ab. Die Grundversalzung der Ems betrug rd. 0,4 PSU (oberhalb Wehr Herbrum). Zu Beginn des Staus betrug die Schwebstoffkonzentration 11 bis 15 g/l. Nach der Sedimentation und Konsolidierung an der Sohle (siehe auch Weener) betrug diese zunächst 2 bis 4 g/l und nahm in der Zeit bis zur Schiffspassage auf rd. 1 g/l ab. Die Vorbeifahrt des Werftschiffes mit Umlagerung der Feststoffe und Lage der Sonde im „fluid mud“ führte dazu, dass Konzentrationen von zunächst 15 bis 20 g/l und später zwischen 9 und 14 g/l gemessen wurden. Nachdem die Sonde durch die Konsolidierung der Feststoffe wieder in der Wassersäule messen konnte, wurde eine Konzentration von rd. 1 g/l registriert, die bis zum Ende des Staus auf ca. 0,7 g/l abnahm.

Mobile Messeinrichtung Halte

Im Bereich der Halter Brücke werden der Salzgehalt und die Wassertemperatur über der Gewässersohle gemessen. Die mobile Messeinrichtung wird aufgebaut, wenn eine Ausbreitung der Salzfront bis oberhalb von Weener zu erwarten ist. Der Einstau der Tideems darf nur begonnen werden, wenn sichergestellt ist, dass bis zum Abschluss des Staufalls an der Emsbrücke bei Halte sohnlah ein Salzgehalt von 2 PSU nicht überschritten wird (Planfeststellungsbeschluss von 1998; Nebenbestimmung 2.2.2 b).

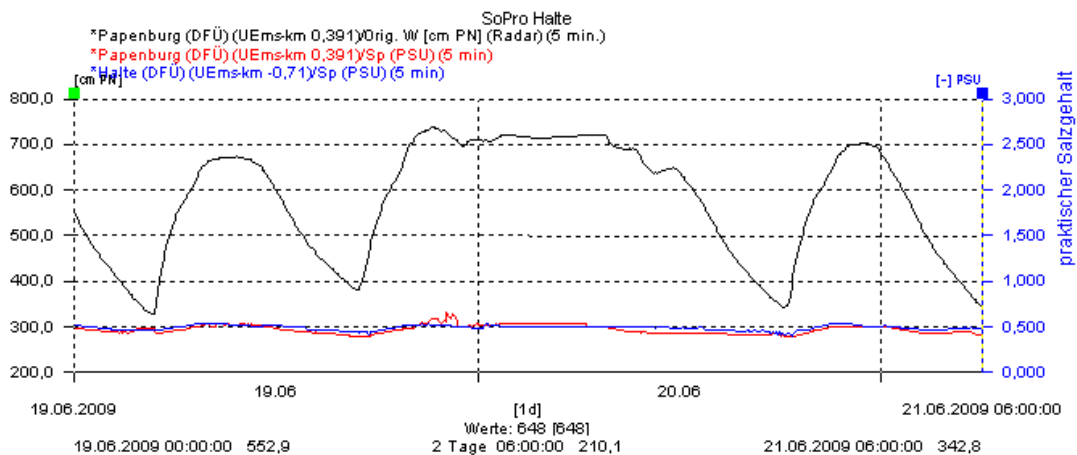


Abb. 15 Verlauf der Salzgehaltskonzentration Papenburg (rot) und Halte (blau), sowie des Wasserstands (schwarz); (Zeitangaben in MEZ)

Während des gesamten Staus war praktisch keine Veränderung des Salzgehaltes festzustellen (Abbildung 15). Der Wert betrug während des Staufalles 0,5 PSU (Grundversalzung der Ems betrug 0,4 PSU). Eine Erhöhung des Salzgehaltes trat an der Position Halte während des Staufalls nicht ein. Die 2 PSU Grenze erreichte bei Stauende etwa km 11 (oberhalb Leerort).

3.2 Schiffsmessungen

Die Stauhaltung zwischen Gandersum und Schleuse Herbrum wurde von zwei Messschiffen befahren. Während der Pendelfahrten zwischen Gandersum und Weener (Messschiff Nord) bzw. zwischen Ledamündung und Schleuse Herbrum (Messschiff Süd) wurden die Parameter Wassertemperatur, Sauerstoffkonzentration, Salzgehalt und Schwebstoffkonzentration in Tiefenprofilen von der Wasseroberfläche bis in den Sohlbereich aufgenommen (Abstand der Messungen im Tiefenprofil 1 m; die Sonden wurden bis zum letzten vollständigen Tiefenmeter oberhalb der Sohle / "fluid mud"- Schicht herunter gelassen, d.h. bei einer Wassertiefe von 7,30m letzter Messpunkt -7m; z. T. lag der letzte Messpunkt auch direkt oberhalb der der „fluid-mud“- Schicht). Der Abstand zwischen den Tiefenprofilen betrug ein bis zwei Kilometer. Die Schiffsmessungen begannen mit dem Einleiten des Staus um ca. 22:00 Uhr. Die Dauer für eine Hin- und Rückfahrt vom bzw. zum Ausgangspunkt des jeweiligen Messschiffes betrug 8 Stunden (Messschiff SÜD) bis 11 Stunden (Messschiff NORD), so dass die Stauhaltung zweimal durchfahren wurde und bis dahin pro Messort bis 3 Tiefenprofilmessungen vorliegen. Die kontinuierlichen Längsfahrten wurden zur messtechnischen Begleitung der Schiffsüberführung nicht beendet, sondern fortgesetzt. Bei dieser Schiffsüberführung wurde auf das unmittelbare Begleiten des Werftschiffes durch ein Messschiff verzichtet, da aus Erfahrung bisheriger Messfahrten diese keinen zusätzlichen Erkenntnisgewinn bringt. Stattdessen erfolgte eine Messfahrt in einem zeitlichen Abstand von ca. 2 Stunden zum vorhergehenden Werftschiff (analog zu vorhergehenden Staufällen; ausgeführt von Messschiff NORD) und eine weitere, nochmals zeitlich versetzte Messung im südlichen Abschnitt der Stauhaltung (Messschiff SÜD).



Fahrtstrecken der Messschiffe MS Seehund (Nord) und MS Dobbe (Süd)

NLWKN Aurich Stau zur Überführung der CELEBRITY EQUINOX am 19./ 20.06.09

3.2.1 Ergebnisse der Schiffsmessungen

Schiffsmessungen Sauerstoffkonzentration

Längsprofile

In den nachfolgenden Abbildungen 16 und 17 sind die Sauerstoffkonzentrationen an der Wasseroberfläche und über der Sohle zusammengestellt und als Längsverteilung in der Stauhaltung abgebildet. Neben der örtlichen Veränderung der Daten erfolgte auch eine zeitliche Veränderung. Für einen besseren Überblick wurden die Daten den Messfahrten zugeordnet dargestellt; die Messzeiten sind der jeweiligen Beschriftung unter der Abbildung zu entnehmen.

Zu Beginn des Staus ist eine charakteristische örtliche Verteilung des Sauerstoffgehaltes im Längsverlauf der Stauhaltung festzustellen: die longitudinale Abnahme des Sauerstoffgehaltes an der Wasseroberfläche und auch an der Sohle von Gandersum (km 32) nach Weener (km 7) und eine Zunahme der Konzentration von Weener bis zum Wehr Herbrum (rd. 12 km oberhalb Papenburg). Diese Gestalt bleibt auch während des Staus erhalten.

Die Längsprofile zeigen einen Zusammenhang der Sauerstoffentwicklung während des Staus mit den salzgehaltsabhängigen Transportprozessen sowie auch die Abhängigkeit zur Schwebstoffkonzentration und zum Oberwasserzufluss in die Stauhaltung. Dabei unterscheiden sich die Vorgänge an der Wasseroberfläche z.T. von denen an der Sohle. Während der ersten Messung (Fahrt von Nord nach Süd: „Hinfahrt“) betrug der Sauerstoffgehalt an der Wasseroberfläche in Gandersum rd. 7 mg/l, in Weener ca. 2,5 mg/l und in Herbrum rd. 8 mg/l. Der Sauerstoffgehalt an der Sohle lag zwischen Soltborg (km 18) und Gandersum bis zu etwa 0,5 mg/l niedriger als an der Wasseroberfläche. Oberhalb dieses Abschnittes war der Sauerstoffwert im Sohlbereich nur geringfügig niedriger als an der Wasseroberfläche.



Messsonden

Zur ersten Messung betrug der Sauerstoffgehalt über der Sohle bei Gandersum 6,5 mg/l, in Weener 2,5 mg/l und in Herbrum rd. 8 mg/l. Während der nachfolgenden Messfahrten (Fahrt von Süd nach Nord: „Rückfahrt“) ergab sich eine geringfügig höhere Sauerstoffkonzentration an der Wasseroberfläche zwischen Leerort (km 15) und Jemgum (km 20), in Höhe von $\leq 0,5$ mg/l. Oberhalb von Leerort bis Papenburg war ein geringfügig niedrigerer Sauerstoffgehalt an der Wasseroberfläche zu verzeichnen. Am deutlichsten war dies im Bereich von Weener; die Abnahme lag insgesamt bei etwa $\leq 0,5$ mg/l. Oberhalb von Papenburg blieben der Sauerstoffwerte an der Wasseroberfläche nahezu konstant.

Die Sauerstoffkonzentration an der Sohle nahm zwischen Bingum (km 16) und Terborg (km 25) deutlich zu (z.T. ≥ 1 mg/l). Die Messung der Rückfahrt wurde in Terborg beendet, da zu jenem Zeitpunkt der Stau zu Ende war. Oberhalb von Bingum bis Papenburg war eine Abnahme der Sauerstoffwerte an der Sohle in Höhe von ca. 0,5 mg/l zu verzeichnen. An den Positionen km 13 (rd. 1 km oberhalb Ledamündung) und km 5 (Mittling-Mark) war eine deutlich höhere Differenz zwischen Hin- und Rückfahrt zu verzeichnen (etwa 1 -1,5 mg/l). Beide Positionen waren ca. 1,5 – 2 Stunden vor den betreffenden Messungen von dem Werftschiff passiert worden. Die Schiffspassage hatte eine Durchmischung des Wasserkörpers mit der darunter liegenden „fluid mud“ – Schicht, besonders im Sohlbereich, bewirkt. Da sich im „fluid mud“ nahezu kein Sauerstoff befindet, resultieren aus einer Durchmischung, besonders im Sohlbereich, niedrigere Sauerstoffwerte als vor dem Mischvorgang. Im betreffenden Abschnitt der Stauhaltung wurde eine mehrere Meter mächtige „fluid mud“ – Schicht mit dem darüber liegenden Wasserkörper vermischt, wodurch sich die niedrigen Sauerstoffwerte im Übergangsbereich von der Wassersäule in die noch nicht wieder konsolidierte „fluid mud“ – Schicht entstanden. Dieser Bereich war zum betreffenden Zeitpunkt durch einen besonders

starken Gradienten in der Sauerstoffverteilung gekennzeichnet, der im Weiteren die Gegenüberstellung zweier Einzelwerte (jeweils eine Messung vor und nach der Schiffspassage) relativiert. Ein späterer Messwert an der Position km 5 (weitere 2 Stunden später) liegt bereits im Normalbereich (Differenz zur Hinfahrt ca. $-0,5$ mg/l), da sich die Feststoffe an der Sohle zwischenzeitig weiter konsolidiert hatten und somit der Messwert eindeutig dem untersten Bereich der Wassersäule zuzuordnen ist. An km 13 weist nur der unmittelbar über der Sohle gemessene Wert (s. Abb. 21) diese erhöhte Differenz auf. Die darüber liegenden Messwerte liegen wieder im Normalbereich. Wie auch an der Wasseroberfläche blieben oberhalb von Papenburg die Sauerstoffwerte an der Sohle nahezu konstant.

Die Längsprofile lassen erkennen, dass sich sauerstoffreicheres Salzwasser sohlnah stromaufwärts ausbreitet und damit sohlnah oft höhere Sauerstoffwerte als an der Oberfläche gemessen werden. Im Bereich oberhalb von Papenburg (km 0) werden durch zufließendes Oberwasser auch sohlnah hohe Sauerstoffwerte erreicht. Oberflächennah bewegt sich das Wasser in umgekehrter Richtung und bewirkt die sinkenden Werte oberhalb von Leerort.

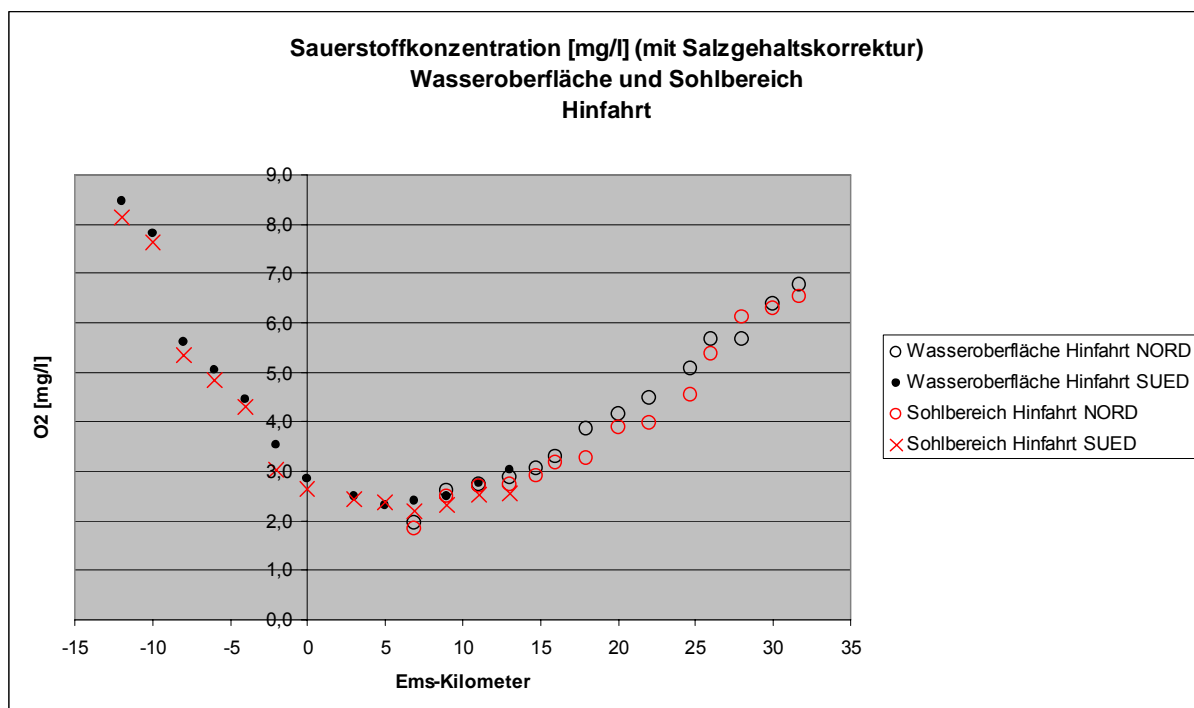


Abb. 16 Längsprofil der Sauerstoffkonzentration an der Wasseroberfläche und der Sohle während der Messfahrt von Nord nach Süd [„Hinfahrt“] (Messschiff NORD 19.06.09 22:03 bis 20.06.09 02:14 MESZ / Messschiff SÜD 19.06.09 22:15 bis 20.06.09 02:14 MESZ); Kilometrierung: Herbrum km -12, Papenburg km 0, Weener km 7, Leerort km 15, Emssperrwerk km 32

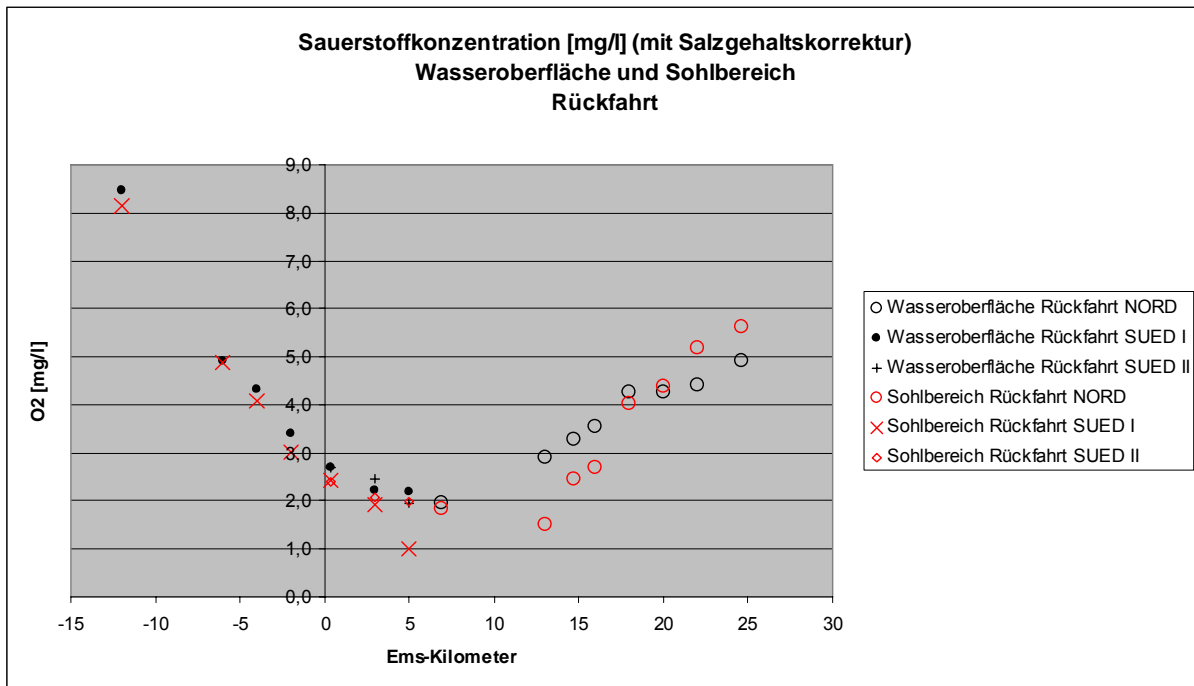
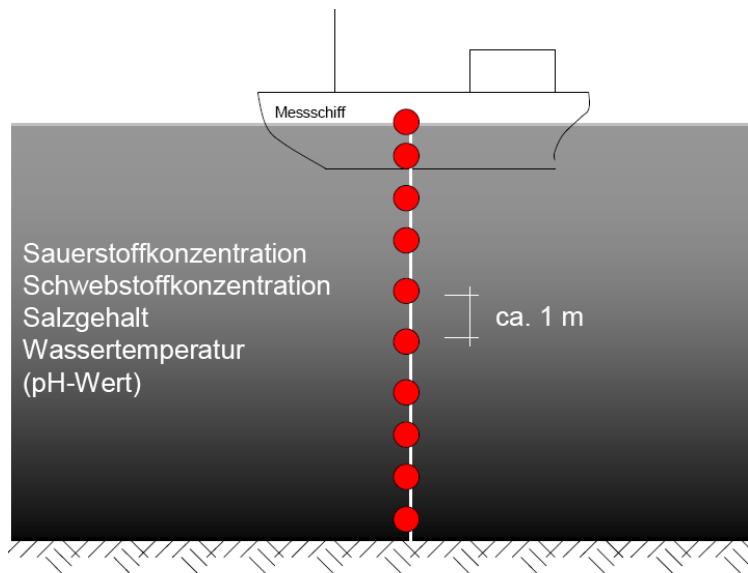


Abb. 17 Längsprofil der Sauerstoffkonzentration an der Wasseroberfläche und der Sohle während der Messfahrt von Süd nach Nord („Rückfahrt“) (Messschiff NORD 20.06.09 05:16 bis 09:07 MESZ / Messschiff SÜD: von Herbrum bis Weener [I] 20.06.09 02:14 bis 04:41 MESZ; Weener bis Papenburg und wieder in Richtung Weener zurück [II] 05:36 bis 06:16 MESZ); Kilometrierung: Herbrum km -12, Papenburg km 0, Weener km 7, Leerort km 15, Emssperrwerk km 32

Tiefenprofile

Die Wassersäule wurde im Meterabstand von oben nach unten beprobt. Die Sonden wurden bis zum letzten vollständigen Tiefenmeter über der festen Gewässersohle / „fluid mud“ herunter gelassen (z.B. bei einer Wassertiefe von 7,30m letzter Messpunkt -7m). Die Profile verdeutlichen die bereits geschilderten Transportvorgänge besonders in der unteren Wassersäule: die deutliche Zunahme der Sauerstoffkonzentration an der Gewässersohle unterhalb von Bingham durch die dichteinduzierte Strömung an der Sohle (barokliner Druck). Auffällig ist der scharfe Übergang vom „fluid mud“ - Horizont zu dem darüber stehenden Wasser (siehe z. B. Abb. 18 - 22 unterster Messwert teilweise im „fluid mud“). Während im Sediment sehr geringe Sauerstoffwerte gemessen werden, liegen die darüber gemessenen Werte deutlich höher. Eine aufsteigende Zehrung aus dem Sediment ist nicht erkennbar.



Stellvertretend für alle Tiefenprofile, die alle ein bis zwei Kilometer aufgenommen wurden, wird an den nachfolgenden Abbildungen die vertikale Sauerstoffverteilung im Bereich der Messstationen Gandersum bis Papenburg, sowie einiger Zwischenpositionen gezeigt. Die „fluid mud“ Schicht war im Bereich oberhalb von Leerort bis Papenburg teilweise mehrere Meter dick. Sie ist vom Werftschiff durchfahrbar (nautische Tiefe > Wassertiefe).

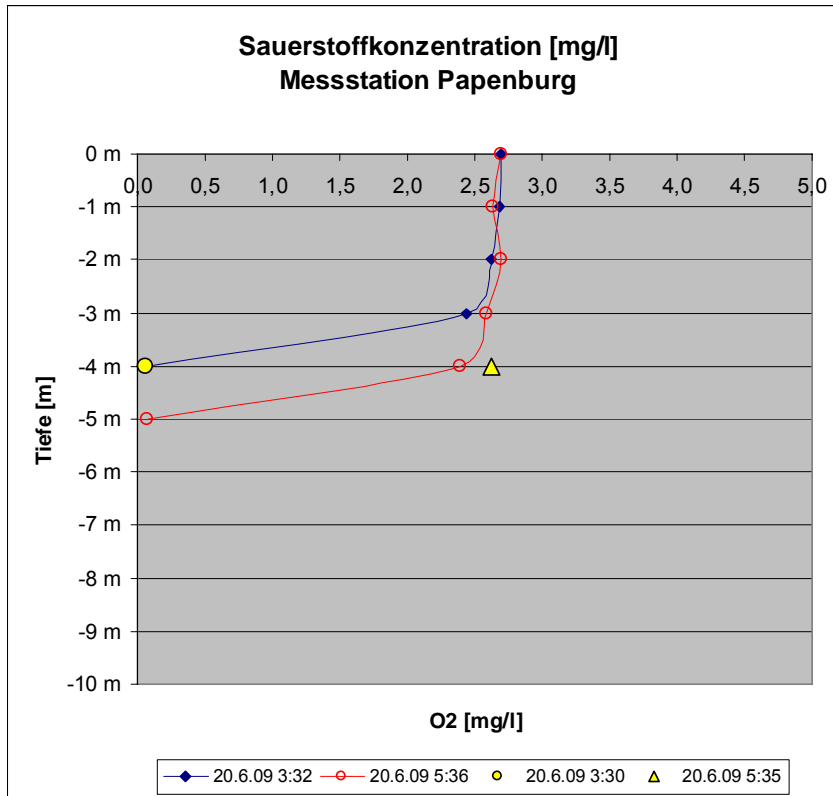


Abb. 18 Tiefenprofil der Sauerstoffkonzentration im Bereich der Messstation Papenburg [gelb: Wert der Messstation]

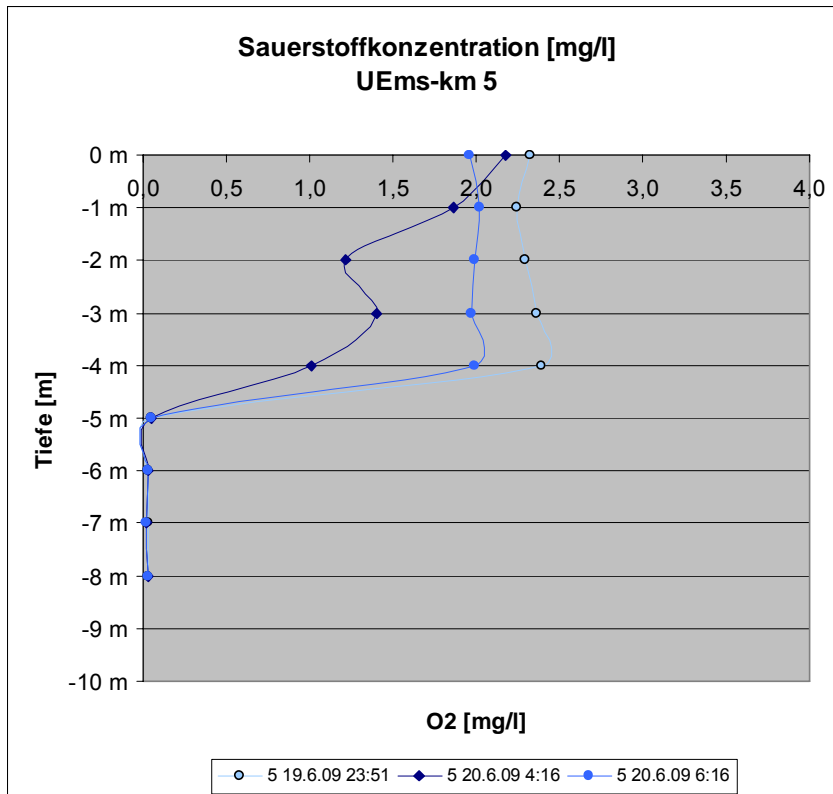


Abb. 19 Tiefenprofil der Sauerstoffkonzentration an km 5 (vor der Passage der EQUINOX [23:51 MESZ], 1,5 – 2 h nach dessen Passage [04:16 MESZ] und 3,5 – 4 h nach der Schiffspassage [06:16 MESZ])

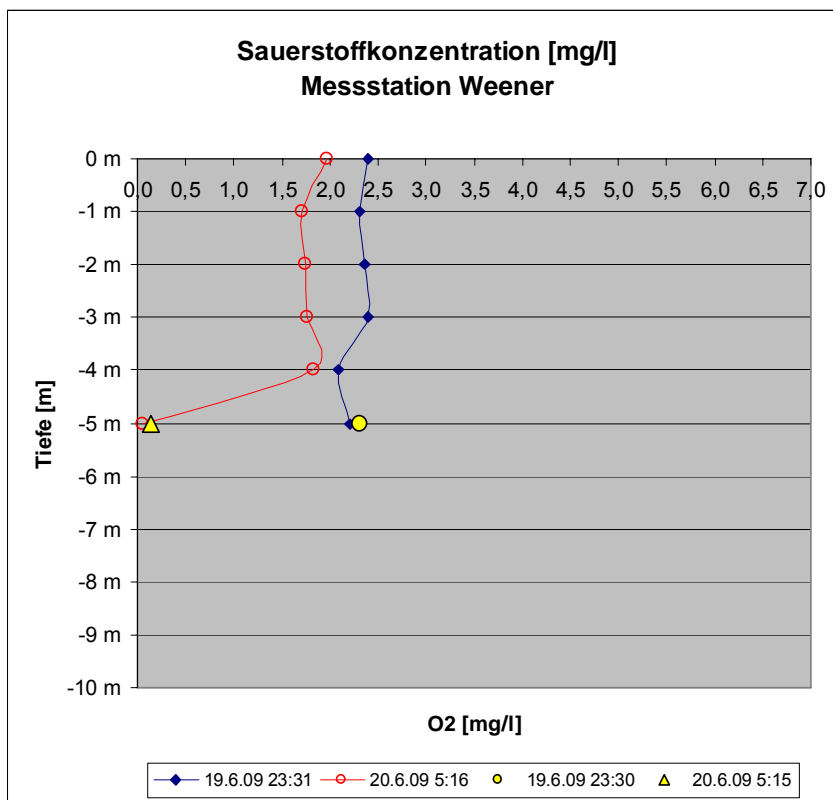


Abb. 20 Tiefenprofil der Sauerstoffkonzentration im Bereich der Messstation Weener (Messung 20.06.09 05:16 MESZ bis in „fluid mud“) [gelb: Wert der Messstation]

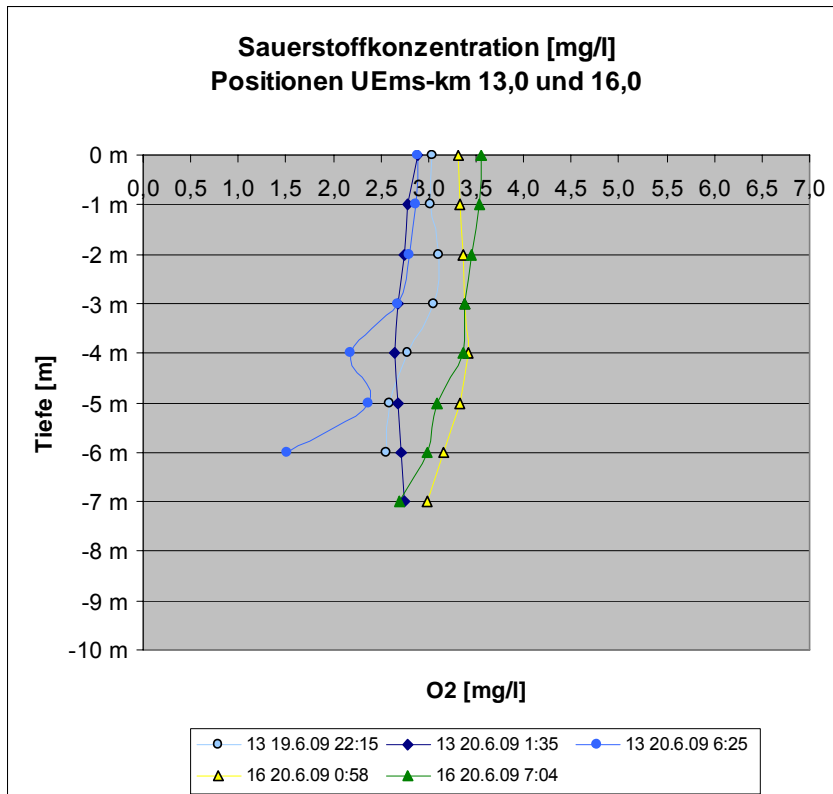


Abb. 21 Tiefenprofil der Sauerstoffkonzentration im Bereich km 13 und 16

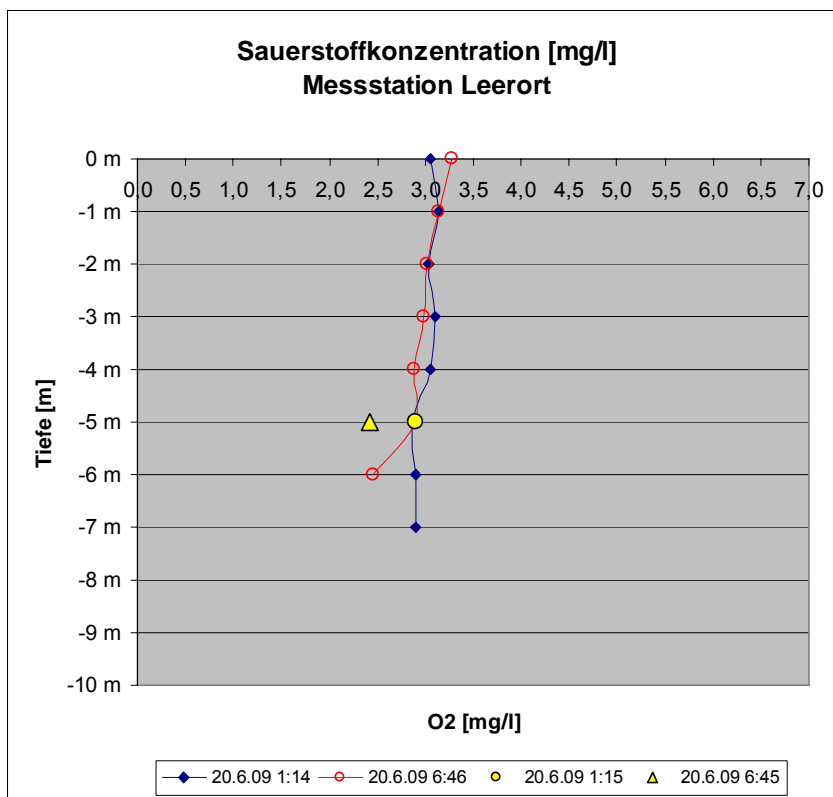


Abb. 22 Tiefenprofil der Sauerstoffkonzentration im Bereich der Messstation Leerort [gelb: Wert der Messstation]

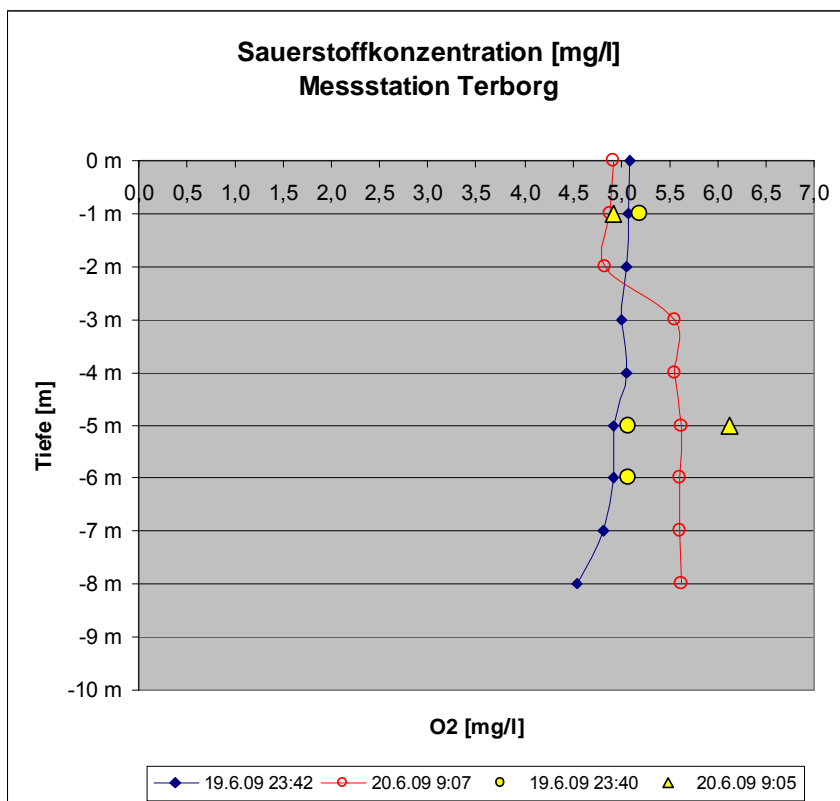


Abb. 23 Tiefenprofil der Sauerstoffkonzentration im Bereich der Messstation Terborg [gelb: Wert der Messstation]

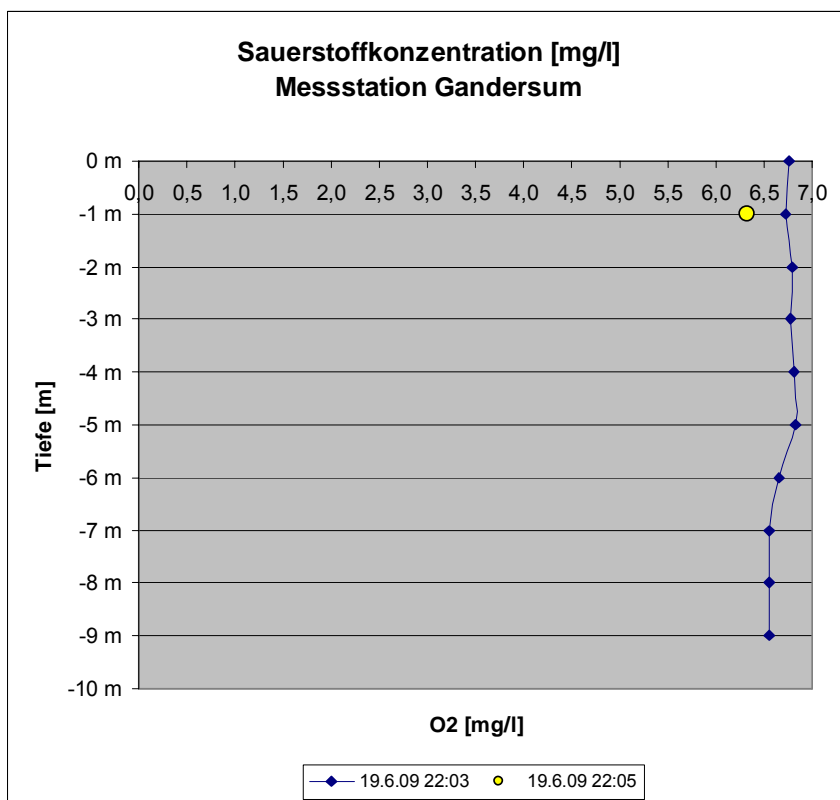


Abb. 24 Tiefenprofil der Sauerstoffkonzentration im Bereich der Messstation Gandersum [gelb: Wert der Messstation]
NLWKN Aurich Stau zur Überführung der CELEBRITY EQUINOX am 19./ 20.06.09

4. Schlussfolgerung

Mit einem umfangreichen Messprogramm wurden die relevanten chemisch-physikalischen Parameter Wassertemperatur, Sauerstoffkonzentration, Salzgehalt und Schwebstoffkonzentration während des Staus zur Überführung des Werftschiffes CELEBRITY EQUINOX vom 19. auf den 20.06.09 aufgezeichnet. Zu dem Messprogramm gehörten die Messstationen in der Unterems, die über das ganze Jahr ohne Unterbrechung und zeitlich hochaufgelöst die Parameter an repräsentativen Stellen messen, sowie Schiffsmessungen, mit denen die Stauhaltung über die gesamte Längsausdehnung und in allen Wassertiefen erfasst werden konnte und somit die Wasserqualität während der gesamten Stauzeit auch räumlich in hoher Auflösung aufgenommen wurde. Die Schiffsmessungen zeigten untereinander hohe Übereinstimmung aber auch im Vergleich mit den Aufzeichnungen der Messstationen war eine hohe Plausibilität der Messdaten gegeben.

Anhand der Stations- und Schiffsmessungen waren keine signifikanten Sauerstoffzehrungen im gestauten Wasserkörper der Ems zu festzustellen, auch nicht in dem Abschnitt oberhalb von Leerort, in dem eine dicke „fluid mud“ – Schicht an der Sohle vorhanden war. Die Tiefenprofile bestätigten ebenfalls, dass vom Schwebstoffhorizont keine aufsteigende Zehrung ausgeht und der Sauerstoffgradient zwischen „fluid mud“ und dem darüber stehendem Wasser sehr stark ist. Ansteigende Sauerstoffwerte unterhalb von Bingum (km 16) waren auf den Zustrom des salzhaltigen Wassers aus der unteren Stauhaltung zurück zu führen.

Die Schiffspassage führte im Abschnitt zwischen Mitling-Mark (km 5) und Leerort durch Aufwirbelung der mehrere Meter dicken „fluid mud“ - Schicht zu kurzfristigem Sauerstoffabfall an der Sohle mit anschließender Erholung (siehe Messung an km 5). Es besteht kein Hinweis auf eine signifikante nachhaltige Sauerstoffzehrung durch die Schiffspassage.

Aufgestellt

gez. Post / Engels

Aurich, den 15.11.2009

*Gandersum GÜN (UEms-km 31,725)/O₂ (C) Sp korr. *Weener (DFÜ) (UEms-km 6,890)/O₂ (C) (5 min)
 *Terborg (DFÜ) (UEms-km 24,640)/O₂ (C) oben (5 min) *Papenburg (DFÜ) (UEms-km 0,391)/O₂ (C) (5 min)
 *Leerort (DFÜ) (UEms-km 14,738)/O₂ (C) (5 min)

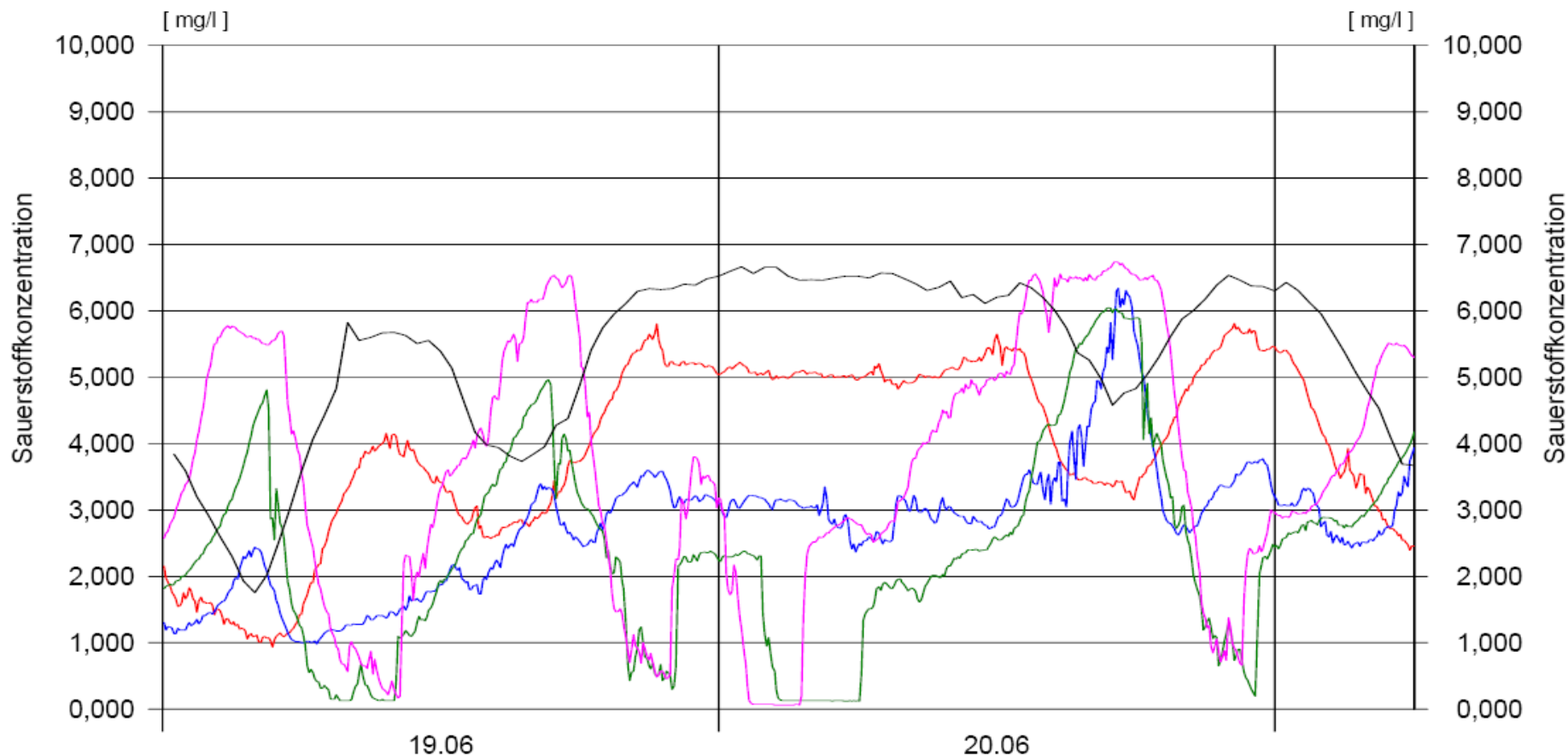


Abb. 3 Sauerstoffkonzentration vom 19.06. bis zum 21.06.09 in der Stauhaltung im Bereich von Gandersum (schwarz), Terborg (rot), Leerort (blau), Weener (grün) und Papenburg (pink) (Zeitangaben in MEZ); siehe auch Text

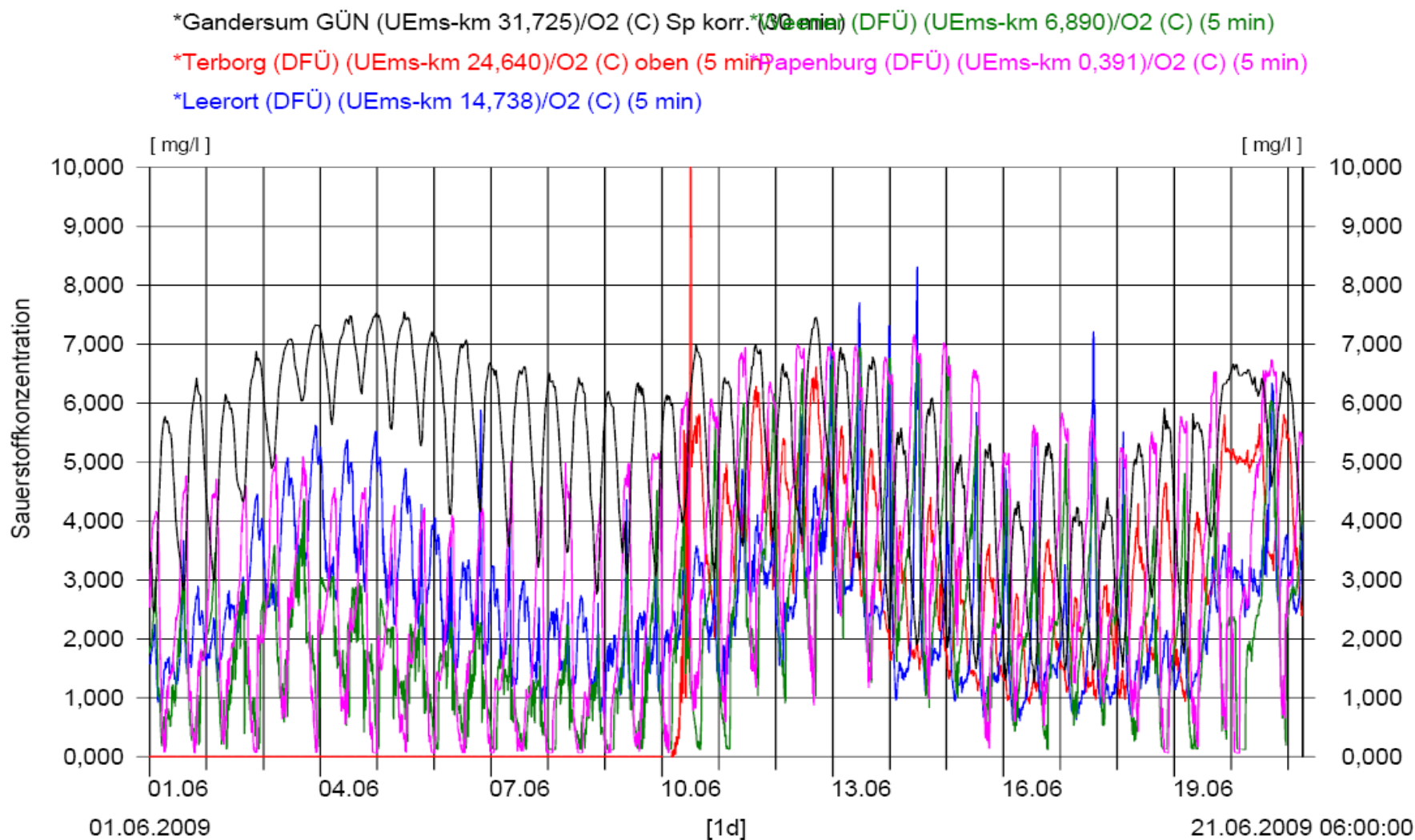


Abb. 4 Entwicklung der Sauerstoffkonzentration vom 01.06. bis zum 21.06.09 in der Stauhaltung im Bereich von Gandersum (schwarz), Terborg (rot), Leerort (blau), Weener (grün) und Papenburg (pink) (Zeitangaben in MEZ); siehe auch Text