

## **GNSS-Meteorologie: Die bodengestützte Abschätzung des atmosphärischen Wasserdampfgehaltes**

By: TRYAT team.



Die Überwachung der unteren Atmosphäre ist eine der vielen Anwendungen von GNSS. Sie ist als bodengebundene GNSS-Meteorologie bekannt, die das Thema dieses Videos ist. Die Atmosphäre kann man sich als eine Art Decke vorstellen, die um den Erdkörper gewickelt ist. Sie ist eine Schicht aus Gasen und Partikeln, die sich von der Erdoberfläche aus, bis in Höhen von etwa 1000 Kilometern erstreckt. Die Atmosphäre ermöglicht eine für das Leben auf der Erde angenehme Temperatur und verhindert, dass schädliche Strahlung auf die Erde gelangt. Die Atmosphäre kann in verschiedene Schichten unterteilt werden: Troposphäre, Stratosphäre, Mesosphäre, Thermosphäre und Exosphäre. In der Geodäsie verwenden wir eine weitere Unterteilung, wie Sie gleich sehen werden. Die Atmosphäre besteht zu 78% aus Stickstoff und 21% Sauerstoff. Die restlichen 1% enthalten Wasser, Kohlendioxid und andere Gase. In diesem Video konzentrieren wir uns auf das Wasser, insbesondere den Wasserdampf. Wasser existiert in der Atmosphäre in drei Phasen: Gas, Wasser und Eis. Es ist der interessanteste und anspruchsvollste Parameter für das Verständnis der komplexen Wechselwirkungen und Muster des Wetter- und Klimasystems. Das Wasser verdunstet, steigt in die Atmosphäre auf, kühlt ab, kondensiert zu Wolken und fällt als Niederschlag. Dieser natürliche Prozess, der aus dem Salzwasser der Ozeane frisches Regenwasser liefert, wird als hydrologischer Kreislauf bezeichnet. Der Kreislauf des Wassers in und aus der Atmosphäre ist für die Entstehung des Wetters wichtig. Außerdem sind Wasserverdampfung und Wasserdampfkondensation mit Wärmeabsorption und Strahlung verbunden. Außerdem ist Wasserdampf ein äußerst wichtiges Treibhausgas, welches das Erdklima lebenswert hält. Wussten Sie, dass Wasserdampf auch bei klarem Himmel existiert? Das können wir an einem einfachen Experiment klarmachen.

Nehmen Sie eine Flasche aus dem Kühlschrank und stellen Sie sie für eine Weile raus. Sie werden feststellen, dass der Dampf zu kondensieren beginnt. Der atmosphärische Wasserdampfgehalt (PWV) ist die Wassermenge, die sich aus der kondensierenden Säule feuchter Luft mit einem Quadratmeter Querschnitt ergibt, die sich von der Oberfläche bis zur Spitze der Troposphäre erstreckt. Sie wird in Millimeter oder

Kilogramm pro Quadratmeter gemessen. Da der PWV für Wetter und Klima von wesentlicher Bedeutung ist, wird er regelmäßig gemessen. Es werden meteorologische Instrumente wie Radiosonden verwendet, die jedoch teuer sind und deren Daten keine ausreichende zeitliche und räumliche Auflösung haben. Außerdem sind solche sogenannten In-situ-Messungen nicht immer einfach zu erfassen. Denken Sie zum Beispiel an die Polarregionen, die sehr schwer zugänglich sind. Deshalb sind andere nützliche Techniken willkommen. Die GNSS-Meteorologie ist eine attraktive Alternative! Okay. Schauen wir mal, was das ist. Auf dem Weg vom Satelliten zum Boden durchdringt das Mikrowellensignal die Erdatmosphäre. Bei GPS-Satelliten, die in einer Entfernung von 20000 Kilometern fliegen, beträgt die Laufzeit eines Signals, das sich auf gerader Strecke bewegt, 67 Millisekunden. Aufgrund verschiedener Fehlerquellen ist die Ausbreitungszeit des Signals deutlich länger. Einer dieser Fehler ist die Verzögerung durch die Ausbreitung in der Atmosphäre. Für geodätische Anwendungen wird die Atmosphäre in zwei Schichten unterteilt: die Ionosphäre, die ionisierte Schicht, die sich zwischen 60 und 1000 Kilometern Höhe erstreckt, und die elektrisch neutrale Schicht, die Neutrosphäre, die sich von der Erdoberfläche bis zu 60 Kilometern erstreckt, sowie die Troposphäre, die tiefste Schicht der Neutrosphäre mit einer Dicke von etwa 20 Kilometern am Äquator. Hier ist der größte Teil der Feuchtigkeit vorhanden, daher ist sie unser Betrachtungsschwerpunkt. Das Mikrowellensignal wird beim Eintritt in die Troposphäre gebrochen, da die Troposphäre im Gegensatz zum Vakuum ein Medium mit einem Brechungsindex von mehr als 1 ist, weswegen das Signal statt einer geraden Strecke eine gekrümmte Strecke durchläuft. Es ist derselbe Weg wie bei der Lichtbrechung in Glas oder Wasser. Diese "Biegung" erhöht die Zeit, die das Signal benötigt, um den Empfänger zu erreichen. Wenn sich das GPS-Signal nach unten bewegt, fügt die Troposphäre der Messung eine Verzögerung von etwa 8,2 Nanosekunden hinzu. Für eine hochpräzise Positionierung muss dieser Fehler korrigiert werden. Er kann aber auch verwendet werden, um brauchbare Informationen über die Troposphäre zu erhalten. Bei Beobachtungen von mehr als vier sichtbaren Satelliten und unter Verwendung einer Technik, die als präzise Punktpositionierung, PPP, bezeichnet wird, können wir die Koordinaten des Empfängers X, Y, Z und die Zeit sowie die troposphärische Verzögerung, die als Zenit-Totalverzögerung (ZTD) bekannt ist, abschätzen. Die ZTD ist die troposphärische Verzögerung, die ein Signal erfahren würde, wenn der Satellit direkt nach unten sendet (90° Elevation). Die troposphärische Verzögerung entlang der Sichtlinie des Satelliten

wird als "Plant Total Delay" (Gesamtverzögerung) bezeichnet. Sie ist im Wert größer, da der Verfahrensweg länger ist. Jetzt kennen wir also diese Größe. Die ZTD hängt von der Lufttemperatur, dem Luftdruck und dem Wasserdampfdruck ab, sodass wir aus der ZTD Informationen über die Menge des Wasserdampfes (PWV) gewinnen können. Die ZTD ist die Summe der hydrostatischen Verzögerung im Zenit (ZHD), die hauptsächlich durch trockene Gase wie Sauerstoff und Stickstoff verursacht wird, und beträgt etwa 90 % der ZTD. Die restlichen 10% stellen die durch Wasserdampf verursachte Zenit-Nassverzögerung (ZWD) dar. Das ist es, was wir suchen.  $ZWD = ZTD - ZHD$ . Die ZTD ist bekannt. Aus der Messung des Luftdrucks in Hektopascal lässt sie sich nach folgender Formel berechnen:  $ZHD \approx 0,002277 * p_i$ . Denn wenn ZWD enthalten ist, kann man diesen Wert in PWV umrechnen.  $PWV = \pi * ZWD$ .  $\pi$  ist eine empirische Konstante, die von der Lage der GNSS-Antenne und den Witterungsbedingungen abhängig ist. Der Einfachheit halber wird  $\pi$  auf 0,15 gesetzt, was eine grobe Faustregel ist. Dies bedeutet, dass 6,5 Millimeter ZWD einem 1 Millimeter PWV entsprechen. Hier ist eine aus GNSS-Messungen geschätzte Zeitreihe von PWV, die ihre raschen zeitlichen Variationen zeigt, und wir sehen eine jahreszeitliche Abhängigkeit. Wenn es wärmer ist, steigt die Verdunstung und damit die Menge an Wasserdampf in der Luft. Wenn es kälter ist, nimmt der Wasserdampfgehalt ab. Das war's für das heutige Video. Ich hoffe, Sie haben ein oder zwei Dinge über die GNSS-Meteorologie gelernt. Vielen Dank für Ihr Interesse!