

9 Synthese der Ergebnisse

9.1 Rekonstruktion der Paläooberflächenwassertemperaturen – Globales oder regionales Signal?

Die anhand des Un sättigungsgrades der C_{37} -Methylketone ermittelten Oberflächenwassertemperaturen weisen in den untersuchten Zeitabschnitten starke Schwankungen auf. Sie reagieren sowohl auf globale klimatische Entwicklungen als auch auf die regionalen Gegebenheiten.

Geographische Breite

Aufgrund der unterschiedlichen geographischen Breite nehmen die ermittelten Oberflächenwassertemperaturen des Holozäns erwartungsgemäß von Norden nach Süden hin ab. Die einzige Ausnahme bilden die Sedimente aus dem Kongo-Becken. Die SST-Werte in den Sedimenten des Kolbenlotkerns GeoB 1008-3 (ca. 6°S, Schneider et al., 1995) liegen innerhalb der letzten 260 ka durchschnittlich etwa 2°C höher als in den Sedimenten der ODP-Bohrung 1075A (ca. 4°S). Aufgrund der geringeren geographischen Breite wäre eher das Gegenteil zu erwarten gewesen.

Es ist nicht ganz auszuschließen, daß die beobachteten Unterschiede auf laborspezifische Artefakte zurückzuführen sind. Aufgrund der annähernden Übereinstimmung der ermittelten Oberflächenwassertemperaturen in vier Sedimentproben des GeoB-Kerns 1008-3 sind sie für Differenzen von 2°C aber eher unwahrscheinlich. Die in dieser Arbeit verwendete Methode zur Bestimmung der Alkenon-SST-Daten wurde im Rahmen eines Interkalibrationsversuches mehrerer internationaler Labore getestet (Rosell-Melé et al., 1999). Die ermittelten SST-Werte lagen innerhalb der statistischen Fehlergrenzen. Es ist daher anzunehmen, daß die beobachteten Unterschiede zwischen Schneider et al. (1995) und dieser Arbeit eher auf regionale Besonderheiten der verschiedenen Lokationen zurückzuführen sind.

Unterstützt wird diese Annahme durch die SST-Werte, die von Versteegh (frdl. pers. Mitteilung) für den Kern T89-16 (ca. 4°S) bestimmt wurden. In Übereinstimmung mit den Analysen der Sedimente der ODP-Bohrung 1075A sind sie durchschnittlich 2°C niedriger als die von Schneider ermittelten Werte für den Kern GeoB-1008-3. Alle drei Lokationen befinden sich in einer ähnlichen Wassertiefe. Während allerdings die Lokationen ODP 1075A und T89-16 am nördlichen Rand des Kongo-Canyons liegen, befindet sich die Station GeoB 1008-3 auf der südlichen Seite. Infolgedessen ist eine unterschiedliche Beeinflussung der Ablagerungsräume aufgrund der ozeanographischen Bedingungen denkbar. Der in Richtung NW gerichtete Canyon des

Kongo könnte bei etwa 4°S einen stärkeren flußinduzierten Auftrieb als weiter südlich bewirken. Die geringeren Paläooberflächenwassertemperaturen könnten den Einfluß kälterer Tiefenwässer reflektieren.

Eine weitere mögliche Ursache für die beobachteten Temperaturunterschiede zwischen dieser Arbeit und der Studie von Schneider et al. (1995) läßt sich ebenfalls vom heutigen durchschnittlichen Jahrestemperaturverlauf ableiten. Steile Temperaturgradienten treten vor allem im Frühling und im Herbst auf. Sedimentfallenuntersuchungen haben ergeben, daß in genau diesen Zeiten der Export von Alkenonen aus dem Oberflächenwasser ausgeprägte Maxima aufweist (Schneider et al., 1995). Würde das Produktivitätsmaximum im Gebiet der ODP-Bohrung 1075A jahreszeitlich kurz vor dem an der Lokation GeoB 1008-3 auftreten, so könnten durchaus stark unterschiedliche Temperatursignale ins Sediment transferiert werden. Der Vergleich der Alkenon-SST-Daten der jüngsten untersuchten Sedimentproben mit den modernen Oberflächenwassertemperaturen zeigt, daß der heutige Jahresmittelwert von 25,7°C durch die Messungen von Schneider et al. (1995) gut repräsentiert wird. Die in dieser Arbeit ermittelten Oberflächenwassertemperaturen stimmen eher mit den heute im September auftretenden Temperaturen von 23,7°C überein.

Globale Klimaentwicklung

Die anhand des Unsättigungsgrades der C₃₇-Methylketone berechneten Paläooberflächenwassertemperaturen reflektieren überwiegend die beprobten Intervalle durch niedrige Temperaturen in den Glazialen und hohe Temperaturen in den Interglazialen. Die Differenz der SST-Werte zwischen dem letzten glazialen Maximum und dem Holozän liegen im erwarteten Bereich (Rosell-Melé, 1998) und verdeutlichen gleichzeitig die regionalen Unterschiede der untersuchten Ablagerungsgebiete. Die Differenz zwischen dem OIS 2 und dem OIS 1 (Termination I) steigt von <4°C an den Lokationen nördlich des Walfisch-Rückens auf >6°C weiter südlich. Ein verstärktes Auftriebsgeschehen während der Glaziale in den Hochproduktivitätsgebieten im Süden könnte Ursache für diese Unterschiede sein. Der südlichste Kern (GeoB 1722-1) nimmt bei der Betrachtung der SST-Daten eine Sonderstellung ein. Die Probennahmelokation für diesen Kern liegt etwas weiter von der Küste entfernt außerhalb der heutigen Auftriebszellen und ist daher durch weniger starke Schwankungen der SST-Werte charakterisiert. Lediglich im OIS 5 ist eine überdurchschnittliche Erwärmung des Oberflächenwassers zu verzeichnen.

Von besonderem Interesse war die Untersuchung des Sauerstoffisotopenstadiums 11, das als das wärmste und längste Interglazial der vergangenen 500 ka gilt. Die anhand des Unsättigungsgrades der C_{37} -Methylketone für die Sedimente des Kongo-Beckens (ODP-Bohrung 1075A) ermittelten Oberflächenwassertemperaturen weisen in diesem Zeitraum starke Schwankungen auf. Das OIS 11 fällt weder durch besonders hohe absolute Temperaturen noch durch eine extrem lange warme Phase auf. In den Sedimenten aus dem Angola-Becken (ODP-Bohrung 1079A) wurden über einen relativ langen Zeitraum (ca. 50 ka) Temperaturen über 24°C ermittelt. Auch hier können die regionalen Gegebenheiten an beiden Lokationen Erklärungsansätze liefern: Die ODP-Bohrung 1079A wurde auf dem Kontinentalhang vor Angola abgeteuft. Die geringe Wassertiefe und die relativ isolierte Lage in Bezug auf die Oberflächenzirkulation im östlichen Südatlantik ermöglichen eine bessere Stratifizierung der Wassersäule als an der tieferen Lokation im Einzugsbereich des Kongo (ODP-Bohrung 1075A). Dort könnte ein verstärkter flußinduzierter Auftrieb während der humiden Interglaziale zu zeitweise kälteren Oberflächenwassertemperaturen geführt haben.

Betrachtung langer geologischer Zeiträume

Das erste Auftreten der Coccolithophore *Emiliana huxleyi*, die in den modernen Ozeanen als Hauptproduzent der Alkenone gilt, wird auf 268 ka vor heute datiert. Vorläuferorganismen dieser Algen wie z.B. *Gephyrocapsa oceanica* synthetisieren ebenfalls langkettige Methylketone, deren Unsättigungsgrad von der Wachstumstemperatur abhängt. Die erfolgreiche Anwendung der U_{37}^k -Indices zur Rekonstruktion der Paläooberflächenwassertemperaturen geht bis ins Eozän zurück (Rinna et al., 2000). Die im Rahmen dieser Arbeit bestimmten SST-Werte über einen Zeitraum von 2 Millionen Jahren (ODP-Bohrung 1075A, Kongo-Becken) reflektieren die globale Abkühlung seit dem frühen Pleistozän.

9.2 CaCO₃, TOC, TS – Wechselspiel zwischen Produktivität und Erhaltung

Die Sedimente der Bohrungen 1075A (Kongo-Becken) und 1079A (Angola-Becken) der letzten 260 ka unterscheiden sich in ihren pauschalen Zusammensetzungen (Kohlenstoff-, Schwefel-Gehalte) nur wenig (Tabelle 8). Nur die Gehalte an anorganischem Kohlenstoff (umgerechnet in CaCO₃) unterscheiden sich deutlich voneinander. Die geringen CaCO₃-Gehalte im Kongo-Becken könnten sowohl auf eine geringere Produktivität (kalzifizierender Organismen) als auch auf eine schlechtere Karbonaterhaltung sowohl in der Wassersäule als auch im Sediment zurückzuführen sein. Die Karbonate im Kongo-Fächer bestehen hauptsächlich aus den Kalzispähren von Coccolithophoriden und nur zu einem geringen Anteil aus Foraminiferen-Fragmenten. Jansen (1985) führte diesen Befund auf eine hohe Aktivität von Zooplankton-Organismen zurück, durch deren Kotpillen die Coccolithophoriden auf den Meeresboden absinken. Die Karbonat-Kompensationstiefe (CCD) und die Lysokline waren während der Glaziale etwa 1000 m über den heutigen Niveaus (Jansen, 1985). Trotzdem sollten sie die Karbonatsedimentation sowohl an der Lokation im Angola-Becken als auch im Kongo-Becken (3000 m Wassertiefe) nicht beeinflusst haben. Da hohe Karbonat-Gehalte zusammen mit guten Erhaltungen der Kalkschalen auftreten (Wefer et al., 1998; Zachariasse et al., 1984), ist die postsedimentäre Auflösung von Karbonat wahrscheinlich ein bedeutender Faktor. Diese wird durch eine erhöhte Alkalinität des Porenwassers begünstigt, hervorgerufen durch Kohlendioxid, das bei der Remineralisierung von organischem Material entsteht. Die Oxidation von organischem Kohlenstoff verringert damit sowohl die TOC- als auch die CaCO₃-Gehalte in den Sedimenten.

Tabelle 8 Vergleich der durchschnittlichen Kohlenstoff- und Schwefelgehalte der Sedimente aus dem Kongo- und dem Angola-Becken (Mittelwert der letzten 260 ka)

	Kongo-Becken (1075A)	Angola-Becken (1079A)
Wassertiefe [mbsl]	2995	734
CaCO ₃ [%]	3,1	15,2
TOC [%]	2,7	2,8
TS [%]	1,6	1,3
TOC/TS	1,8	2,2

In marinen Sedimenten wird das organische Material überwiegend durch mikrobielle Sulfatreduktion abgebaut (Jørgensen, 1983). Hohe Schwefelgehalte in den Sedimenten – wie sie in den ODP-Bohrungen 1075A und 1079A bestimmt wurden – reflektieren eine hohe Aktivität sulfatreduzierender Bakterien. Die geringen TOC/TS-Verhältnisse in den Sedimenten beider Ablagerungsgebiete liegen in der gleichen Größenordnung wie in Sedimenten aus dem Schwarzen Meer (siehe Berner und Raiswell, 1983), wo euxinische Bedingungen die mikrobielle Sulfatreduktion schon in der Wassersäule ermöglichen. Das Vorkommen benthischer Foraminiferen in den Sedimenten des Kongo- und Angola-Beckens schließt anoxische Bedingungen im Tiefenwasser aus. Allerdings weisen in den Sedimenten der Bohrung 1079A die Spezies *Bolivina pseudopunctata* und *Bolivina dilatata* auf geringe Sauerstoffkonzentrationen an der Sediment-Wasser-Grenze hin (Pérez und Berger, 2000; Wefer et al., 1998). Im Rahmen dieser Arbeit wurden neben den TOC/TS-Verhältnissen auf molekularer Ebene die Stanol/Stenol-Verhältnisse ermittelt, um Aussagen über die Ablagerungsbedingungen treffen zu können. Die 5α -Cholestan- 3β -ol/Cholest- 5en - 3β -ol-Verhältnisse sind in den Sedimenten des Angola-Beckens durchschnittlich sechsmal höher als in den Sedimenten des Kongo-Beckens (vgl. Kapitel 6.2.2 und 7.2.3) und weisen damit ebenfalls auf stärker reduzierende Bedingungen im Angola-Becken hin. Im Gegensatz dazu stehen die etwas niedrigeren TOC/TS-Verhältnisse im Kongo-Becken. Ein hoher Eintrag von Eisen mit der Flußfracht des Kongo könnte hier zu einer verstärkten Fixierung des bei der Sulfatreduktion entehenden Schwefelwasserstoffs geführt haben. Um die Eisengehalte an beiden Lokationen zu vergleichen, wurden an ausgewählten Proben RFA-Messungen vorgenommen. Während die absoluten Gehalte an Eisen (ausgedrückt als Eisenoxid, Fe_2O_3) in den Sedimenten des Kongo-Beckens mit den Werten des mittleren Tonschiefers übereinstimmen (Wedepohl, 1991), enthalten die Sedimente des Angola-Beckens etwas weniger Eisen (Tabelle 9). Die Gehalte sind dort fast so gering wie in den Sapropelen des Schwarzen Meeres (Brumsack, 1988).

Tabelle 9 Vergleich der Eisengehalte der Sedimente aus dem Kongo- und dem Angola-Becken (Daten des mittleren Tonschiefers aus Wedepohl (1991) , Fe-Gehalte der Sedimente aus dem Schwarzen Meer von Brumsack (1988))

	Fe_2O_3 [%]	Fe/Al	Anzahl
Kongo-Becken	6,8	0,58	11
Mittlerer Tonschiefer	6,9	0,54	
Angola-Becken	4,9	0,43	3
Sapropelle	4,5	0,62	12

In Relation zu anderen Elementen zeigen sich allerdings kaum Unterschiede (siehe Tabelle 9 und Abbildung 56). Mit Hilfe des Dreiecksdiagramms Fe-TOC-TS können Aussagen über den Pyritisierungsgrad der Proben getroffen werden (Brumsack, 1988). Unter Fe_{korrr} versteht man den Teil des Eisens, der nicht durch Silikate festgelegt ist und daher für die Pyritbildung zur Verfügung steht (Gleichung 9.1):

$$Fe_{\text{korrr}} = Fe - 0,25\%Al \quad (9.1)$$

Diese empirische Formel basiert auf der Annahme, daß der silikatisch gebundene Eisenanteil etwa 25% des Aluminium-Gehalts ausmacht.

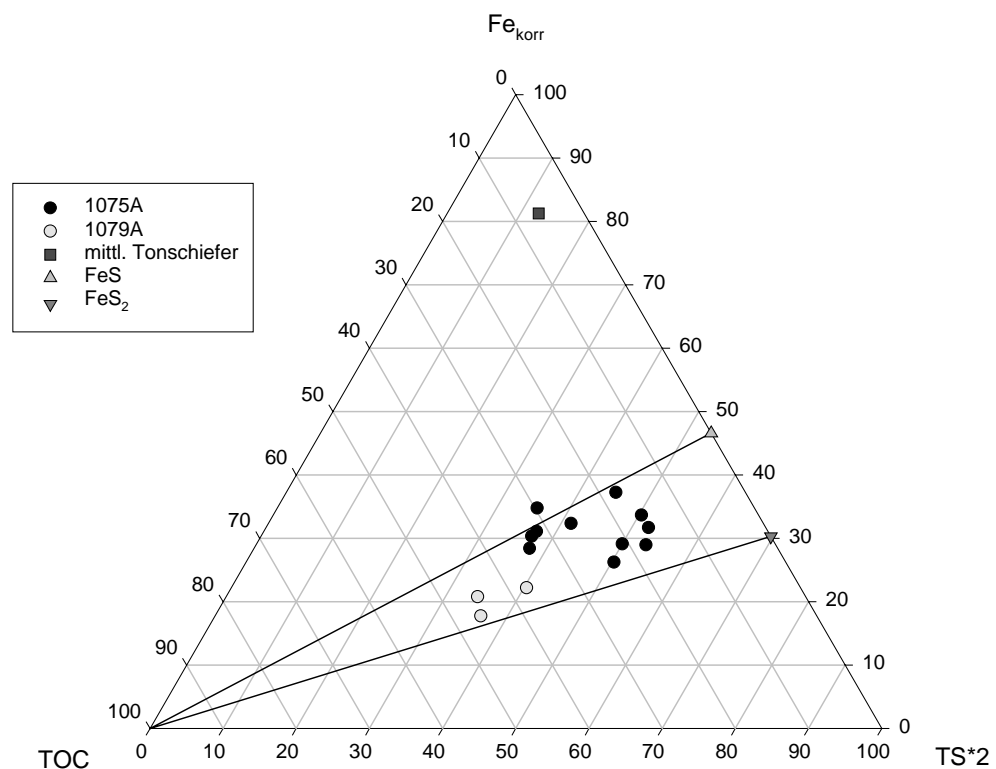


Abbildung 56 Veranschaulichung des Pyritisierungsgrades anhand der Fe-, TOC- und TS-Gehalte der Sedimente aus den Bohrungen 1075A und 1079A (mittlerer Tonschiefer als Referenz aus Wedepohl (1991))

Die analysierten Sedimentproben haben noch nicht den maximalen Pyritisierungsgrad (unterhalb der FeS₂-Linie) erreicht. Mit Teufen zwischen 14 und 118 mcd entsprechen die Sedimente der Bohrung 1075A einer Probenauswahl sowohl über als auch unter der Teufe der vollständigen Sulfatreduktion ($SO_4^{2-} = 0$ mM ab einer Teufe von 31 mbsf). Die Proben aus der Bohrung 1079A liegen dagegen alle in dem Bereich, in dem noch Sulfat im Porenwasser vorhanden ist. In dieser Bohrung im Angola-Becken war erst in einer Tiefe von 50 mbsf das gelöste Sulfat vollständig aufgebraucht (Wefer

et al., 1998). Ursache für das Vorhandensein von Sulfat in diesen relativ großen Tiefen könnte die hohe Sedimentationsrate sein, so daß das Gleichgewicht zwischen der Zufuhr von neuem Sulfat und dessen Verbrauch beim Abbau von organischem Material zugunsten der Einlagerung verschoben gewesen sein könnte (Wefer et al., 1998). Hohe Sedimentationsraten führen aufgrund der raschen Überdeckung des abgelagerten Materials schnell zu anoxischen Bedingungen im Sediment und damit zu einer guten Erhaltung des organischen Materials. Gleichzeitig werden allerdings durch die Zufuhr großer Mengen klastischen Materials die Gehalte an organischem Material verringert.

Ein Vergleich der pauschalen Parameter (TOC und TS) in den Sedimenten des Kongo- und des Angola-Beckens und deren Diskussion in Bezug auf unterschiedliche Ablagerungsbedingungen erweist sich aufgrund der stark unterschiedlichen Wassertiefen und Sedimentationsraten als äußerst schwierig. Die deutlich höheren Stanol/Stenol-Verhältnisse in den Sedimenten des Angola-Beckens (ODP-Bohrung 1079A) und das Vorkommen benthischer Foraminiferen, die geringe Sauerstoffkonzentrationen bevorzugen, weisen dagegen auf deutlich bessere Erhaltungsbedingungen als vor der Kongo-Mündung (ODP-Bohrung 1075A) hin.

9.3 Langkettige *n*-Alkane als Indikatoren für Vegetationsänderungen

Die Kohlenstoffzahl-Verteilungen von *n*-Alkanen in den Blattwachsen höherer Landpflanzen hängen von klimatischen Einflüssen auf die Vegetation ab. Demnach können in einem küstennahen Sedimentationsraum Änderungen der *n*-Alkanverteilung Auskünfte über klimabedingte Variationen der Vegetation auf dem benachbarten Kontinent geben. Die durchschnittliche Kettenlänge der langkettigen *n*-Alkane (ACL-Wert) gilt als Indikator für derartige Änderungen.

In einer Vielzahl von Studien wurden höhere ACL-Werte bei höheren Temperaturen bestimmt (Gagosian et al., 1987; Poynter et al., 1989; Rinna et al., 2000; Simoneit et al., 1977). Neben der Temperatur scheint auch die Niederschlagsmenge die durchschnittliche Kettenlänge der *n*-Alkane über die Art der Vegetation maßgeblich zu beeinflussen. In den Sedimenten des Santa-Barbara-Beckens wurden höhere ACL-Werte mit einem wärmeren und humideren Klima im kalifornischen Hinterland in Verbindung gebracht (Hinrichs, 1997). Die ACL-Werte der in dieser Arbeit untersuchten Sedimente vom südwestafrikanischen Kontinentalrand zeigen dagegen überwiegend eine umgekehrte Abhängigkeit von den zugeordneten Glazial- oder Interglazialstadien. Besonders ausgeprägt ist dieser Befund in den Sedimenten vor den Küsten Angolas und Namibias, in denen in den Glazialen die höchsten ACL-Indizes ($ACL_{27-33} > 30,6$) bestimmt wurden. Aufgrund der vorherrschenden Windsysteme ist an diesen Lokationen (ODP Bohrung 1079A und GeoB 1710-3) ein terrestrischer Eintrag von savannen- bis wüstenartiger Vegetation zu erwarten. Die dort weit verbreiteten Gräser könnten eine Quelle für *n*-Alkane mit höheren Kettenlängen sein. Die Hypothese des verstärkten Eintrags von längerkettigen *n*-Alkanen durch C_4 -Pflanzen wird durch die Bestimmung der molekularen Isotopenwerte unterstützt. Die Verschiebung zu schwereren $\delta^{13}C$ -Werten mit zunehmender Kettenlänge, weist auf einen höheren Anteil an C_4 -Biomasse bei den längerkettigen *n*-Alkanen hin.

Unter folgenden Voraussetzungen sollte es möglich sein, mit Hilfe der langkettigen *n*-Alkane ($\delta^{13}C$ und/oder ACL) den Anteil von C_4 -Pflanzen am sedimentierten organischen Material abzuschätzen.

1. Die gefundenen *n*-Alkane sind ausschließlich terrestrischer Herkunft.

In der Tat sind bisher nur wenige Fälle dokumentiert, in denen langkettige *n*-Alkane marinen Quellen zugeschrieben wurden (siehe Zegouagh et al., 1998). Meist handelte es sich dabei um sehr kalte Ablagerungsgebiete oder quantitativ eher unbedeutende Bestandteile in den untersuchten Organismen. Für den in dieser Arbeit untersuchten

küstennahen, tropischen Sedimentationsraum ist eine marine Herkunft der langkettigen *n*-Alkane wahrscheinlich vernachlässigbar.

Eine dritte mögliche Eintragsquelle langkettiger *n*-Alkane sind fossile Kohlenwasserstoffe. Diese würden sich allerdings von rezentem terrestrischem Pflanzenmaterial durch eine geringe Kohlenstoffzahlbevorzugung (CPI-Werte nahe 1) abheben. Die in den Kohlenwasserstofffraktionen der Sedimente der ODP-Bohrungen 1075A und 1079A bestimmten CPI-Werte sind deutlich größer als 3. Ein entscheidender Beitrag fossiler Kohlenwasserstoffe auf die *n*-Alkan-Verteilungen ist damit eher unwahrscheinlich. (Dies ist nicht der Fall für einen Großteil der untersuchten Sedimente des Nord-Süd-Transektiv; siehe Kapitel 8.4)

2. Faktoren wie z. B. die Temperatur, die Niederschlagsmenge oder der CO₂-Partialdruck der Atmosphäre beeinflussen die *n*-Alkane in den Blattwachsen von C₃- und C₄-Pflanzen gleichermaßen.

Bisher sind keine Studien bekannt, in denen die *n*-Alkane in Pflanzen mit verschiedenen Photosyntheseyklen auf die Rolle dieser Faktoren hin untersucht wurden. Allerdings fanden Haxeltine und Prentice (1996), daß bei ausreichender Wasserversorgung die Photosyntheseraten von C₄-Pflanzen bis zu einer Temperatur von 20°C niedriger sind als die von C₃-Pflanzen. Steht nicht genügend Wasser zur Verfügung, wird diese Grenztemperatur herabgesetzt. Der gleiche Effekt wurde bei einer CO₂-Limitierung festgestellt. Aride Klimabedingungen mit geringerem CO₂-Partialdruck der Atmosphäre – wie sie für die Glazialstadien angenommen werden (z.B. deMenocal, 1993; Jasper und Hayes, 1990; Müller et al., 1994) – bevorteilen die Ausbreitung von C₄-Pflanzen.

9.3.1 Abschätzung des Anteils an C₄-Pflanzen anhand der Kohlenstoffisotopenverhältnisse

Bereits Bird et al. (1995) benutzten die Kohlenstoffisotopenverhältnisse von *n*-Alkanen in Sedimenten, um den Eintrag von C₄-Pflanzen am gesamten terrestrischen Material abzuschätzen. Die Endglieder dieses binären Mischungsmodells aus C₃- und C₄-Pflanzen bilden die Daten von Collister et al. (1994) und Rieley et al. (1993). Die gewichteten Mittelwerte (*n*-C₂₉H₆₀; *n*-C₃₁H₆₄; *n*-C₃₃H₆₈) betragen –37‰ bzw. –21‰. Die sich daraus ergebenden Anteile von C₄-Pflanzen sind in der folgenden Abbildung graphisch dargestellt.

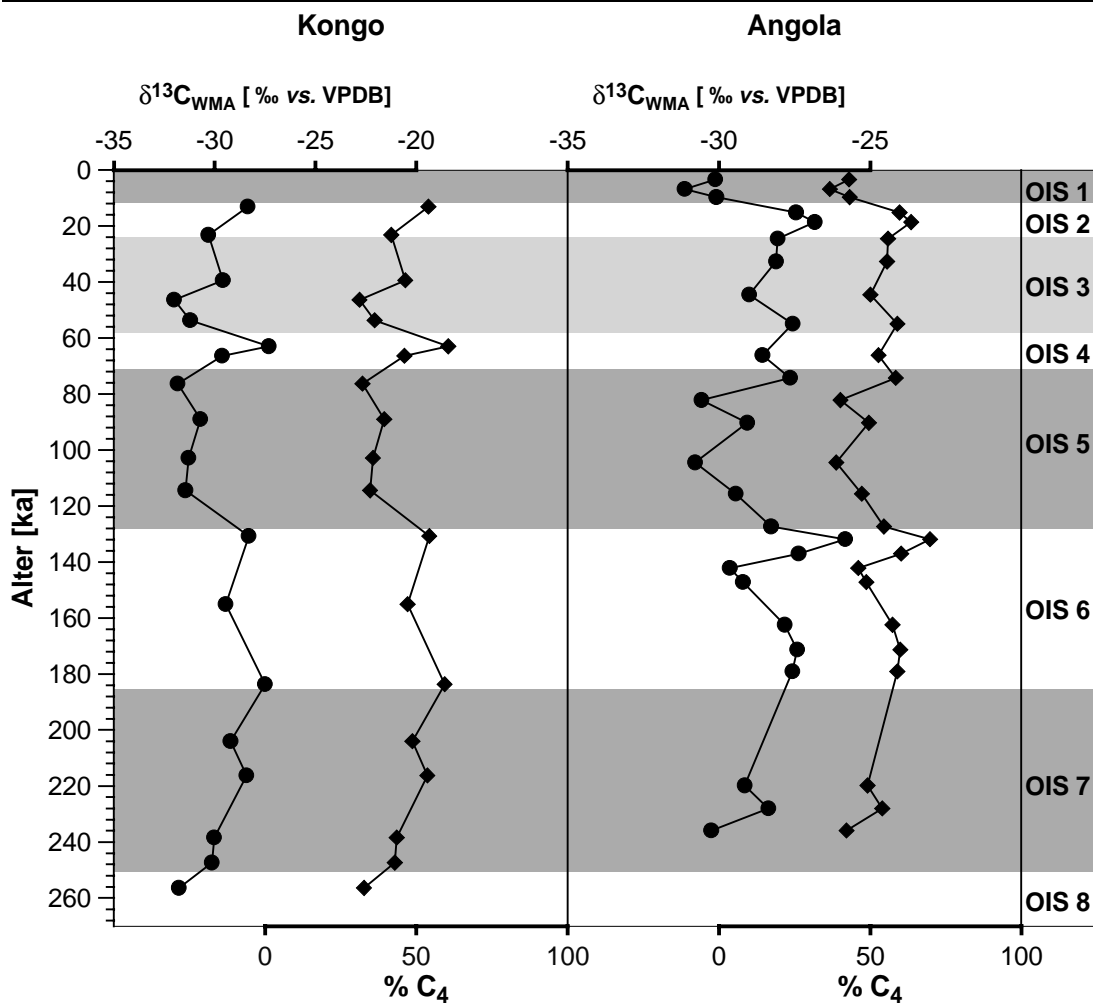


Abbildung 57 Umrechnung der gewichteten $\delta^{13}\text{C}$ -Werte aus $n\text{-C}_{29}\text{H}_{60}$, $n\text{-C}_{31}\text{H}_{64}$ und $n\text{-C}_{33}\text{H}_{68}$ (●) in prozentuale Anteile von C_4 -Pflanzen am gesamten terrestrischen Material (◆) für die spätquartären Sedimentproben aus dem Kongo- und dem Angola-Becken (ODP-Bohrungen 1075A und 1079A)

Der Anteil von C_4 -Pflanzen am gesamten terrestrischen Material ist mit durchschnittlich 54% in den Sedimenten des Angola-Beckens höher als in denen aus dem Bereich des Kongo-Fächers. Während der vergangenen 260 ka war der Eintrag von C_4 -Pflanzen in den glazialen Stadien verstärkt.

Tabelle 10 Abschätzung des C_4 -Pflanzen-Anteils anhand der gewichteten $\delta^{13}\text{C}$ -Werte aus $n\text{-C}_{29}\text{H}_{60}$, $n\text{-C}_{31}\text{H}_{64}$ und $n\text{-C}_{33}\text{H}_{68}$

	Kongo-Becken	Anzahl	Angola-Becken	Anzahl
Gesamtdurchschnitt	44%	19	54%	26
Glaziale (OIS 6, 4, 2)	52%	7	58%	10
Interglaziale (OIS 7, 5, 1)	41%	8	46%	12

Die berechneten C_4 -Pflanzen-Anteile sind insgesamt erstaunlich hoch. Bisher wurden für Sedimente aus dem östlichen äquatorialen Atlantik maximal 37% C_4 -Pflanzen

angegeben (Wagner, 1998). Unter Verwendung eines einzelnen n -Alkans (n -C₃₃H₆₈) vergrößern sich die abgeschätzten Einträge der C₄-Pflanzen nochmals auf bis zu 80%.

Tabelle 11 Abschätzung des C₄-Pflanzen-Anteils anhand der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte von n -C₃₃H₆₈

	Kongo-Becken	Anzahl	Angola-Becken	Anzahl
Gesamtdurchschnitt	69%	20	70%	25
Glaziale (OIS 6, 4, 2)	80%	7	78%	9
Interglaziale (OIS 7, 5, 1)	67%	9	63%	12

Diese äußerst hohen Werte entsprechen vermutlich nicht dem tatsächlichen Eintrag von C₄-Pflanzen. Wahrscheinlich müßten für eine realistische Abschätzung zusätzliche Faktoren im Hinblick auf eine Korrektur der Endgliedwerte oder auf besondere Gewichtung der einen oder anderen Pflanzengruppe ermittelt werden. Ein Ansatz könnte demnach sein, repräsentative Vertreter der beiden Photosynthesezyklen aus dem Eintragsgebiet auf die molekularen Kohlenstoffisotopenverhältnisse der n -Alkane zu untersuchen.

9.3.2 Abschätzung des Anteils an C₄-Pflanzen anhand der ACL-Werte

Aufgrund der Vielfalt der n -Alkanverteilungen in den bisher untersuchten Pflanzen fällt es schwer, repräsentative durchschnittliche ACL-Werte von C₃- und C₄-Pflanzen zu bestimmen. Daher sollen Ergebnisse regionaler Untersuchungen helfen, die Endglieder der C₃-/C₄-Pflanzen-Mischungsbeziehung in Bezug auf die ACL₂₇₋₃₃-Werte abzuschätzen.

Pollenanalysen in Sedimenten erlauben eine ungefähre Beschreibung der Vegetation auf dem Kontinent. Nach Caratini und Giresse (1979) verringerte sich der Anteil an C₄-Pflanzen von 25% während des letzten Glazials auf etwa 3% in holozänen Sedimenten aus dem Tiefseefächer des Kongo. Diese Befunde sind Grundlage des folgenden Berechnungsmodells, in dem diese Daten mit den ermittelten ACL₂₇₋₃₃-Werten in Verbindung gebracht wurden. Kein Eintrag von C₄-Pflanzen sollte etwas weniger als dem kleinsten gefundenen ACL₂₇₋₃₃-Wert (29,95) entsprechen. Der Eintrag von C₄-Pflanzen während des letzten Glazials war im südlichen Angola-Becken (ODP Bohrung 1079A) wahrscheinlich stärker als im Kongo-Becken (ODP Bohrung 1075A), so daß ein Anteil an C₄-Pflanzen von etwa 30% mit den höchsten glazialen ACL₂₇₋₃₃-Werten (30,69) korrelieren könnte.

Mit den Eckpunkten [0;29,9] und [30;30,7] ergibt sich folgende Geradengleichung für die Umwandlung von ACL₂₇₋₃₃-Werten in Anteile an C₄-Pflanzen:

$$\%C_4 = 37,5 \cdot (\text{ACL}_{27-33} - 29,9) \quad (9.2)$$

Anhand dieser Formel wurden die Einträge von C_4 -Pflanzen in die spätquartären Sedimente der ODP-Bohrungen 1075A und 1079A ermittelt (Abbildung 58).

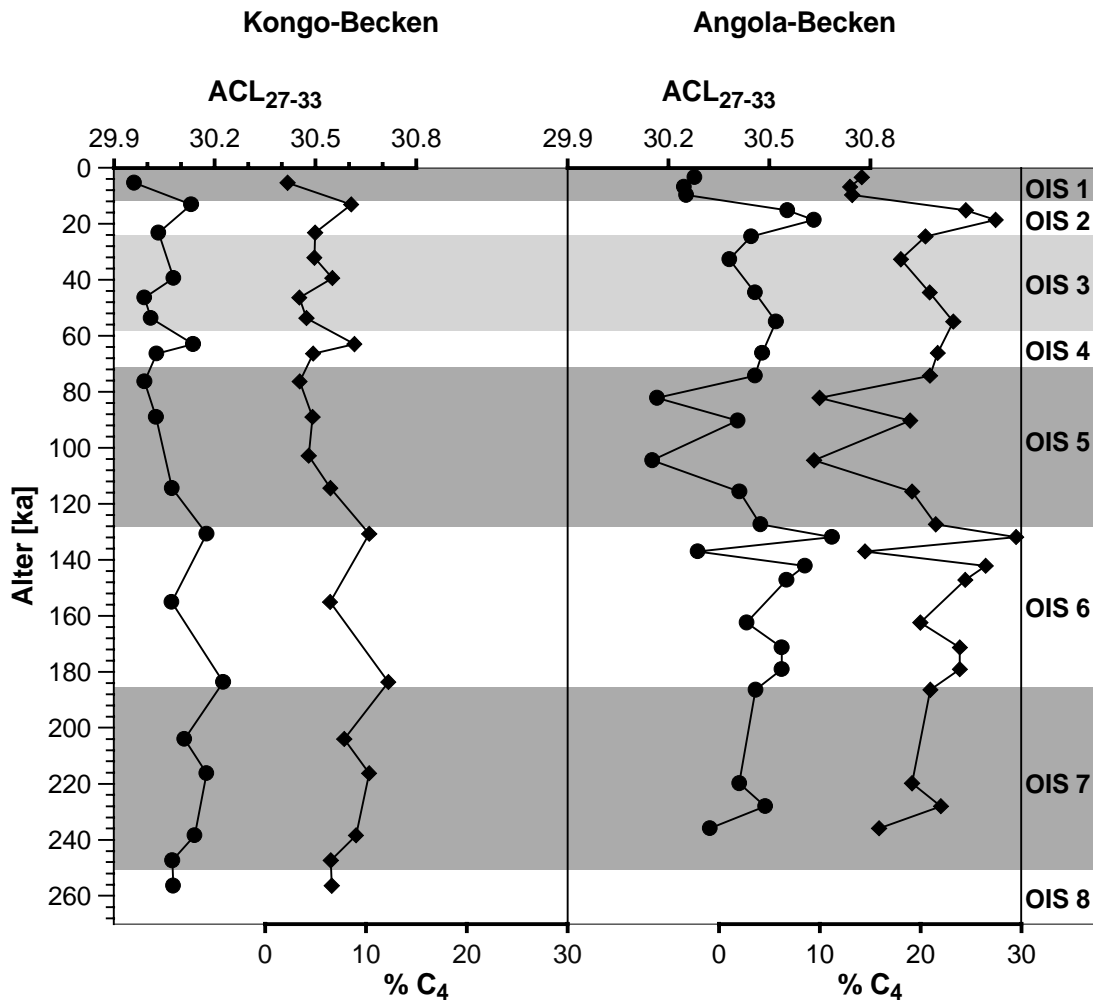


Abbildung 58 Transformation der ACL_{27-33} -Werte (●) in Anteile an C_4 -Pflanzen innerhalb der terrigenen Einträge (◆)

Die Gehalte schwanken zwischen 2% und 15% in den Sedimenten des Kongo-Beckens, während etwas weiter südlich im Angola-Becken Einträge von 10% bis 30% berechnet wurden. Dort ist außerdem die Zunahme des C_4 -Pflanzen-Anteils während der Glaziale etwas stärker ausgeprägt (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12 Durchschnittswerte des prozentualen C_4 -Pflanzen-Anteils der vergangenen 260 ka, als Gesamtwert sowie getrennt nach warmen und kalten Zeitabschnitten

	Kongo-Becken	Anzahl	Angola-Becken	Anzahl
Gesamtdurchschnitt	6,5%	21	20%	27
Glaziale (OIS 6, 4, 2)	8,0%	7	24%	10
Interglaziale (OIS 7, 5, 1)	6,1%	9	17%	13

Diese Abschätzung entspricht den Erwartungen nach dem heutigen Kenntnisstand über die Vegetation auf dem afrikanischen Kontinent heute und während des letzten Glazials. Die regionale Betrachtung der Vegetationsverhältnisse als Grundlage für dieses Modell ist von großem Vorteil.

Eine Vorstellung von der Art der (C_4 -)Pflanzen, die für die Schwankungen der durchschnittlichen Kettenlänge der n -Alkane in den untersuchten Sedimenten verantwortlich sind, gibt der Vergleich der ACL_{27-33} -Werte mit den Pollendaten von Dupont (1999).

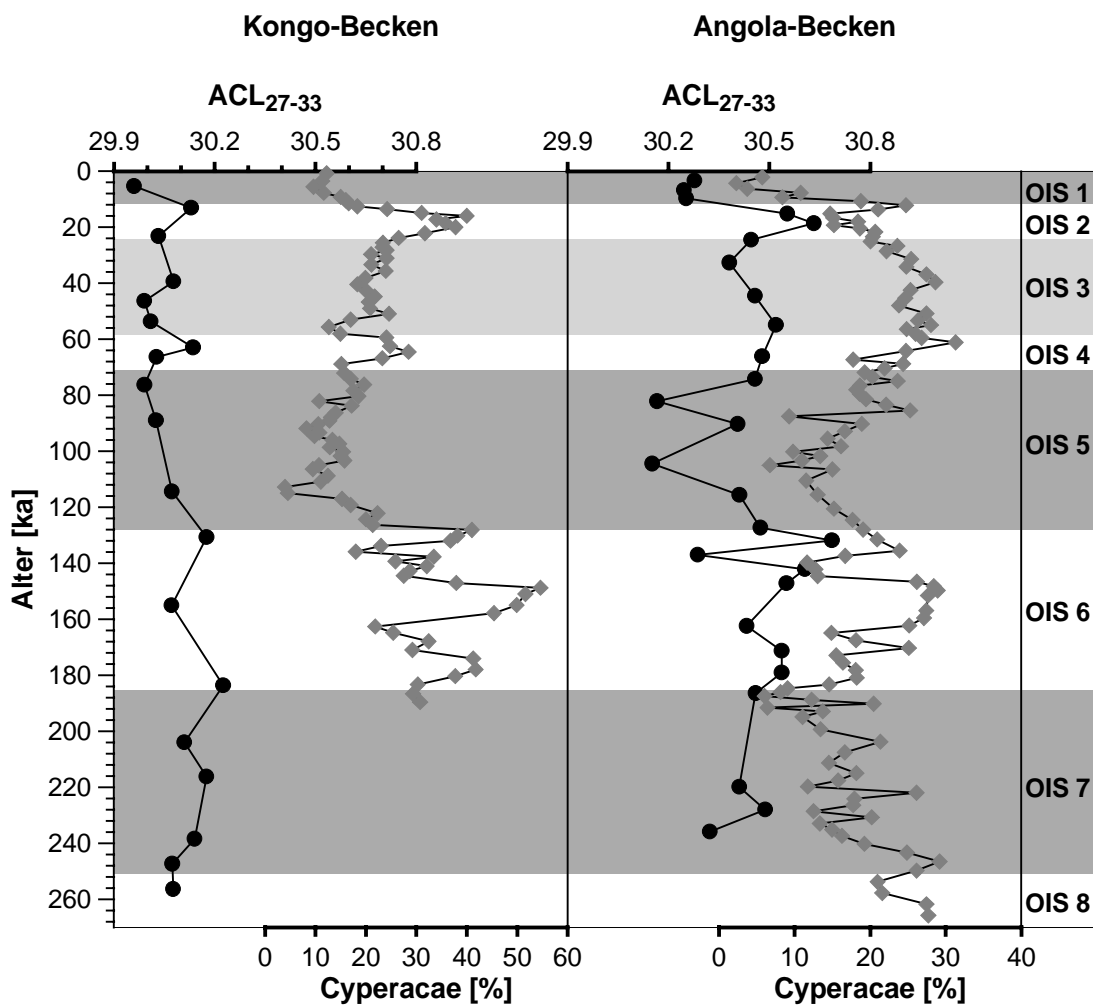


Abbildung 59 (◆) Pollendaten (Dupont et al. 1999) im Vergleich mit den ACL_{27-33} -Indices (●)

Die berechneten ACL_{27-33} -Indices spiegeln hervorragend den Eintrag von Cyperaceae wider, deren Anteil an der Gesamtpollenverteilung in den Glazialen (OIS 6 und 2) bis zu 60% beträgt. Zwei der im tropischen Afrika vorkommenden Arten aus der Ordnung der Cyperaceae (*Cyperus immensus* und *Cyperus laevigatus*) weisen außerordentlich schwere $\delta^{13}C_{org}$ -Werte auf (-11,2‰ und -12,2‰; Muzuka (1999)). Ein verstärkter Eintrag von Cyperaceae könnte durchaus Einfluß auf die Isotopensignatur des

gesamten organischen Kohlenstoffs in den untersuchten spätquartären Sedimenten des Kongo- und des Angola-Beckens haben.

In älteren Sedimenten scheint die durchschnittliche Kettenlänge der *n*-Alkane weniger auf Änderungen der Vegetation zu reagieren. Die Korrelation der ACL-Werte mit den beobachteten Oberflächenwassertemperaturen im Kongo-Becken während der letzten 2 Ma deutet auf klimaabhängige Variationen dieses Parameters hin. Eine Temperaturabhängigkeit der durchschnittlichen Kettenlänge der *n*-Alkane wurde auch in den Sedimenten des Angola-Beckens (ODP-Bohrung 1079A) im Zeitraum von 500 bis 300 ka (etwa OIS 10-13) beobachtet. Dort traten höhere ACL₂₇₋₃₃-Werte im warmen Sauerstoffisotopenstadium 11 auf.

9.3.3 Abschätzung der marinen und terrestrischen Anteile unter Berücksichtigung des Eintrags von C₄-Pflanzen

Oftmals wurden mit Hilfe der $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ -Werte unter Annahme eines Zwei-Komponenten-Mischungsmodells die prozentualen Anteile des marinen und terrestrischen Materials berechnet. In den bisherigen Untersuchungen (z.B. Mariotti et al., 1991; Müller et al., 1994; Schneider, 1991) wurde der Anteil der C₄-Pflanzen am organischen Material als derart gering eingeschätzt, daß dessen Einfluß auf das Kohlenstoffisotopenverhältnis des gesamten organischen Materials als vernachlässigbar angesehen wurde. Mit Endgliedern von -27‰ und -19‰ für das terrestrische bzw. marine organische Material (Mariotti et al., 1991; Schneider, 1991; Westerhausen et al., 1993) lassen sich nach Gleichung 4.1 die prozentualen Anteile dieser beiden Komponenten berechnen (Tabelle 13).

Tabelle 13 Bestimmung der prozentualen Anteile des marinen und terrestrischen organischen Materials in den Sedimenten des Angola-Beckens (ODP-Bohrung 1079A) anhand des konventionellen binären Mischungsmodells (Gleichung 4.1)

	% Marin	% Terrestrisch
Gesamtdurchschnitt	83	17
Glaziale (OIS 6, 4, 2)	90	10
Interglaziale (OIS 7, 4, 1)	78	22

Neuere Untersuchungen (z.B. Huang et al., 2000; Wagner, 1998; Muzuka, 1999) und die Ergebnisse dieser Arbeit führen allerdings zu der Schlußfolgerung, daß der Eintrag von C₄-Pflanzen in Tiefseesedimente der niederen Breiten um Afrika eine bedeutende Rolle spielt. Eine Beeinflussung der Isotopensignatur des gesamten organischen Materials ist daher anzunehmen.

In den Sedimenten der Bohrungen 1075A (Kongo-Becken) und 1079A (Angola-Becken) schwanken die Kohlenstoffisotopenverhältnisse innerhalb der letzten 260 ka zwischen -22‰ und -19‰. Die TOC-Gehalte der Sedimente beider Bohrungen sind mit 1 bis 5% einander ebenfalls ähnlich. Während jedoch vor der Kongo-Mündung mit zunehmendem TOC-Gehalt schwerere $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ -Werte gefunden wurden, ist für die Bohrung 1079A etwas weiter südlich im Angola-Becken eher das Gegenteil der Fall (Abbildung 60).

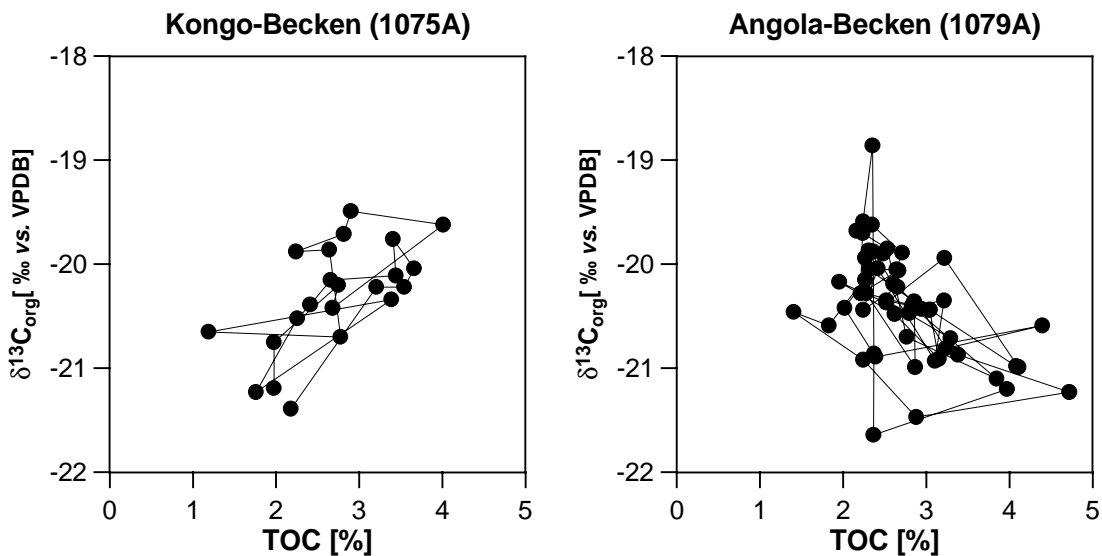


Abbildung 60 TOC-Gehalte in Relation zu den $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ -Werten der Sedimentproben aus dem Kongo- und dem Angola-Becken (ODP Bohrungen 1075A und 1079A) innerhalb der letzten 260 ka

Hohe TOC-Gehalte im Kongo-Becken können demnach auf eine verstärkte marine Produktivität zurückzuführen sein. Schwere $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ -Werte als Ausdruck eines reduzierten terrestrischen Anteils interpretieren auch Müller et al. (1994), die gleichzeitig eine Abnahme der C/N-Verhältnisse von 13 auf 6 in den Oberflächensedimenten aus dem Bereich des Kongo-Fächers beobachteten. Im Angola-Becken (GeoB 1016-3) treten in den Sedimenten der vergangenen 200 ka die schwersten $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ -Werte (-18,5‰) zusammen mit hohen C/N-Verhältnissen auf.

Die im Rahmen dieser Arbeit bestimmte durchschnittliche Kettenlänge der *n*-Alkane (ACL_{27-33}) ist mit einem Mittelwert von 30,4 in den Sedimentextrakten der Bohrung 1079A höher als in denen der Bohrung 1075A ($\text{ACL}_{27-33}=30,0$) und lässt damit einen verstärkten Einfluß von C_4 -Vegetation im Angola-Becken vermuten. Die Korrelation der molekularen und pauschalen Kohlenstoffisotopenwerte (besonders ausgeprägt in den OIS 1 bis 3) verdeutlicht, daß der signifikante Eintrag von C_4 -Pflanzen-Material in die Sedimente im Angola-Becken die Isotopensignatur des gesamten organischen Materials beeinflusst.

Unter Berücksichtigung der Anteile an C₄-Pflanzen, die anhand der ACL₂₇₋₃₃-Werte abgeschätzt wurden (siehe Kapitel 9.3.2), können die Einträge marinen und terrestrischen organischen Materials neu berechnet werden (Gleichungen 4.3 und 4.1). Die folgende Tabelle stellt die ermittelten Werte der bisherigen Annahmen (repräsentiert durch Schneider (1991)) den Überlegungen aus dieser Arbeit gegenüber.

Tabelle 14 Bestimmung der prozentualen Anteile des terrestrischen und marinen organischen Materials in den Sedimenten des Angola-Beckens (ODP-Bohrung 1079A; < 260 ka) nach Schneider (1991) und Mariotti et al. (1991, links) sowie in dieser Arbeit (rechts)

(a) ohne Berücksichtigung des Eintrags von C₄-Pflanzen

	Terrestrisch	Marin	C ₃	Marin
δ ¹³ C-Wert	-27‰ ¹	-19‰ ¹	-29‰ ²	-18‰ ³
Durchschnitt	17%	83%	22%	78%
Glaziale	10%	90%	17%	83%
Interglaziale	22%	78%	25%	75%

(b) unter Berücksichtigung des Eintrags von C₄-Pflanzen

	C ₃	C ₄	Marin	C ₃	C ₄	Marin
δ ¹³ C-Wert	-27‰ ¹	-12‰ ⁴	-19‰ ¹	-29‰ ²	-13‰ ²	-18‰ ³
Durchschnitt	21%	5%	74%	23%	6%	71%
Glaziale	14%	5%	81%	18%	6%	76%
Interglaziale	26%	5%	69%	27%	5%	67%

1) nach Schneider (1991)

2) aus Muzuka (1999)

3) aus Westerhausen et al. (1993)

4) nach Mariotti et al. (1991)

Die in dieser Arbeit bestimmten δ¹³C_{org}-Werte führen nach den Annahmen von Schneider (1991) und Mariotti et al. (1991) zu einem Anteil an marinem organischen Material von durchschnittlich 83%. Unter Berücksichtigung des Eintrags von C₄-Pflanzen erhöht sich der Anteil des terrestrischen Materials um 35% (von 17% auf 23%). Die stärkste Verschiebung aufgrund der C₄-Korrektur ist für die glazialen Mittelwerte erkennbar, in denen der Anteil der C₄-Pflanzen innerhalb der terrestrischen Fraktion bis zu 30% beträgt (Abbildung 61). Der marine Eintrag würde mit 90% nach dem binären Mischungsmodell gegenüber 76% unter Berücksichtigung der C₄-Pflanzen deutlich überschätzt.

Angola-Becken (ODP-Bohrung 1079A)

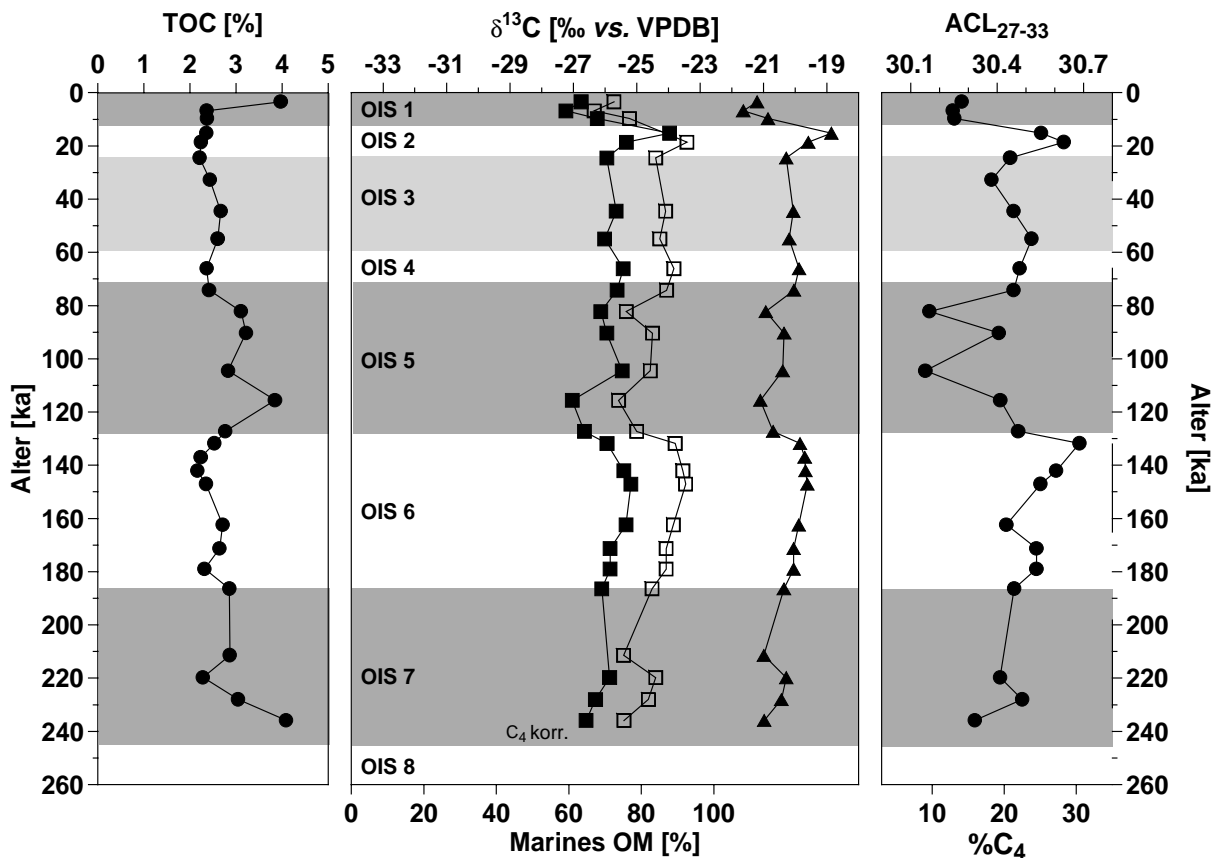


Abbildung 61 Variation der anhand der $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ -Werte (▲) ermittelten prozentualen Anteile des marinen organischen Materials (□=ohne und ■=mit C_4 -Korrektur) in den Sedimenten der ODP-Bohrung 1079A (< 260 ka) in Abhängigkeit vom Sedimentalter im Vergleich mit den TOC-Gehalten und den ACL_{27-33} -Werten, anhand derer der Eintrag der C_4 -Pflanzen abgeschätzt wurde

Die von Schneider (1991) und Mariotti et al. (1991) verwendeten $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ -Werte des terrestrischen Materials von -27‰ bzw. -26‰ wurden von diesen als überwiegend von C_3 -Pflanzen stammend interpretiert. Sowohl die Studien von Collister et al. (1994) als auch die Untersuchungen von Muzuka (1999) ergaben deutlich leichtere Werte für Pflanzen, die nach dem C_3 -Zyklus synthetisieren. Mit den Endwerten von Muzuka (1999) für ausgewählte C_3 - und C_4 -Pflanzen aus dem äquatorialen Afrika ergibt sich für die von Schneider (1991) und Mariotti et al. (1991) verwendeten $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ -Werte des terrestrischen Materials ein konstanter Anteil an C_4 -Pflanzen von 13% bzw. 23%. Die Differenz der Abschätzungen des marinen organischen Materials ohne und mit Berücksichtigung der C_4 -Pflanzen erhöht sich noch einmal drastisch, wenn die Modellberechnungen wirklich von keinem Eintrag von C_4 -Pflanzen ausgehen. Durch die Untersuchung des partikulären Materials an der Mündung des Kongo ist Mariotti et al. (1991) eine recht gute Abschätzung des terrestrischen $\delta^{13}\text{C}$ -Endwertes – allerdings inklusive des Eintrags von C_4 -Pflanzen-Material – gelungen.

In Sedimentationsräumen, in denen der Eintrag von C₄-Pflanzen gering ist, fällt auch die Differenz zwischen korrigiertem und nichtkorrigiertem Anteil des marinen organischen Materials klein aus. Dies ist z.B. bei den spätquartären Sedimenten aus dem Kongo-Becken der Fall, in denen ein Eintrag an C₄-Pflanzen von maximal 15% der terrigenen Fraktion ermittelt wurde (Abbildung 62).

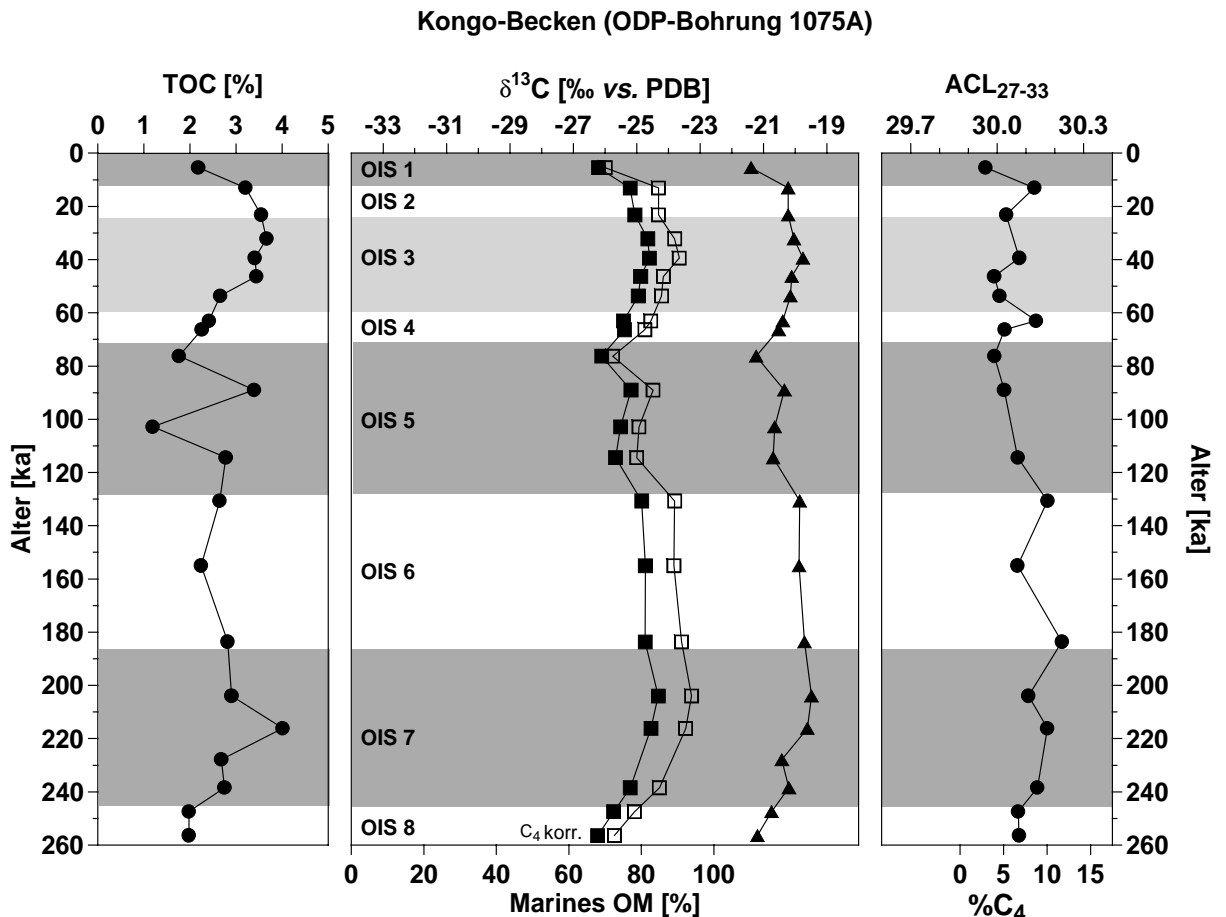


Abbildung 62 Variation der anhand der $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ -Werte (\blacktriangle) ermittelten prozentualen Anteile des marinen organischen Materials (\square =ohne und \blacksquare =mit C₄-Korrektur) in den Sedimenten der ODP-Bohrung 1075A (< 260 ka) in Abhängigkeit vom Sedimentalter im Vergleich mit den TOC-Gehalten und den ACL₂₇₋₃₃-Werten, anhand derer der Eintrag der C₄-Pflanzen abgeschätzt wurde

Die korrigierten Anteile des marinen organischen Materials korrelieren auch nach der C₄-Korrektur noch mit den $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ -Werten der untersuchten Sedimente an beiden Lokationen. Dieser Befund stimmt mit der generellen Beobachtung überein, daß während der Kaltzeiten gleichzeitig mit der Ausbreitung der C₄-Pflanzen auf dem Kontinent eine verstärkte marine Produktivität im Oberflächenwasser auftrat.

Tabelle 15 Bestimmung der prozentualen Anteile des terrestrischen und marinen organischen Materials in den Sedimenten des Kongo-Beckens (ODP-Bohrung 1075A; < 260 ka) nach Schneider (1991) und Mariotti et al. (1991, links) sowie in dieser Arbeit (rechts) **siehe nächste Seite**

Tabelle 15 (a) ohne Berücksichtigung des Eintrags von C₄-Pflanzen

	Terrestrisch	Marin	C ₃	Marin
δ ¹³ C-Wert	-27‰ ¹	-19‰ ¹	-29‰ ²	-18‰ ³
Durchschnitt	16%	84%	21%	79%
Glaziale	14%	86%	19%	81%
Interglaziale	19%	81%	23%	77%

Tabelle 15 (b) unter Berücksichtigung des Eintrags von C₄-Pflanzen

	C ₃	C ₄	Marin	C ₃	C ₄	Marin
δ ¹³ C-Wert	-27‰ ¹	-12‰ ⁴	-19‰ ¹	-29‰ ²	-13‰ ²	-18‰ ³
Durchschnitt	17%	1%	82%	22%	1%	77%
Glaziale	15%	1%	84%	20%	2%	78%
Interglaziale	20%	1%	79%	23%	1%	75%

1) nach Schneider (1991)

2) aus Muzuka (1999)

3) aus Westerhausen et al. (1993)

4) nach Mariotti et al. (1991)

Mit durchschnittlich 71% liegt der Anteil des marinen organischen Materials in den Sedimenten des Angola-Beckens sogar geringfügig unter dem im Kongo-Fächer (Tabelle 15). Die Küstennähe und die geringe Wassertiefe der ODP-Bohrung 1079A vergrößern vermutlich den Eintrag von terrigenem Material. Diese Lokation ist daher nur bedingt als Indikator der pelagischen Hintergrundsedimentation im Kontrast zum Kongo-Fächer geeignet.

Die analoge Übertragung der in Kapitel 9.3.1 erhaltenen prozentualen Anteile von C₃- und C₄-Pflanzen anhand der Kohlenstoffisotopenverhältnisse der langkettigen *n*-Alkane (statt der ACL₂₇₋₃₃-Werte) führte zu keinem brauchbaren Ergebnis. Die aus der jeweiligen konservativen Mischung der beiden Komponenten berechneten variablen δ¹³C-Endwerte des terrestrischen organischen Materials sind zum Teil schwerer als die gemessenen δ¹³C_{org}-Werte, so daß die Lösung des binären Mischungsmodells zu negativen marinen Anteilen führt. Dieses mathematische Ergebnis ist natürlich unsinnig, und selbst bei theoretisch möglichen Anteilen zwischen 0% und 100% ist die Richtigkeit schwer zu beurteilen. Um die Kohlenstoffisotopenverhältnisse der langkettigen *n*-Alkane für die Abschätzung des Eintrags von C₄-Pflanzen zu nutzen, bedarf es demnach noch weiterer Untersuchungen der Faktoren, die die molekularen ¹³C-Werte beeinflussen. Außerdem könnten Analysen der dominierenden Pflanzen im Untersuchungsgebiet helfen, die Endglieder und deren Mischungsverhältnisse präziser zu bestimmen.