

Umweltforschung des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Projektnummer: FKZ 3716 25 2110

ENTWURF: Modellierung von Ferneinträgen in der Nordsee

Dr. Hermann Lenhart & Dr. Fabian Große

Universität Hamburg

Scientific Computing

DKRZ

Bundesstraße 45a
20146 Hamburg

Juni 2017

Inhalt

Einleitung	3
Kopplung von O ₂ an die TBNT-Methode	3
Setup der TBNT-Analyse für O ₂	5
Ergebnisse der TBNT-Analyse für O ₂	6
Räumliche Verteilungen des GOC	6
Räumliche Verteilungen in Bezug auf unterschiedliche Stickstoffquellen.....	8
Quellspezifischer O ₂ -Verbrauch in der O ₂ -Defizitzone	11
WFD Reduktionslauf	16
Fazit	22

Einleitung

Im Rahmen des UBA-Projekts UFO-16 sollte die Kopplung der Sauerstoffdynamik an die Methode der “Trans-Boundary Nutrient Transports (TBNT)”, welche zuvor für Stickstoff (N) und Phosphor (P) für das ECOHAM-Modell implementiert wurde, umgesetzt werden. Diese Erweiterung der TBNT-Methode soll ermöglichen, den Einfluss von N- oder P-Einträgen unterschiedlicher Eintragsquellen (z.B. verschiedene Flüsse) auf die Sauerstoffbedingungen der Nordsee zu quantifizieren. Da sich die vorangegangenen Arbeiten auf das Verfolgen der N-Einträge verschiedener Quellen beschränkten, wurde im Rahmen des Projekts ebenfalls die Kopplung an den N-Kreislauf umgesetzt.

Dieser Ansatz erlaubt es zum ersten Mal die Quantifizierung des Einflusses von N aus verschiedenen Quellen auf die O₂ Dynamik in der Nordsee unter den aktuellen Umweltbedingungen. Die gegenwärtige Analyse hat die sogenannte Oxygen Defizit Zone (ODZ) im Fokus, beschäftigt sich aber zusätzlich mit dem Untersuchungsgebiet vom Oxyster Ground, da diese Region der Nordsee ebenfalls dafür bekannt ist anfällig für O₂ Defizitevents zu sein (Greenwood et al., 2010). Abschließend werden die Ergebnisse der Nährstoffreduktion, gemäß dem in OSPAR ausgearbeiteten WRRL Maßnahmen der Mitgliedsstaaten (siehe Ufo 13 Endbericht, Tab. 5.2 in Kapitel 5 „WFD Reduktionslauf), in ihrem Effekt auf die O₂ Dynamik der Nordsee in Bezug auf die individuellen N Quellen analysiert und diskutiert.

Die konzeptionelle Umsetzung der Kopplung von Sauerstoff (O₂) an die mittels TBNT verfolgten N-Einträge sowie das Setup und die Ergebnisse dieser Studie werden im vorliegenden Bericht in zusammengefasster Form vorgestellt. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in den Kapiteln der Dissertation von Fabian Große (Große, 2017) und der darauf basierenden Publikation Große et al., (2017).

Kopplung von O₂ an die TBNT-Methode

Die TBNT-Methode ermöglicht es, die von bestimmten Quellen ins marine Ökosystem eingetragene Nährstoffe (z.B. N) durch alle (physikalischen und biochemischen) Ökosystemprozesse zu verfolgen. Dies geschieht, indem zusätzliche – je nach Eintragsquelle spezifisch „markierte“ – Zustandsvariablen eingeführt werden.

Da O₂ selbst im zugrundeliegenden ECOHAM-Modell keine von Flüssen eingetragene Zustandsvariable beinhaltet und zudem der Einfluss von N-Einträgen auf die O₂-Dynamik quantifiziert werden sollte, war es erforderlich, die den O₂ Kreislauf beeinflussenden Prozesse an die vorher markierten N Prozesse zu koppeln (Abb. 1).

Für die physikalischen Prozesse, die den O₂ beeinflussen, gilt dies nicht, da diese ausschließlich vom O₂ selbst sowie der Hydrodynamik (Strömungen und Vermischung) abhängen. Dagegen sind die biochemischen Prozesse, die den O₂ beeinflussen – Nettoprimärproduktion (NPP), Zooplankton- und bakterielle Veratmung, Nitrifikation und benthische Remineralisation –, direkt oder indirekt mit dem N-

Kreislauf verbunden. Bei der Nitrifikation wird während der Umwandlung von Ammonium in Nitrat O_2 verbraucht, womit eine direkte Verbindung zwischen O_2 - und N-Kreislauf existiert. Bei den übrigen genannten Prozessen ist der Einfluss auf O_2 zwar vom Kohlenstoff (C) abhängig, jedoch gibt es Organismen (Phytoplankton, Zooplankton, Bakterien) bzw. totes, organisches Material (sedimentierter Detritus), welche sowohl C als auch N enthalten – im Folgenden als „Mediatoren“ bezeichnet. Diese Mediatoren ermöglichen es, den Einfluss der verschiedenen biochemischen Prozesse auf den O_2 mit dem aus verschiedenen Quellen eingetragenen N direkt in Verbindung zu bringen.

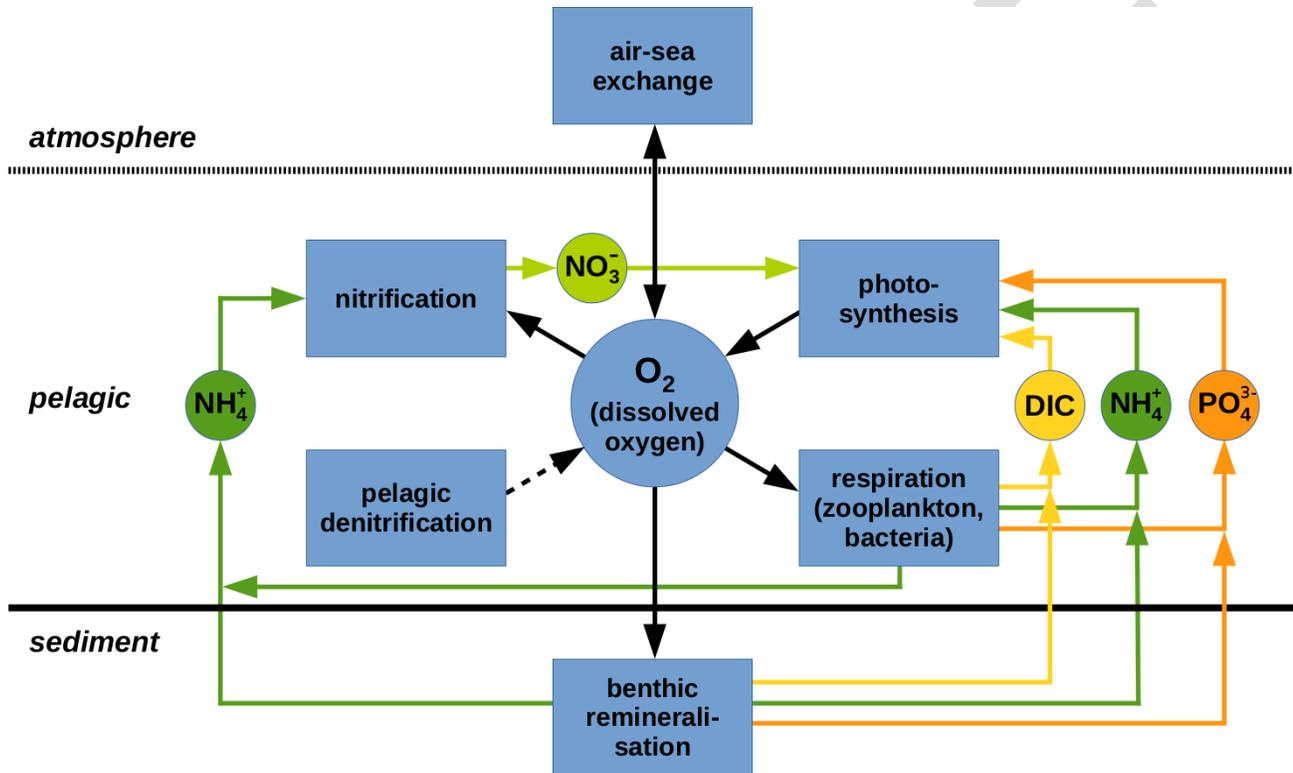


Abbildung 1: Sauerstoffzyklus für die TBNT Auswertung mit ECOHAM

Für die Berechnung wird dazu der relative Beitrag einer bestimmten N-Eintragsquelle zur relevanten N-Zustandsvariable (z.B. Phytoplankton-N im Falle von NPP) mit dem Wert des den O_2 beeinflussenden Prozesses multipliziert (z.B. O_2 -Produktion während NPP). Dies geschieht unter der Annahme, dass die Konzentration des C im Mediator proportional zur Konzentration des N in selbigem ist.

Setup der TBNT-Analyse für O₂

Für die Analyse des Einflusses der N-Einträge auf die O₂-Dynamik wurde zunächst ein Teilgebiet der ECOHAM-Domain definiert (Abb. 2), welches die Nordsee, den englischen Kanal sowie Skagerrak/Kattegat beinhaltet. Anschließend wurden für die Ränder dieser Teilregion Eintragsquellen definiert: Nordatlantik (NA) am nördlichen Nordseerand, Englischer Kanal (EC; engl.: English Channel) am Südweststrand sowie die Ostsee (BS; engl.: Baltic Sea) im Osten definiert.

Daneben wurden entsprechend OSPAR (2010) acht verschiedene Flussgruppen definiert: deutsche Flüsse (DE), niederländische Flüsse (NL-1 und NL-2), belgische Flüsse (BE), französische Flüsse (FR), britische Flüsse (UK-1 und UK-2) und norwegische Flüsse (NO). Zusätzlich wurde eine neunte Gruppe definiert, in welcher alle anderen – nicht markierten – Flüsse gesammelt wurden („others“).

Zusätzlich wurde die Atmosphäre als Eintragsquelle definiert. Abbildung 2 zeigt eine der Modelldomain mit der Teilregion, für die die TBNT-Berechnung vorgenommen wurde, sowie die Eintragungspunkte der verschiedenen Flussgruppen.

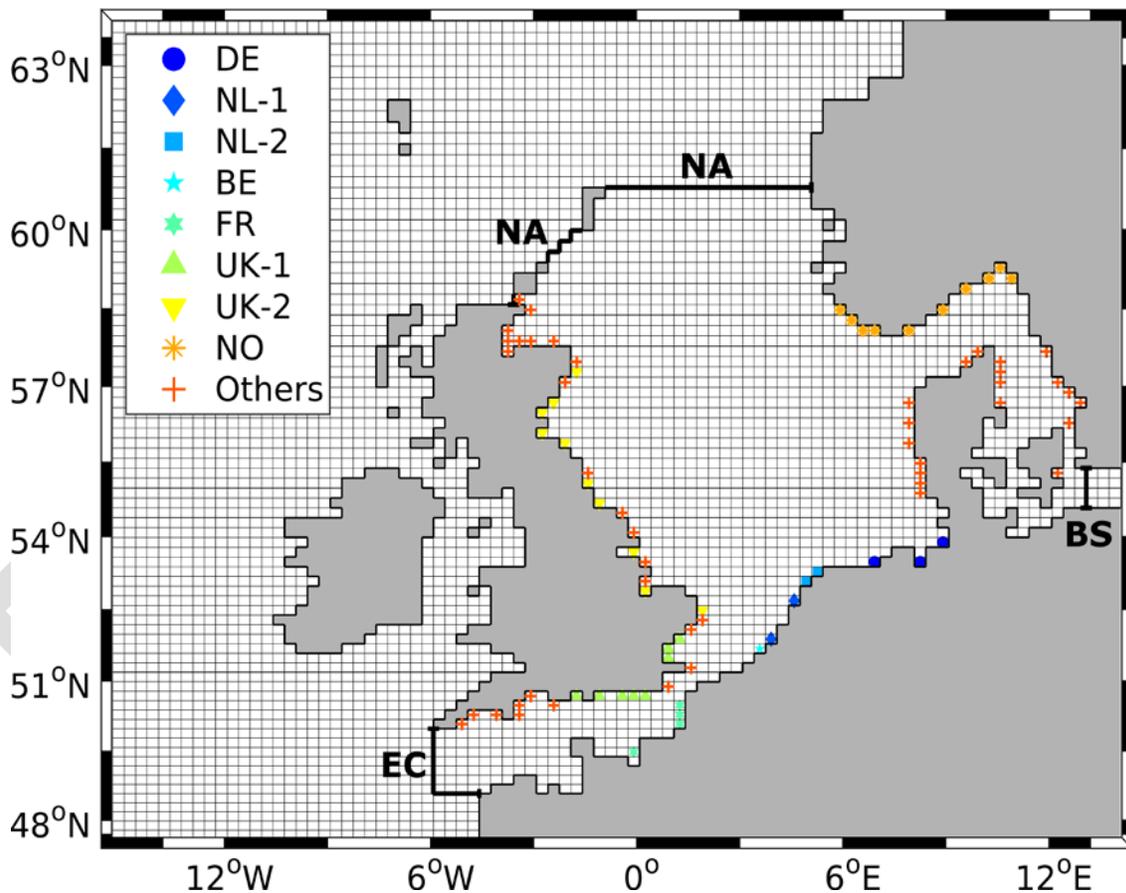


Abbildung 2: ECOHAM-Modelldomain mit TBNT-Teilregion begrenzt durch Nordatlantik (NA), englischen Kanal (EC) und Ostsee (BS) sowie den Eintragungspunkten der verschiedenen Flussgruppen (siehe Legende).

Ergebnisse der TBNT-Analyse für O₂

Nährstoffe von unterschiedlichen Quellen beeinflussen sowohl die O₂ Produktion mittels Nettoprimärproduktion als auch die O₂ Zehrung durch Prozesse wie pelagische oder benthische Remineralisation, Zooplankton Respiration oder Nitrifikation. Allerdings treten die geringsten O₂-Konzentrationen in den Offshore-Regionen der Nordsee üblicherweise in Bodennähe auf, wo die NPP aufgrund der geringen Lichtverfügbarkeit vernachlässigbar ist. Im Fokus der Analysen des Einflusses unterschiedlicher N-Einträge auf die O₂-Dynamik stand daher der O₂-Verbrauch, welcher aus Gründen der Übersichtlichkeit nur in seiner Gesamtheit und nicht für einzelne Prozesse betrachtet wurde. Im Folgenden werden daher Ergebnisse für den bodennahen Brutto-O₂-Verbrauch (GOC; engl.: gross O₂ consumption) präsentiert.

Räumliche Verteilungen des GOC

Um einen ersten Überblick über den O₂-Verbrauch in der Nordsee zu bekommen, zeigt Abb. 3 den bodennahen O₂-Gesamtverbrauch („bulk GOC“), als jährlichen Verbrauch pro Fläche (in kg O₂ m⁻² a⁻¹), sowie die Positionen der beiden Untersuchungsgebiete ODZ (Region 1) und Oyster Ground (Region 2). In Abb. 3a und b wird zunächst die GOC unterhalb von 20m, für die Jahre 2002 und 2010, dargestellt. Hierbei wird die GOC ab einer Tiefe von 20 m über die gesamte Wassersäule integriert. Die Abbildung spiegelt den kombinierten Effekt von Verfügbarkeit von organischem Material und Wassertiefe wieder. Die räumlichen Strukturen weisen für die Norwegische Küste, den Nordwestlichen Schelf und die hoch produktive südliche Nordsee sehr hohe Werte von 0.4 kg O₂ m⁻² a⁻¹ und mehr aus. Geringe Werte kleiner 0.016 kg O₂ m⁻² a⁻¹ treten in der zentralen Nordsee aufgrund der geringen oberflächennahen NPP und nordöstliche der Doggerbank aufgrund der geringen Tiefe auf.

Die Werte für GOC, integriert ab 20 m Wassertiefe (Abb. 3 a und b) weisen für 2002 in der südlichen Nordsee höhere Werte auf, mit Maxima von etwa 0.4 kg O₂ m⁻² a⁻¹ südöstlich des Gebietes der Doggerbank (Region 2). Im Jahre 2010 liegen die höchsten Werte im Gebiet direkt südlich und westlich von der Doggerbank und in der nördlichen Nordsee. In der südlichen Bucht fällt die GOC aufgrund der niedrigen NPP generell geringer aus. In der Nähe des Untersuchungsgebietes ODZ (Region 1) erreicht die GOC Werte zwischen 0,26 bis 0,36 kg O₂ m⁻² a⁻¹ in 2002 und 0,12 bis 0,24 kg O₂ m⁻² a⁻¹ in 2010. Dies beinhaltet, dass die GOC in der ODZ Region in 2002 etwa 1,5 bis 2-mal höher ausfällt als in 2010. Dieses Ergebnis wird auch durch weitere Untersuchungen des O₂-Verbrauchs in der sommerlichen Schichtungsperiode unterstrichen.

Die Abbildungen 3 c und d repräsentieren die GOC in der Bodenschicht des Modells für die Jahre 2002 und 2010. Die höchsten Werte treten in der flachen südlichen Nordsee aufgrund des Einflusses der Flusseinträge auf. Daher stehen die höchsten Werte in der inneren Deutschen Bucht in Verbindung mit den Nährstoffeinträgen welche die NPP antreiben, sowie den zusätzlichen organischen Frachten speziell aus der Elbe und Weser.

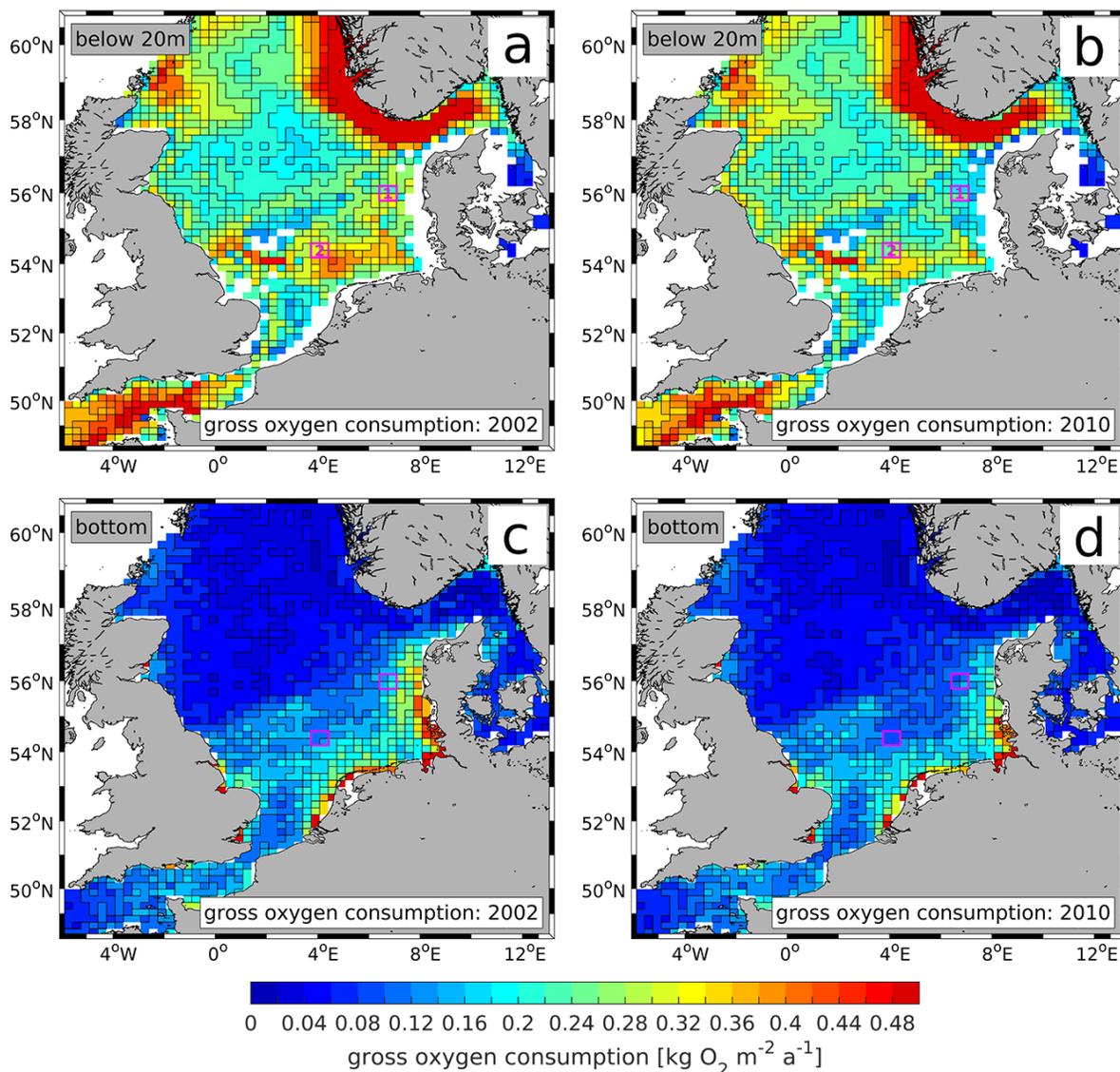


Abbildung 3: Räumliche Verteilung der jährlichen Brutto O₂ Verbrauch (GOC) integriert (a,b) von 20 m Tiefe bis zum Boden und (c,d) für die Bodenschicht des Modells, (a,c) in 2002 und (b,d) in 2010. Zusätzlich sind die Untersuchungsgebiete Region 1 (ODZ) und Region 2 (Oyster Ground) ausgewiesen.

Auch der Küstenstreifen von der Mündung des Rheines und der Maas bis zur Emsmündung weist deutlich erhöhte GOC Werte auf im Vergleich zu Regionen ferner offshore. Im Mündungsbereich von Rhein und Maas werden maximale GOC Werte von 1,9 kg O₂ m⁻² a⁻¹ erreicht und in der Elbmündung 1,4 kg O₂ m⁻² a⁻¹, sowohl in 2002 als auch in 2010. Obwohl die GOC in diesen Gebieten wesentlich höher ausfällt im Vergleich zu Regionen ferner offshore, weisen die simulierten O₂ Konzentrationen in den Küstengebieten höhere Werte aus im Vergleich zur zentralen südlichen Nordsee. Der Grund hierfür ist die geringe Wassertiefe die zu verstärkter vertikalen Vermischung führt. In der nördlichen und zentralen Nordsee, nördlich einer imaginären Linie zwischen der Doggerbank und der Nordspitze von Dänemark, zeigen sich für beide Jahre generell geringe Werte der bodennahen GOC von 0,06 und

abnehmenden Werten mit zunehmender Tiefe, da nur ein geringerer Anteil von organischem Material den Boden erreicht.

Im Untersuchungsgebiet ODZ (Region 1) liegt die bodennahe GOC zwischen $0,12$ und $0,2 \text{ O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ in 2002, im Vergleich zu geringen Werten von $0,06$ bis $0,14 \text{ kg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ im Jahre 2010. Dies stimmt gut überein mit dem doppelt höheren O_2 Verbrauch während der sommerlichen Schichtungsperiode in 2002 im Vergleich zu 2010. Im Untersuchungsgebiet Oyster Ground (Region 2) weist die bodennahe GOC Werte zwischen $0,1$ und $0,14 \text{ O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ in 2002, im Vergleich zu einem nur geringfügig geringeren Wert von $0,09 \text{ kg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ im Jahre 2010 aus.

Zusammenfassend zeigt Abb. 3, dass die GOC in der Küstenzone der südlichen Nordsee sowie in den Flusseintragsregionen der britischen Südostküste am größten ist. Dies hängt mit der hohen Produktivität und der geringen Wassertiefe ($D < 30 \text{ m}$) in diesen Regionen zusammen. Einerseits wird viel organisches Material produziert, andererseits erreicht ein Großteil dieses Materials auch die bodennahen Wasserschichten bzw. das Sediment, wodurch die GOC sehr hoch ist.

Mit zunehmender Entfernung von der Küste nimmt die GOC in der südlichen Nordsee ab, einzige Ausnahme stellt hier die Doggerbank (bei ca. 57°N , 3°O) dar, welche sich ebenfalls durch eine hohe Produktivität und geringe Wassertiefe im Vergleich zu den umgebenden Regionen auszeichnet.

In der nördlichen Nordsee (nördlich der 50-Meter-Tiefenlinie) nimmt die bodennahe GOC deutlich ab, was vor allem mit der großen Wassertiefe verbunden ist, welche zur Folge hat, dass ein Großteil des absinkenden, organischen Materials bereits im Mittelwasser abgebaut wird und somit deutlich weniger Material den Boden erreicht.

Räumliche Verteilungen in Bezug auf unterschiedliche Stickstoffquellen

Um einen ersten Überblick über den Einfluss der wichtigsten N-Eintragsquellen auf den bodennahen O_2 -Verbrauch in der Nordsee zu bekommen zeigt Abb. 4 die mittleren relativen Beiträge der wichtigsten N-Eintragsquellen: (a, b) angrenzende Meere am Beispiel des Nordatlantik (NA), (c, d) Atmosphäre, (e, f) niederländische Flüsse (NL-1; inkl. Rhein und Maas), (g, h) deutsche Flüsse (DE und (i, j) britische Flüsse (UK-2; entlang der britischen Ostküste). Die Aufteilung der Eintragsquellen entspricht dem Setup der TBNT Analyse aus Abb. 2.

Abb. 4 a und b zeigt den relativen Einfluss von Stickstoff aus dem Nordatlantik auf die GOC in der Bodenschicht für die Jahre 2002 und 2010. Den höchsten Beitrag des Nordatlantik ist in der nordwestlichen Nordsee zu beobachten (nördlich von 57°N). In diesem Bereich können die Beiträge bis zu 95 % und mehr ausmachen, mit sehr geringen Unterschieden zwischen den beiden Jahren welche vorwiegend in der östlichen Norwegischen Rinne und im Skagerrak auftreten. Die Beiträge nehmen in südöstlicher Richtung schrittweise ab und erreichen Werte kleiner als 60 % entlang der Linie von der Doggerbank zur Nordspitze Dänemarks. In der südlichen Bucht reduzieren sich die Beiträge von offshore um 40 % auf 5 % in der Nähe der Einträge von Elbe und Weser.

In Abb. 4 c und d sind die relativen Beiträge aus der atmosphärischen Stickstoffdeposition für die beiden Jahre 2002 und 2020 abgebildet. Die höchsten Beiträge liegen außerhalb der Nordsee in der Belt Region, in der die direkten Einträge von Flüssen gering ausfällt. In der östlichen Nordsee erreicht der Beitrag der atmosphärischen Stickstoffdeposition auf die GOC im Jahre 2010 Werte größer 15 %. In der südlichen Nordsee reichen die Beiträge von 10 % bis 15 %, mit Ausnahme der kontinentalen Küstenregion welche durch die Beiträge aus den Flüssen dominiert wird. Generell reduziert sich der Beitrag aus der atmosphärischen Stickstoffdeposition auf die GOC zur nordwestlichen Nordsee hin stetig. In dieser Region treten konstant Werte kleiner 5 % auf.

In Abbildung 4 e und f wird der relative Einfluss der Einträge aus dem Rhein und der Maas, welche in der Quelle NL-1 zusammen analysiert werden, auf die GOC für die Jahre 2002 und 2010 abgebildet. Die Einträge aus NL-1 zeigen sehr hohe Werte im direkten Umfeld der Mündungen der beiden Flüsse und eine starke Abnahme zur offenen Nordsee hin. In 2002 zeigt sich eine großflächigere Auswirkung der Stickstoffeinträge aus NL-1 auf die südöstliche Nordsee im Vergleich zu 2010. Interessant ist, dass in beiden Jahren die Elbe, als Beitrag der deutschen Flüsse in Abb. 4 g und f, Hochwasser führten, was zu einer gewissen Blockade für die Einträge aus den NL-1 Stickstoffquellen führte. Daher geben die Darstellungen der relativen Beiträge von NL-1 für die beiden Jahre nur ein reduziertes Muster der Einflussnahme aus dieser Stickstoffquelle wieder. Im Umkehrschluss sind die Beiträge der deutschen Flüsse in Abb. 4 g und h deutlich überhöht. In normalen Jahren ohne Flut werden nur im unmittelbaren Mündungsbereich der Flüsse hohe Beiträge von 80 % und mehr aufgezeigt. Allerdings zeigt sich im Jahre 2010 eine deutlich größere räumliche Ausdehnung von Werten um 80 % im Vergleich zum Jahre 2002.

Für die Flüsse an der englischen Ostküste UK-2 (The Wash, Humber und Tees) in Abb. 4 i und j zeigen die Verteilungen der Beiträge zum GOC hohe Werte in unmittelbarer Nähe der Einträge in die Nordsee. Der Einfluss auf Gebiete südwestlich entlang der Küste, und damit dem Küstenstrom folgend, fällt überraschend gering aus. Im Gegensatz dazu beeinflussen die relativen Beiträge weite Teile der südöstlichen Nordsee, allerdings auf einem niedrigen Niveau von um 10 %.

Betrachtet man die relativen Beiträge der verschiedenen N-Einträge (Abb. 4), so zeigt sich, dass der GOC in der gesamten nördlichen und weiten Teilen der zentralen Nordsee durch die N-Eintrag des NA (als wichtigster Beitrag der angrenzenden Meere in dieser Region) dominiert wird (Beitrag > 75%). In der westlichen Nordsee reicht dessen großer Einfluss (> 50%) bis etwa 53 °N, wohingegen er in der östlichen Nordsee lediglich bis etwa 57 °N reicht. Diese räumliche Verteilung spiegelt im wesentlichen die zyklonale Zirkulation in der Nordsee wieder, welche durch den im Westen weit nach Süden reichenden Einstrom atlantischen Wassers stark beeinflusst ist.

In der südlichen Nordsee zeigt sich ein komplexeres Bild. Hier spielen sowohl der NA, als auch der EC (hier nicht gezeigt) eine relevante Rolle. Daneben trägt jedoch besonders in den Offshore-Regionen der Nordsee und an der dänischen Nordwestküste die Atmosphäre einen wesentlichen Teil (15-20%) bei.

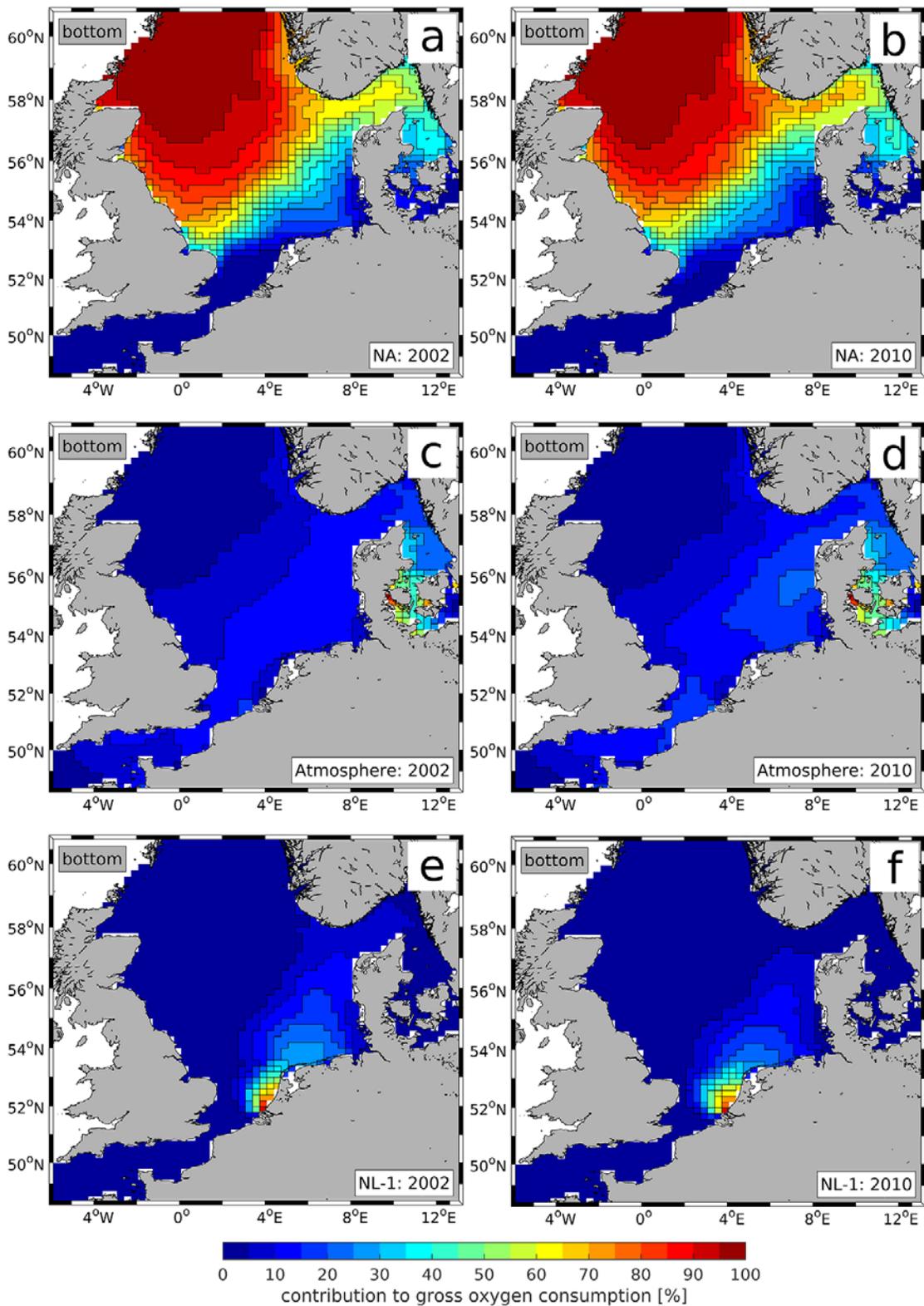


Abbildung 4: Räumliche Verteilung der relativen Beiträge der relativen Beiträge der N-Einträge aus (a,b) Nordatlantik, (c,d) Atmosphäre und (e,f) niederländischen Flüssen (NL-1; inkl. Rhein und Maas) für die Jahre (a,c,e) 2002 und (b,d,f) 2010.

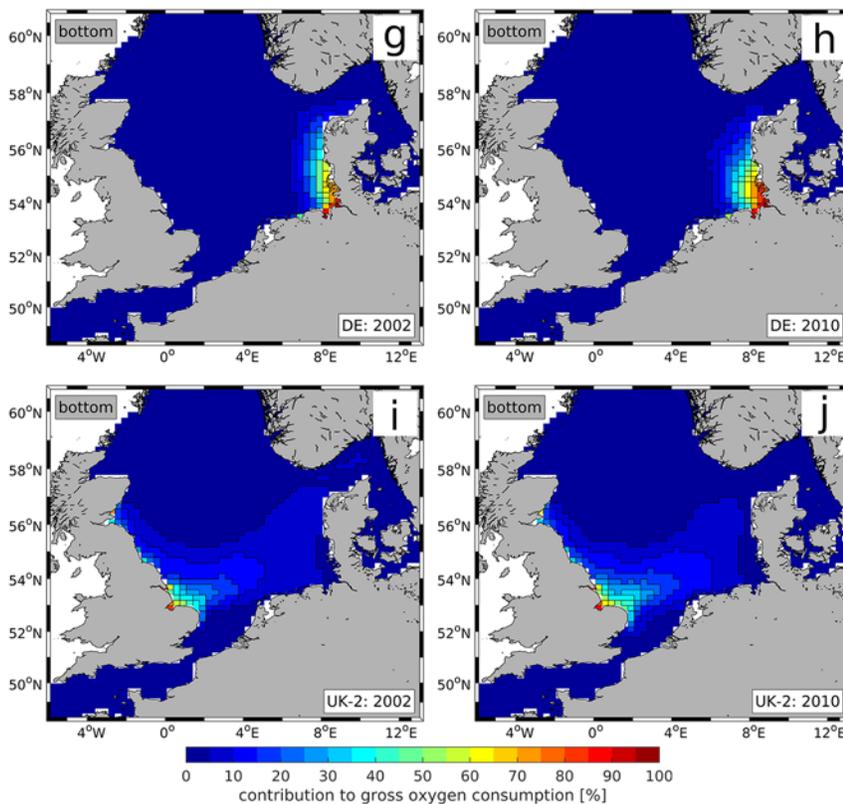


Abbildung 4 folgend: Räumliche Verteilung der relativen Beiträge der relativen Beiträge der N-Einträge aus (g,h) deutschen Flüssen (DE) und (i,j) britischen Flüssen (UK-2), für die Jahre (g,i) 2002 und (h,j) 2010.

Die N-Einträge der DE, NL-1 und UK-2 Flüsse spielen in der südlichen Nordsee ebenfalls eine wesentliche Rolle. Erstere haben speziell entlang der deutsch-dänischen Westküste einen großen Einfluss auf die GOC mit Beiträgen von bis zu 100% in der inneren deutschen Bucht und Beiträgen von bis zu 25% bis etwa 56 °N und 7 °O. Genau wie bei den DE Flüssen haben auch die N-Einträge der NL-1 als auch die UK-2 Flüsse einen großen Einfluss (bis zu 100%) auf die GOC in den Flusseintragsgebieten. Darüber hinaus wirken sich deren N-Einträge jedoch auch noch weit in die zentralen und östlichen Regionen der südlichen Nordsee aus, was ebenfalls auf die zyklonale Zirkulation der Nordsee zurückzuführen ist.

Quellspezifischer O₂-Verbrauch in der O₂-Defizitzone

In diesem Abschnitt soll die zwischenjährliche Variabilität der GOC in der Region, in der die geringsten O₂-Konzentrationen simuliert werden, im Folgenden als „O₂-Defizitzone (ODZ)“ bezeichnet, genauer betrachtet werden. Dazu werden zunächst die beiden Jahre 2002 und 2010 sowohl untereinander als auch mit dem Mittel über die Jahre 2000-2014 verglichen.

Tabelle 1: Jährlich integrierte Brutto O₂Verbrauch (GOC) und die relativen Anteile der verschiedenen Quellen für das Untersuchungsgebiet 1 (ODZ) für 2002, 2010 und gemittelt über 2000-2014.

Jahr	2002	2010	2000-2014
GOC [g O ₂ m ⁻² a ⁻¹]	164,9	115,0	141,1
Atmosphäre	13,1 %	20,3 %	16,8 %
DE	9,3 %	12,2 %	10,2 %
NL-1	14,7 %	10,7 %	11,7 %
NL-2	3,7 %	2,7 %	3,2 %
BE	1,5 %	0,9 %	1,1 %
FR	4,2 %	3,3 %	3,0 %
UK-1	3,1 %	2,8 %	2,6 %
UK-1	7,4 %	7,0 %	7,5 %
NO	<0,1 %	0,2 %	0,1 %
NA	37,4 %	31,6 %	38,0 %
EC	4,3 %	5,7 %	4,2 %
BS	<0,1 %	0,3 %	0,1 %
Rest	1,2 %	2,3 %	1,5 %

In Tab. 1 wird der integrierte Brutto O₂ Verbrauch (GOC) zusammen mit den relativen Beiträgen der einzelnen Stickstoffquellen für die Jahre 2002, 2010 und als Mittel für den Zeitraum 2000 bis 2014 für das Untersuchungsgebiet ODZ (Region 1) ausgewiesen. Dabei beträgt die mittlere Schichtdicke der Bodenschicht 6,5 m. Mit 164,9 g O₂ m⁻² a⁻¹ fällt die GOC im Jahre 2002 ca 1.4 mal stärker aus im Vergleich zu 2010. Im Vergleich mit dem Mittel über den Zeitraum 2000 bis 2014 weist diese GOC Werte diese beiden Jahre als extreme Jahre aus.

Der Beitrag des Nordatlantik ist für beide Jahre mit Werten von 37,4 % und 31,6 % die stärkste Einzelquelle, gefolgt von der atmosphärischen Stickstoffdeposition mit 13,1 % und 20,3 % für 2002 und 2010. Mit Werten von 14,7 % und 10,7 % spiegeln die niederländischen Einträge für NL-1, welche den Rhein und die Maas beinhalten, die stärksten Flusseinträge wieder. Es folgen die deutschen

Beiträge (DE) in die ODZ mit 9,3 % und 12,2 % jeweils für die Jahre 2002 und 2010. Die Beiträge der östlichen Flusseinträge vom Vereinigten Königreich (UK-2) entsprechen etwa 7 % der Stickstoffbeiträge für beide Jahre.

Summiert man die Einflüsse der Flüsse und aller anderen Quellen, so ergibt sich eine Verteilung von 45,1 % für flussbezogene Quellen im Vergleich zu 45,9 % für das Jahr 2002, und 42,1 % zu 54,9 % für 2010. Damit fällt das Jahr 2002 mit der höheren GOC überein mit einem gesteigerten Beitrag der flussbezogenen Quellen. Die volle Komplexität des zugrunde liegenden System zeigt sich anhand der Tatsache, dass die Beiträge der deutschen Flüsse, als einer der nächsten Quelle zum Untersuchungsgebiet ODZ, als auch die der atmosphärische Stickstoffdeposition in diesem Jahr geringer ausfallen im Vergleich zum Jahre 2010.

Im Vergleich zu den beiden einzelnen Jahren zeigt Tab. 1 auch die Mittelwerte der Beiträge für die einzelnen Quellen für die Jahre 2000 bis 2014. Die Beiträge für NL-1 mit 11,7 % weisen den Wert für das Jahr 2002 mit 14,7 % als außerordentlich hoch aus. Die meisten anderen Quellen zeigen Abweichungen von weniger als 1 %, mit Ausnahme der atmosphärischen Stickstoffdeposition welche für 2002 etwa 3 % niedriger ausfällt. Die Summe der flussbezogenen Beiträge basierend auf diesen Mittelwerten liegt bei 40,9 %, im Vergleich zu 59,1 % für die weiteren Stickstoffquellen zum GOC in der Bodenschicht des Untersuchungsgebietes ODZ.

Da der Bodensauerstoff nur während der Schichtungsperiode abnimmt, ist es wichtig die GOC Verlustterme während dieser Periode genauer zu analysieren. Abb. 5 zeigt die Zeitserie des mittleren täglichen, bodennahen GOC während der saisonalen Schichtung (in $\text{g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) in den Einzeljahren 2000-2014 und gemittelt über die Schichtungsperioden des Gesamtzeitraums. Die Berechnung der Schichtungsdauer wurde in Kap. 3.1 im UFO13 Endbericht beschrieben. Die Länge der Balken gibt den täglichen Gesamtverbrauch wieder, während die unterschiedlichen Farben die Beiträge der verschiedenen N-Eintragsquellen (siehe Legende) abbilden.

Hier zeigt sich einerseits, dass der Beitrag des Nordatlantik (NA) sowohl im Mittel als auch in allen Einzeljahren einen wesentlichen Beitrag darstellt (mittlerer relativer Beitrag: 41,1%). In diesem Zusammenhang ist jedoch auch deutlich hervorzuheben, dass der integrierte Beitrag der N-Einträge aus den Flüssen in einer sehr ähnlichen Größenordnung liegt (38,2%). Zudem spielen die atmosphärischen Beiträge ebenfalls eine relevante Rolle (16,5%).

Es zeigt sich weiterhin, wie außergewöhnlich die beiden bisher betrachteten einzelnen Jahre 2002 und 2010 sind. Während 2002, mit den höchsten Beiträgen zum GOC ($0,61 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), nur knapp die Jahre 2000 und 2011 in der Summe der Zehrungsprozesse für die Region ODZ übertrifft, bildet 2010 mit den niedrigsten summierten Beiträge zum GOC ($0,32 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) ein eindeutiges Minimum, welches von 2009 gefolgt wird. Die Schichtungsdauer betrug im Mittel 160 Tage. Das Jahr 2002 verweist mit 187 Tagen die maximal auftretende Schichtungsdauer aus, was auch das Maximum der aggregierten Zehrungsprozesse erklärt. Im Gegensatz dazu weist das Jahr 2010 mit 175 Tagen eine Schichtungsdauer auf die leicht über der mittleren Schichtungsdauer liegt, und damit das extreme Minimum nicht erklären kann. Das Minimum liegt bei 124 Tage im Jahre 2008.

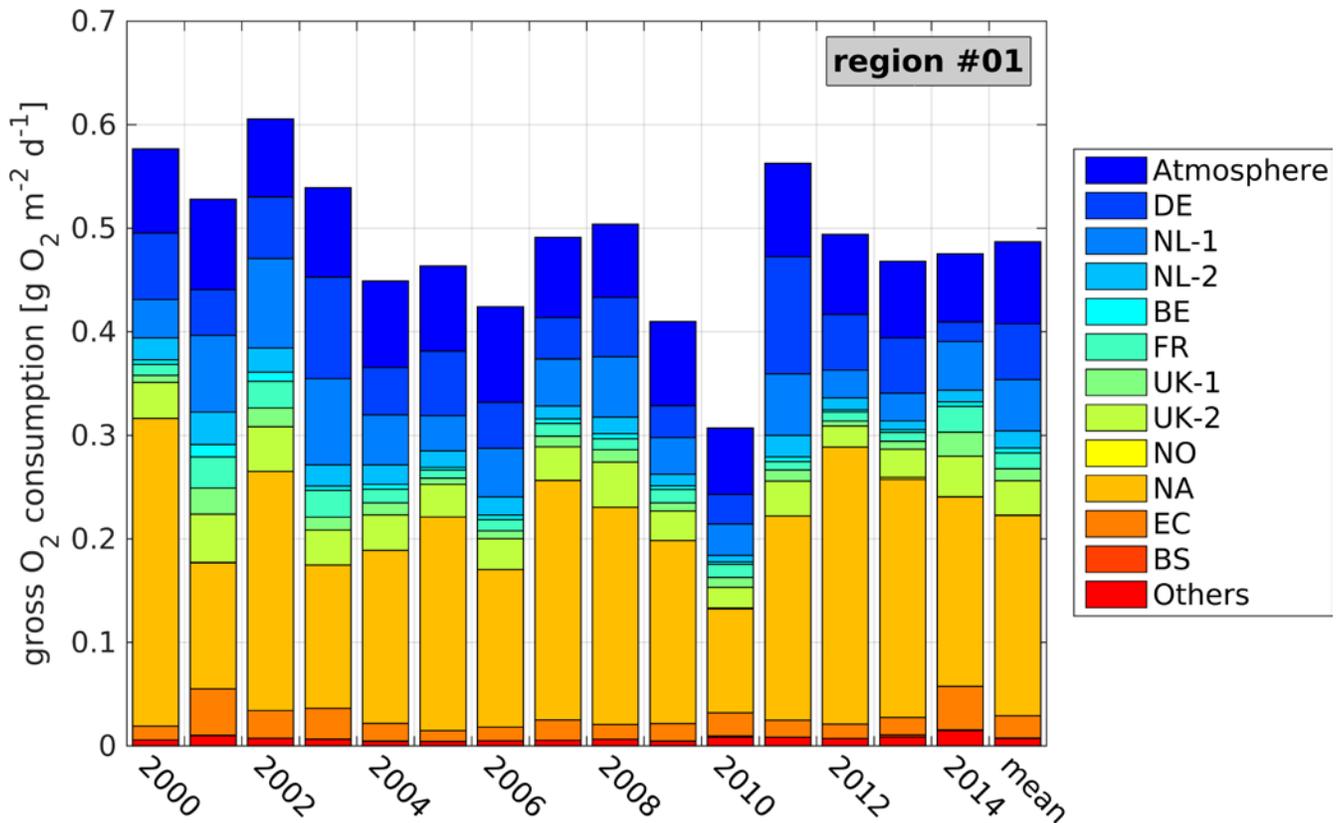


Abbildung 5: Mittlerer, täglicher GOC in der ODZ während der saisonalen Schichtung in den Jahren 2000-2014 und gemittelt über die Schichtungsperioden des Gesamtzeitraums („mean“). Die unterschiedlichen Farben markieren die Beiträge der verschiedenen N-Eintragsquellen (s. Legende).

In 2002 sind die Flussbeiträge zum GOC (43,9%) sogar minimal größer als jene aus den angrenzenden Meeren (NA, EC und BS: 43,8%), was insbesondere auf die hohen Beiträge der niederländischen (NL-1) und deutschen Flüsse, aber auch der britischen Flüsse (UK-2) zurückzuführen ist. Hingegen fallen in 2010 sowohl die Flussbeiträge als auch jene der angrenzenden Meere sehr gering aus, was den sehr niedrigen GOC zur Folge hat.

Das Untersuchungsgebiet 2 „Oyster Ground“ (siehe Abb. 3) diente bisher zur Untersuchung der Sauerstoffdynamik im Vergleich zu Messungen, bei der für die Jahre 2007 und 2008 Sauerstoffdefizitevents nachweisen werden konnten (Greenwood et al., 2010). Daher soll die TBNT Analyse des GOC auch auf dieses Untersuchungsgebiet angewendet werden. Abb. 6 zeigt die Zeitserie des mittleren täglichen, bodennahen GOC während der saisonalen Schichtung (in $\text{g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) in den Einzeljahren 2002 und 2010 und gemittelt über die Schichtungsperioden des Gesamtzeitraums 2000 bis 2014 für die Region Oyster Ground. Die Schichtungsdauer ist vergleichbar mit der ODZ, mit einer mittleren Schichtungsdauer von 163 Tage, sowie Maxima von 180 Tage in 2014 und ein Minimum von 127 Tage in 2008.

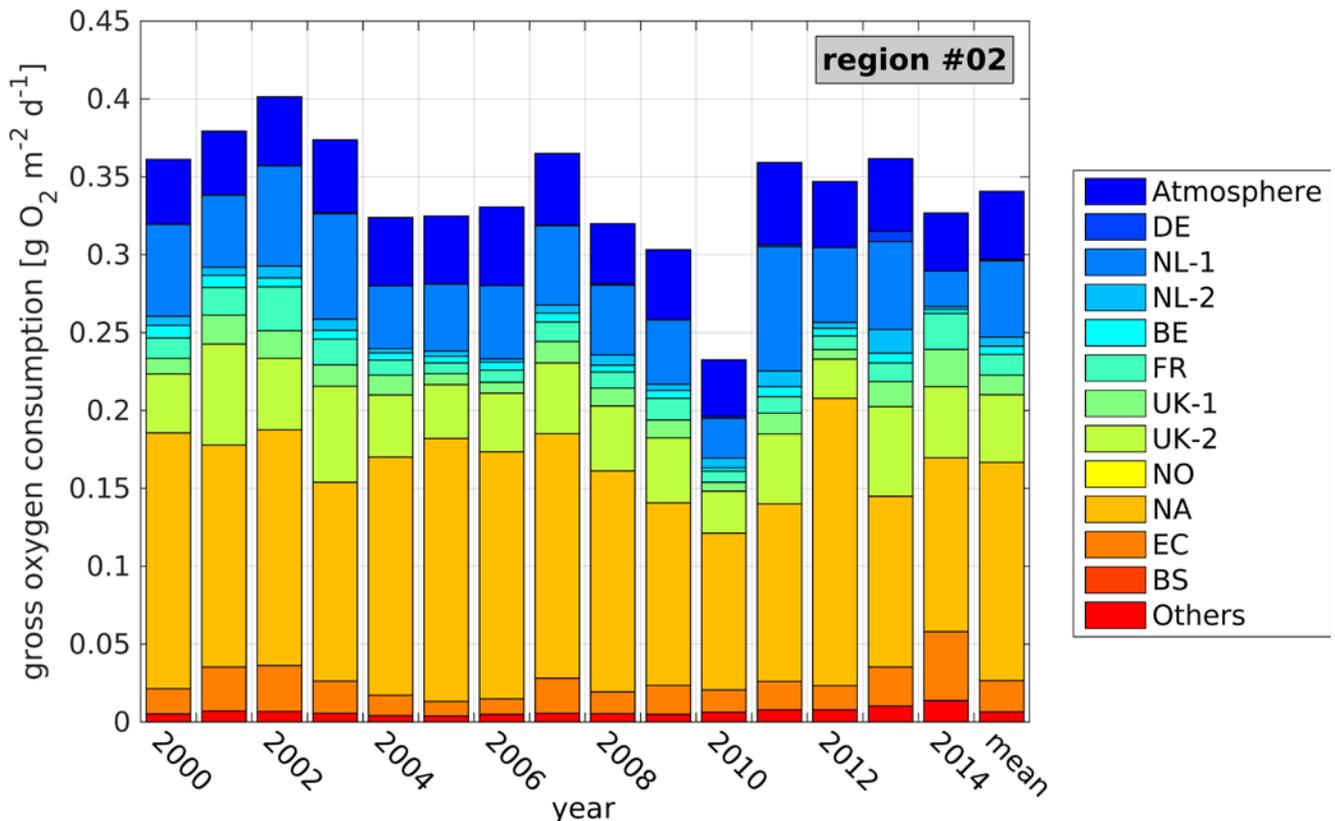


Abbildung 6: Mittlerer, täglicher GOC in der Region Oyster Ground während der saisonalen Schichtung in den Jahren 2000-2014 und gemittelt über die Schichtungsperioden des Gesamtzeitraums („mean“). Die unterschiedlichen Farben markieren die Beiträge der verschiedenen N-Eintragsquellen

Generell zeigt ein Vergleich der täglichen GOC Raten, dass diese im Untersuchungsgebiet 2 Oyster Ground gegenüber dem Untersuchungsgebiet ODZ um das 1,5 bis 2-fache geringer ausfallen. Der Maximalwert in Abb. 6 weist $0,4 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ für das Jahr 2002 und einen Minimalwert von $0,23 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ in 2010 aus. Diese Unterschiede sind nur teilweise auf die Dicke der Bodenschicht zurückzuführen, da der Oyster Ground mit 5,5 m nur eine geringfügig geringere Schichtdicke gegenüber der ODZ mit 6.5 m aufweist.

Die Differenzen zwischen den Jahren basieren auf den Unterschieden in den Stickstoffquellen der einzelnen Jahren, welche sich für den Oyster Ground anders zusammensetzen als für die ODZ in der südöstlichen Nordsee. Obwohl der Anteil an flussbedingten Einträgen mit 38,8% eine vergleichbare Größe wie bei der ODZ einnimmt, verteilen sich die relativen Anteile der einzelnen Quellen sehr unterschiedlich. So weisen die deutschen Beiträge in den meisten Jahren einen verschwindend geringen Anteil auf, während derjenige aus der Gruppe der UK-2 Flüsse mit 12,7% deutlich höher ausfällt als in der ODZ. Diese Änderungen beruhen im wesentlichen aus der geographischen Lage des Oyster Ground relative zu den deutschen Flüssen bzw. den Flüssen aus der UK-2 Gruppe. Während die deutschen

Flüsse stromabwärts des kontinentalen Küstenstroms in Bezug auf den Oyster Ground liegen, sind die Flüsse der UK-2 Gruppe stromaufwärts positioniert und können das Gebiet des Oyster Ground direkter beeinflussen. Die gleiche Begründung ergibt sich auch für die Flüsse der NL-1 Gruppe (Rhein und Maas), welche mit einem mittleren Beitrag von 14,3% ebenfalls einen höheren Beitrag als in der ODZ aufweisen.

WFD Reduktionslauf

Im Jahre 2015 wurden von ICG-EMO ein Szenario in Bezug auf eine Nährstoffreduktion gemäß WRRL erstellt, welches aus den nationalen Berichten hinsichtlich der Vorgaben für die geplanten Reduktionen der einzelnen Mitglieder erarbeitet wurde. Eine gekürzte Übersicht der geplanten Reduktionen ist in Tab. 2 dargestellt. Diese Zusammenstellung basiert auf der Übersicht in Tab. 5.2 vom UfO13 Abschlussbericht, welcher auch eine umfassende Beschreibung der Berechnungen und die Herleitung der Reduktionswerte aus den nationalen Berichten beinhaltet. Als Hinweis zum Verständnis der individuellen Reduktionsziele der deutschen Flüsse soll noch erwähnt werden, dass diese auf einer Zielkonzentration von 2,8 mg l⁻¹ TN an der limnisch-marinen Grenze beruhen und entsprechend der realen Stickstofffracht einzeln berechnet wurden.

Tabelle 2: Übersicht der unter der WRRL geplanten Reduktion an DIN und organischen Stickstoff Frachten (Zusammenfassung aus Tab. 5.2 vom UfO13 Abschlussbericht, Kapitel 5)

Country	River	DIN Reduction level under WFD measures	Associated Reduction for organic N load
France	Authie/ Canche/ Seine/ Somme	50 %	50 %
Belgium	Scheldt	37 %	37 %
The Netherlands	Maas/ Rhein/ North Sea Kanal/ Lake IJssel	5 %	0 %
Germany	Ems	50 %	37 %
Germany	Weser	35 %	15 %
Germany	Elbe	29 %	9 %
United Kingdom	Alle	0 %	0 %

Die Ergebnisse für dieses WRRL Reduktionsszenario für die Deutsche AWZ wurden für die Eutrophierungsparameter DIN und Chlorophyll-a ausführlich im UfO13 Endbericht in Kapitel 6 beschrieben. Hier sollen im Folgenden die Änderungen in der bodennahen Sauerstoffkonzentration und der dazugehörigen relativen Änderungen aus den Stickstoffquellen mittels der TBNT Methodik analysiert werden, wobei im weiteren Text statt „WRRL“ die englische Bezeichnung „WFD“ verwendet wird.

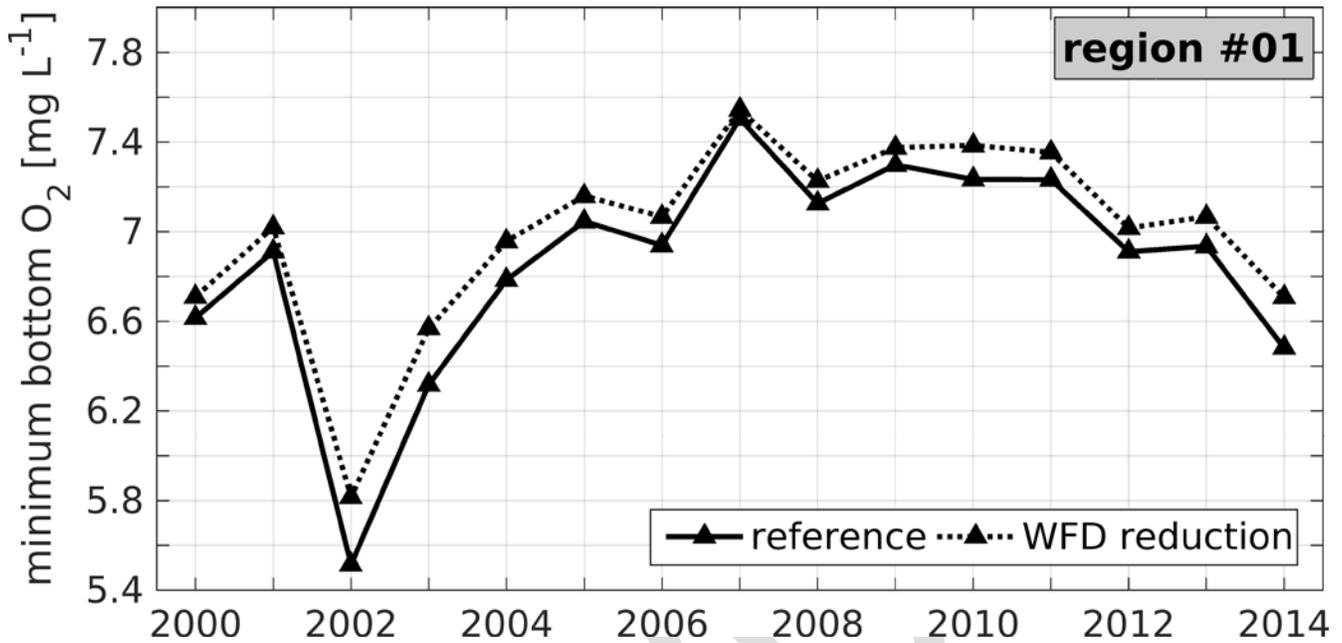


Abbildung 7: Zeitreihe der jährlichen minimalen O₂ Konzentrationen in der Bodenschicht des Untersuchungsgebietes 1 (ODZ) im Vergleich vom Referenzlauf mit dem WFD Reduktionsszenario.

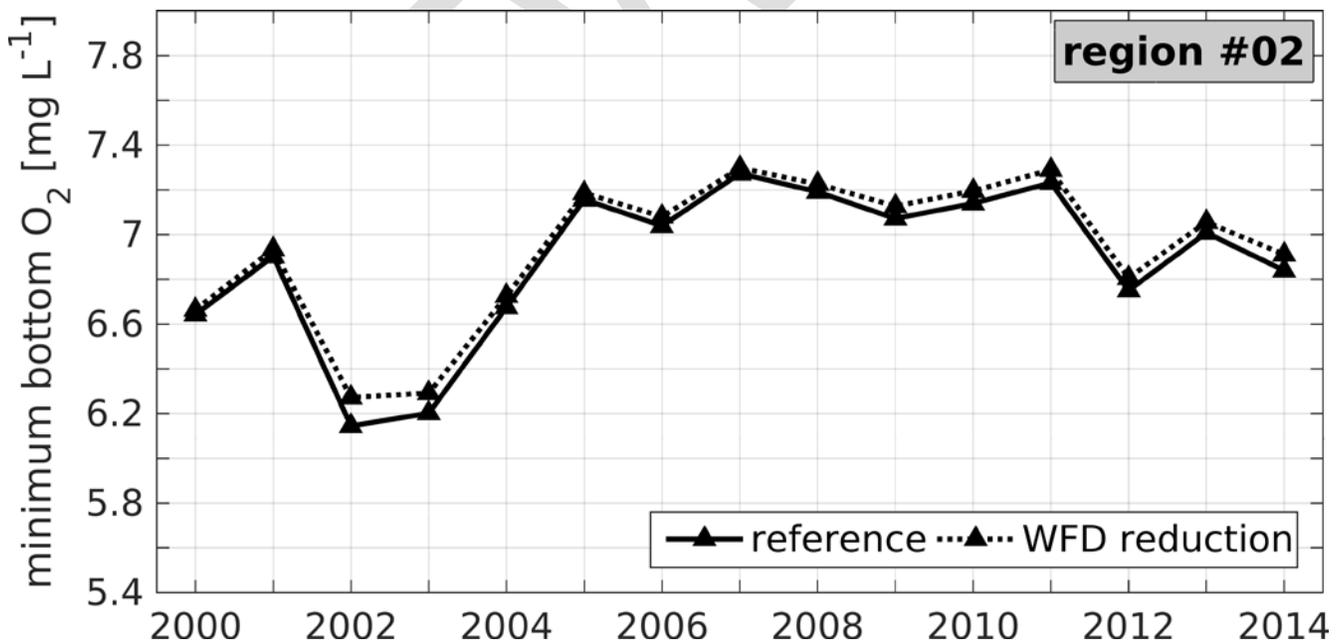


Abbildung 8: Zeitreihe der jährlichen minimalen O₂ Konzentrationen in der Bodenschicht des Untersuchungsgebietes 2 (Oyster Ground) im Vergleich vom Referenzlauf mit dem WFD Reduktionsszenario.

Abb. 7 zeigt die Zeitreihe der jährlichen Minima der täglichen Bodensauerstoffkonzentrationen im Untersuchungsgebiet 1 ODZ für die Jahre 2000 bis 2014 im Vergleich vom Referenzlauf zum WFD Reduktionsszenario. Generell sind die ausgewiesenen Konzentrationen im Reduktionslauf geringer als in der Simulation des Reduktionsszenarios. Die größte Differenz von $0,3 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$ tritt im Jahre 2002 auf, was einer relativen Änderung von 5,5 % entspricht. Für die anderen Jahre variiert die Differenz zwischen den beiden Simulationen von $0,04 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$ im Jahre 2007 und $0,25 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$ im Jahre 2014, im Mittel liegt diese bei $0,14 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$. In Bezug auf Events von Sauerstoffdefizit weist nur das Jahr 2002 Werte geringer als $6 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$ aus. Dies gilt sowohl für den Referenzlauf als auch für die Simulation inklusive Nährstoffreduktion entsprechend dem WFD Szenario (Tab. 2). Allerdings zeigt sich eine deutliche Wirkung in der Länge des Sauerstoffdefizitevents, welches sich von 44 Tagen im Referenzlauf auf ca. 23 Tage im WFD Reduktionsszenarios nahezu halbiert.

Abb. 8 zeigt die Zeitreihe der jährlichen Minima der täglichen Bodensauerstoffkonzentrationen im Untersuchungsgebiet 2 Oyster Ground für die Jahre 2000 bis 2014 im Vergleich vom Referenzlauf zum WFD Reduktionsszenario. Die maximale Differenz tritt wie auch für das Gebiet ODZ im Jahre 2002 auf, allerdings mit $0,13 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$ um das 2,4 fache geringer als in der ODZ. Im Mittel liegen die minimalen Werte der Bodenkonzentration für O_2 im Reduktionsszenario um $0,05 \text{ vmg O}_2 \text{ l}^{-1}$ höher im Vergleich zum Referenzlauf.

In Tab. 3 sind die Ergebnisse des gemittelten täglicher Brutto O_2 Verbrauchs (GOC) während der Schichtungsperiode und die relativen Anteile der verschiedenen Quellen, im Vergleich zwischen dem Standardlauf und dem WFD Reduktionsszenario, für das Untersuchungsgebiet 1 (ODZ) für die Jahre 2002 und 2010 sowie gemittelt über 2000-2014 dargestellt. Die rot markierten Werte weisen eine Erhöhung der relativen Beiträge im Reduktionsszenario für die jeweilige Stickstoffquelle aus.

In den beiden betrachteten einzelnen Jahren 2002 und 2010 verringert sich der gemittelte tägliche Brutto O_2 Verbrauch (GOC) von $0,61$ auf $0,56 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ in 2002 und von $0,32$ auf $0,30 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Im Mittel über die simulierten Jahre 2000 bis 2014 senkt sich der Wert von $0,49$ auf $0,456 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

Für die deutschen DE Flüsse zeigt sich aufgrund des hohen Reduktionsniveaus im WFD Szenario ein wesentlicher Rückgang der relativen Anteile am GOC von ca 10 % auf 7 % für alle Jahr und im Jahresmittel. Einen deutlichen Abfall zeigen ebenfalls die relativen Beiträge von Frankreich und Belgien, allerdings basierend auf einem sehr niedrigen Niveau im Referenzlauf. Der maximale Rückgang zeigt sich für Frankreich im Jahr 2002 von 3,8 % auf 1,5 %. Im Gegensatz dazu verzeichnen die Beiträge von den Niederlanden, hier speziell NL-2, sowie die Beiträge aus dem Vereinigten Königreich, hier speziell die Beiträger der östlichen gelegenen Stickstoffquellen UK-2, eine geringfügige Zunahme an den O_2 Zehrungsprozessen (rot markiert). Dies ist der Tatsache geschuldet, dass für diese Stickstoffquellen keine Reduktion (UK) oder ein geringes Niveau von nur 5 % (NL) vorgesehen ist, so dass sich der relative Beitrag bei generell reduzierten Quellen erhöht hat. Dies erkennt man an der abschließenden Statistik der Summe der Beiträge aus Flüssen, die sich durchgehend reduziert hat (von 38,2 % auf 33,9 %), im Vergleich zur Summe der Quellen ohne die Flüsse, die um

den entsprechenden Betrag zugenommen hat.

Tabelle 3: Gemittelter täglicher Brutto O₂ Verbrauch (GOC) während der Schichtungsperiode und die relativen Anteile der verschiedenen Quellen, im Vergleich zwischen dem Standardlauf und dem WFD Reduktionsszenario, für das Gebiet 1 (ODZ) für 2002, 2010 und gemittelt über 2000-2014.

Jahr	2002	2002	2010	2010	2000-2014	2000-2014
Simulation	Ref.	WFD Red.	Ref.	WFD Red.	Ref.	WFD Red.
GOC [g O ₂ m ⁻² d ⁻¹]	0,61	0,56	0,32	0,30	0,49	0,456
Atmosphäre	12,3 %	13,3 %	20,8 %	22,4 %	16,5 %	17,7 %
DE	9,8 %	7,0 %	10,0 %	7,1 %	10,9 %	7,7 %
NL-1	13,9 %	14,2 %	9,7 %	9,7 %	9,8 %	9,9 %
NL-2	3,8 %	3,9 %	2,0 %	2,1 %	3,2 %	3,3 %
BE	1,5 %	1,0 %	0,8 %	0,5 %	0,9 %	0,6 %
FR	3,8 %	1,5 %	3,8 %	1,6 %	2,9 %	1,3 %
UK-1	2,9 %	2,9 %	3,0 %	3,1 %	2,3 %	2,4 %
UK-2	7,2 %	7,8 %	6,4 %	7,0 %	6,7 %	7,2 %
NO	<0,1 %	<0,1 %	0,4 %	0,4 %	0,1 %	0,1 %
NA	39,9 %	43,8 %	34,1 %	37,1 %	41,4 %	44,6 %
EC	3,9 %	3,5 %	6,1 %	6,0 %	3,9 %	3,7 %
BS	<0,1 %	<0,1 %	0,6 %	0,6 %	0,1 %	0,1 %
Rest	1,2 %	1,2 %	2,4 %	2,5 %	1,4 %	1,5 %
Summe Flüsse	43,9 %	39,4 %	38,4 %	33,9 %	38,2 %	33,9 %
Summe nich Fl.	56,1 %	60,6 %	61,6 %	66,1 %	61,8 %	66,1 %

Noch deutlicher als bei den UK und NL Quellen zeigt sich die Zunahme der relativen Beiträge an den O₂ Zehrungsprozessen für die Quellen aus der Atmosphäre und aus dem Nordatlantik. Im Mittel steigern sich die Beiträge aus der Atmosphäre von 16,5 % auf 17,7 % und vom Nordatlantik von 41,4 % auf 44,6 %. Auch diese Quellen werden im WFD Reduktionslauf im Szenario-Setup konstant gehalten und es ergibt sich aufgrund der reduzierten Einträge aus den Flüssen eine Erhöhung der relativen Beiträge für diese Stickstoffquellen.

Tab. 4 zeigt die gleiche Auswertung wie Tabelle 3, allerdings für das Untersuchungsgebiet 2 „Oyster Ground“. Aufgrund der Lage des Gebietes und der damit verbundenen Strömungssituation zeigt sich schon im Referenzlauf, dass die deutschen Beiträge in diese Region keine Bedeutung spielen. Im Gegensatz dazu steigen die relativen Beiträge von Frankreich auf maximal 7 % im Jahre 2002. Aufgrund des hohen Reduktionsniveaus sinkt der Beitrag im Jahr 2002 im WFD Szenario auf 2,8 %, während die Beiträge aus Frankreich im Mittel von 3,8 % auf 1,7 % fallen. Belgien weist in etwa das Niveau der Beiträge wie in der ODZ auf, und im Mittel sinken die Beiträge in der WFD Simulation von 1,5 % auf 1,0 %. Bis auf das Jahr 2002, in dem die beiden Beiträge aus den Niederlanden leicht ansteigen, weisen die Beiträge für das Jahr 2010 und die Jahresmittel leicht sinkende Beiträge an den O₂-Zehrungsprozessen aus, obwohl für NL-1 im Referenzlauf im Mittel ein Beitrag von 14,3 % ausgewiesen wird. Die Beiträge von UK-2 weisen durchgehend erhöhte Werte im WFD Szenario aus, im Mittel steigen die Beiträge von 12,7 % auf 13,3 %. Auch die Beiträge aus den konstant gehaltenen Stickstoffquellen für die Atmosphäre und dem Nordatlantik zeigen leichte Steigerungen in den relativen Beiträgen, im Mittel von 13,0 % auf 13,4 %, und von 41,4 auf 43,1 %. Damit liegt der Beitrag aus der atmosphärischen Stickstoffdeposition auf einem niedrigeren Niveau als in der ODZ während der Einfluss des Nordatlantik in beiden Gebieten in etwa gleich groß ausfällt. Insgesamt fällt die Reduktion aus der Summe der Flusseinträge im Oyster Ground geringer aus als in der ODZ, von 39,8 % auf 37,8 % im Gegensatz zur ODZ mit einer Reduktion von 38,2 % auf 33,9 %, was sicher der Lage des Untersuchungsgebietes 2 „Oyster Ground“ geschuldet ist.

Table 4: Gemittelter täglicher Brutto O₂ Verbrauch (GOC) während der Schichtungsperiode und die relativen Anteile der verschiedenen Quellen, im Vergleich zwischen dem Standardlauf und dem WFD Reduktionsszenario, für das Gebiet2 (Oyster Ground) für 2002, 2010 und gemittelt über 2000-2014.

Jahr	2002	2002	2010	2010	2000-2014	2000-2014
Simulation	Ref.	WFD Red.	Ref.	WFD Red.	Ref.	WFD Red.
GOC [g O ₂ m ⁻² d ⁻¹]	0,40	0,38	0,23	0,23	0,34	0,33
Atmosphäre	11,0 %	11,6 %	15,6 %	16,2 %	13,0 %	13,4 %
DE	0,1 %	<0,1 %	0,5 %	0,3 %	0,2 %	0,1 %
NL-1	16,0 %	16,7 %	11,0 %	10,8 %	14,3 %	14,2 %
NL-2	1,9 %	2,0 %	2,7 %	2,6 %	1,7 %	1,7 %
BE	1,4 %	0,9 %	0,9 %	0,6 %	1,5 %	1,0 %
FR	7,0 %	2,8 %	3,1 %	1,2 %	3,8 %	1,7 %
UK-1	4,4 %	4,6 %	2,5 %	2,5 %	3,7 %	3,8 %
UK-2	11,5 %	12,4 %	11,6 %	12,1 %	12,7 %	13,3 %
NO	- %	- %	- %	- %	- %	- %
NA	37,7 %	40,5 %	43,3 %	45,1 %	41,4 %	43,1 %
EC	7,3 %	6,8 %	6,1 %	5,9 %	5,8 %	5,7 %
BS	- %	- %	- %	- %	- %	- %
Rest	1,7 %	1,7 %	2,7 %	2,7 %	2,0 %	2,0 %
Summe Flüsse	44,0 %	41,1 %	34,9 %	32,8 %	39,8 %	37,8 %
Summe nich Fl.	56,0 %	58,9 %	65,1 %	67,2 %	60,2 %	62,2 %

Fazit

Die Kopplung des GOC an den quellspezifisch markierten N ermöglicht die Quantifizierung des Einflusses verschiedener N-Eintragsquellen auf die O₂-Dynamik der Nordsee. Die Ergebnisse zeigen, dass der GOC in der nördlichen Nordsee durch die Einträge aus dem Nordatlantik dominiert wird. Hingegen spielen in der südlichen Nordsee die N-Einträge aus angrenzenden Meeren (Nordatlantik und englischer Kanal), aus Flüssen sowie der Atmosphäre eine wichtige Rolle.

In der ODZ – der Region mit den geringsten simulierten O₂-Konzentrationen – ist der atlantische Einfluss im Mittel (2000-2014) am höchsten, allerdings nur wenig höher als der integrierte Beitrag der N-Einträge aus Flüssen. Dies deutet darauf hin, dass sorgfältig definierte Reduktionen der N-Flusseinträge ein wirksames Mittel zur Verbesserung der O₂-Bedingungen in der südöstlichen Nordsee darstellen. Im Gebiet des „Oyster Ground“ spielen die deutschen Beiträge eine verschwindend geringe Rolle, dafür zeigen hier die WFD Reduktionslevel von Frankreich eine stärkere Wirkung im Vergleich zur ODZ.

Generell erweist sich die Ausweitung der TBNT Analyse auf Sauerstoff als wirksames Mittel um den von OSPAR geforderten „source oriented approach“ in der Auswirkung für die Sauerstoffdynamik in Bezug auf die Eintragsquellen zu quantifizieren. Allerdings bedarf es noch eines verbesserten Verständnisses in den Änderungen vom Referenzlauf zum WFD Reduktionen in Bezug auf die Auswirkungen der Reduktion der Stickstoffquellen und konstant gehaltener Quellen wie die marinen Randbedingungen, speziell der Nordatlantik, oder der atmosphärischen Stickstoffdeposition. Hier könnten weitere Szenarien, z.B. in Bezug auf die historische Situation der Nordsee (~1860) oder der Hochphase der Eutrophierung (~1980) Einblicke in die zeitliche Entwicklung der TBNT Verteilung der Stickstoffquellen für die Nordsee liefern.

Daneben lässt der ebenfalls relevante Beitrag des atmosphärischen Eintrags schließen, dass eine Reduktion der N-Emissionen in die Atmosphäre – wie im Göteborg-Protokoll vereinbart – ebenfalls zu einer Verbesserung der O₂-Bedingungen führen wird.

Literatur

Greenwood, N., Parker, E.R., Fernand, L., Sivyer, D.B., Weston, K., Painting, S.J., Kröger, S., Forster, R.M., Lees, H.E., Mills, D.K., und Laane, R.W.P.M., (2010): Detection of low bottom water oxygen concentrations in the North Sea; implications for monitoring and assessment of ecosystem health. *Biogeosciences*, 7, 1357-1373, doi: 10.5194/bg-7-1357-2010

Fabian Große, Markus Kreuz, Hermann-Josef Lenhart, Johannes Pätsch, and Thomas Pohlmann (2017), A Novel Modeling Approach to Quantify the Influence of Nitrogen Inputs on the Oxygen Dynamics of the North Sea, *Frontiers in Marine Science*, Section Marine Biogeochemistry, *Front. Mar. Sci.*, November 2017, Volume 4, Article 383; <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00383>

OSPAR (2010), Results of the 2009 ICG-EMO Workshop on transboundary nutrient transport. Vol. 540/2011. OSPAR Commission, London, HASEC 11/6/Info.1-E., 2010.