



Was zeigen uns Satelliten-Beobachtungen von Methan?

Aufgaben und Musterlösungen

Aufgabe 1: Nenne die physikalische Einheit, in der die atmosphärische Methan-Konzentration üblicherweise angegeben wird und erlautere deren Bedeutung.

Lösung: ppb (parts per billion). Bedeutung: Anzahl der Methan-Moleküle pro eine Milliarde Luftmoleküle (pro Milliarde und nicht pro Billionen!).

Anforderungsbereich: I

Lernziel: Vergewärtigung der physikalischen Einheit, in der die atmosphärische Methan-Konzentration üblicherweise gemessen wird, und deren Bedeutung.

Aufgabe 2: Berechne das atmosphärische Methan-Mischungsverhältnis unter der Annahme, dass die Atmosphäre 200 Mal weniger Methan-Moleküle enthält als CO_2 -Moleküle und das CO_2 -Mischungsverhältnis 400 ppm beträgt. Vergleiche das erhaltene Methan-Mischungsverhältnis mit den Satellitenmessungen und analysiere, ob das angegebene Verhältnis der Anzahl der Moleküle der beiden Treibhausgase in etwa der derzeitigen Situation entspricht.

Lösung: 2 ppm (parts per million) oder 2000 ppb (parts per billion). Ja, das Verhältnis von 200:1 ist realistisch.

Anforderungsbereich: II

Lernziel: Vertiefung des Verständnisses von Konzentrationsangaben als Mischungsverhältnis.

Aufgabe 3: Die Menge des Methans in der Atmosphäre wird durch Quellen (Emissionen) und Senken (insbesondere chemischer Abbau) bestimmt. Wir nehmen hier in guter Näherung an, dass der Methan-Abbau proportional der vorhandenen Methan-Menge ist, also z.B. 10% pro Jahr. Die Emissionen können sich jedoch fast beliebig ändern, folgen also keiner einfachen Gesetzmäßigkeit. Die Satellitendaten zeigen den Zeitverlauf der atmosphärischen Methankonzentration. Beurteile und begründe:

- (a) Was bedeutet es, wenn sich die atmosphärische Konzentration im Laufe der Zeit nicht ändert?
- (b) Was bedeutet es, wenn die atmosphärische Konzentration im Laufe der Zeit ansteigt?
- (c) Wenn die atmosphärische Konzentration ansteigt, steigen dann auch die Emissionen an?
- (d) Welcher Zeitverlauf deutet auf steigende Emissionen hin?

Lösung:

- (a) Dann kompensieren sich Quellen und Senken, sie sind also zahlenmäßig gleich groß. Es wird also (im betrachteten Zeitraum) genauso viel Methane in die Atmosphäre durch Methan-Emissionen eingetragen, wie durch Methan-Senken abgebaut wird.
- (b) Dann überwiegen die Methan-Quellen im Vergleich zu den Methan-Senken.



Was zeigen uns Satelliten-Beobachtungen von Methan?

- (c) Nicht unbedingt. Auch konstante Emissionen können zu einem Anstieg führen und sogar fallende Emissionen, je nach Stärke der Senken.
- (d) Wenn die Steigung der Konzentration zunimmt, dann ist dies ein Hinweis auf ansteigende Emissionen. Ob dies wirklich der Fall ist, hängt aber auch von den Senken ab.

Anforderungsbereich: III

Lernziel: Verständnis des Zusammenhangs von atmosphärischen Methan-Konzentrationen und den Quellen und Senke des atmosphärischen Methans.

Aufgabe 4: Die Satellitendaten zeigen, dass das mittlere atmosphärische Mischungsverhältnis im Jahr 2009 etwa 1775 ppb betrug und im Jahre 2022 etwa 1890 ppb. Berechne den mittleren jährlichen Anstieg des Methans im Zeitraum 2009 bis 2022 in den Einheiten ppb/Jahr und Prozent pro Jahr (%/Jahr).

Lösung: 8.8 ppb/Jahr (= 115 ppb / 13 Jahre) bzw. 0.5%/Jahr (=115/(1775*13)).

Anforderungsbereich: II

Lernziel: Vertiefung des Verständnisses des beobachteten Methananstiegs einschließlich Berechnung von absoluten und relativen Änderungsraten.

Aufgabe 5: Methan wird in der Atmosphäre durch Reaktionen mit anderen Gasen chemisch abgebaut. Die Abbaurate beträgt in etwa 10% pro Jahr. Die Satellitendaten zeigen, dass es in den Jahren 2003 - 2006 zwar jahreszeitliche Schwankungen der Methankonzentration gab, aber quasi keinen Anstieg von Jahr zu Jahr, das also die atmosphärische Konzentration näherungsweise konstant war. Wenn man dann weiterhin weiß, dass die gesamte Methanmenge in der Atmosphäre etwa 5500 Millionen Tonnen betrug, kann man dann aus diesen Informationen etwas über die Methanemissionen ableiten? Begründe deine Einschätzung und benenne, was man über die möglichen Emissionen sagen kann.

Lösung: Ja, man kann hiermit Aussagen über Methanemissionen machen. Wenn jedes Jahr 10% der 5500 Millionen Tonnen Methan abgebaut werden, also 550 Millionen Tonnen, aber die atmosphärische Konzentration konstant bleibt, dann müssen die Emissionen auch 550 Millionen Tonnen pro Jahr gewesen sein, damit Netto die Methanmenge in der Atmosphäre konstant bleibt.

Anforderungsbereich: III

Lernziel: Vertiefung des Verständnisses von Methan-Änderungsraten.

Aufgabe 6: Unter Normalbedingungen von etwa 1013 hPa Bodendruck auf Höhe des Meeresspiegels ist das Gewicht der Luft etwa 10 Tonnen pro Quadratmeter. Die molare Masse von Luft ist etwa 29 g/Mol und die von Methan 16 g/Mol. Ein Mol sind etwa 6×10^{23} Moleküle (der genauere Wert der Avogadro-Konstanten ist $6,022 \times 10^{23}$ Mol⁻¹).

- (a) Begründe, warum die molare Masse von Luft etwa 29 g/Mol beträgt.

- (b) Was ist das Gewicht von 1 ppb Methan pro Quadratkilometer? Annahme: die gesamte Luftsäule bis zum Oberrand der Atmosphäre ist gut durchmischt und überall ist das Mischungsverhältnis 1 ppb. Beachte bzgl. Methan: ppb bezeichnet hier das molare Mischungsverhältnis von Methan relativ zur molaren Anzahl der Luftmoleküle (und nicht das Verhältnis der Massen).
- (c) Wenn sich auf der gesamten Erde die Methankonzentration um 10 ppb erhöhen würde, welcher Massenzunahme des atmosphärischen Methans entspräche dies dann? (Erdoberfläche: 510 Millionen Quadratkilometer)
- (d) Wenn die Satelliten global eine Methanzunahme von 9 ppb/Jahr messen, welcher Zunahme des Methan-Gewichts in der Atmosphäre in Millionen Tonnen Methan pro Jahr entspräche dies und kann dies zu mindestens näherungsweise als entsprechende Zunahme der jährlichen Methan - Emissionen interpretiert werden, wenn der Methanabbau pro Jahr etwa 10% der vorhandenen Menge entspricht?

Lösung:

(a) Luft besteht näherungsweise zu 21% aus Sauerstoff (O_2) und 79% aus Stickstoff (N_2). Ein Mol O_2 wiegt etwa 32 g und ein Mol N_2 wiegt etwa 28 g (siehe Periodensystem der Elemente). Ein Mol Luftmoleküle wiegt daher etwa 29 g/Mol ($= 0.21 \cdot 32 + 0.79 \cdot 28$).

(b) Etwa $5,5 \text{ kgCH}_4/\text{km}^2/\text{ppb}$. Grund: 10 Tonnen Luft geteilt durch die molare Masse von Luft (29 g/Mol) ergibt die Anzahl der Mole Luft; dies multipliziert mit 10^{-9} ($= 1 \text{ ppb}$) ergibt die Anzahl der Methan-Moleküle entsprechend einem ppb; dies multipliziert mit der molaren Masse von Methan (16 g/Mol) ergibt das entsprechende Gewicht von Methan ($5,5 \times 10^{-9} \text{ tCH}_4/\text{m}^2/\text{ppb}$).

(c) 27540 Millionen kg ($= 5,5 \cdot 10 \cdot 510 \times 10^6$), also etwa 28 Millionen Tonnen Methan pro 10 ppb.

(d) $25 \text{ MtCH}_4/\text{Jahr}$ ($= 28 \cdot 9/10$, siehe (c)). Näherungsweise entspricht dies der Zunahme der Emissionen. Die wahre Zunahme der Emissionen wird aber etwas geringer sein, da es auch Methan-Senken gibt, insbesondere chemischer Abbau in der Atmosphäre (etwa 10% pro Jahr entsprechend 2,5 Mt von 25 Mt; die Lebensdauer von atmosphärischem Methan beträgt etwa 10 Jahre).

Anforderungsbereich: III

Lernziel: Quantitative Vertiefung des Verständnisses von Methan in der Atmosphäre sowie Emissionen und Abbau.

Aufgabe 7: Ein Satellit misst eine lokale Methanerhöhung (relativ zur Umgebung) von 20 ppb in einem rechteckigen Gebiet mit einer Kantenlänge von 40 km in Windrichtung und einer Kantenlänge von 7 km senkrecht zur Windrichtung. Die lokale Methanerhöhung resultiert aus kontinuierlichen Methanemissionen einer Methanquelle, welche sich in der Nähe des rechteckigen Gebiets befindet. Das gesamte emittierte Methan wird mit dem Wind von der Quelle weg transportiert und passiert (ohne Verluste) das rechteckige Gebiet. Man weiß, dass eine Zunahme von 1 ppb pro Quadratkilometer einem Methangewicht von etwa 5,5 kg entspricht. Zusätzlich kennt man die relevante Windgeschwindigkeit, mit der das emittierte Gas in der Atmosphäre transportiert wird. Man möchte aus diesen Informationen die Stärke der Emissionen der Methan-Quelle abschätzen. Leite eine entsprechende Formel her und nutze diese für Berechnungen:

- Analysiere diese Situation und leite eine Formel her, mit der sich die Methan-Emission der Quelle in Tonnen Methan pro Stunde berechnen lässt.
- Wie stark ist die Emission bei einer Windgeschwindigkeit von 20 km/h?
- Wie stark ist die Emission bei einer Windgeschwindigkeit von 40 km/h?
- Gib die berechneten Emissionen in Kilotonnen pro Jahr (kt/y) an.

Lösung:

- Emission E (in Tonnen pro Stunde, t/h) bedeutet emittierte Masse M Methan (in Tonnen t) pro Zeiteinheit τ (in Stunden h): $E = M / \tau$. Hier ist M die sich im Rechteck befindliche Masse Methan und τ die Zeit, die Luftmassen benötigen, um die 40 km des Gebiets in Windrichtung zu passieren (also die Verweilzeit der Luft in dem beobachteten Gebiet).
- $E = M/\tau = 44/2 = 22$ t/h, da $M = 5,5 \times 10^{-3} \cdot 40 \cdot 10 \cdot 20 = 5,5 \cdot 8 = 44$ t und τ (in h) = Länge / Geschwindigkeit = $40 \text{ km} / (20 \text{ km/h}) = 2$ h.
- $E = M/\tau = 44/1 = 44$ t/h, da $M = 44$ t (wie bei (b)) aber nun ist $\tau = 40 \text{ km} / (40 \text{ km/h}) = 1$ h.
- Ein Jahr hat 8760 Stunden (= $24 \cdot 365$). Daher: 22 t/h entsprechen 193 kt/y und 44 t/h entsprechen 385 kt/y. Obwohl in beiden Fällen die gleiche Methanerhöhung über dem gleichen Gebiet gemessen wurde, ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten unterschiedliche Emissionen. Je höher die Windgeschwindigkeit, je höher die Emission (wenn alle anderen Parameter gleich sind).

Anforderungsbereich: III

Lernziel: Verständnis des Zusammenhangs von atmosphärischen Konzentrationen und Emissionen.