

# Trimble IonoGuard™: Schutz von RTK GNSS vor ionosphärischen Störungen

November 1, 2023

## Trimble IonoGuard Überblick

Die Sonnenaktivität erreicht alle 11 Jahre ihren Höhepunkt, wobei das nächste Maximum für das Jahr 2025 vorhergesagt wird. Dies hat einen direkten Einfluss auf die Verzögerungen und die Stabilität von GNSS-Signalen und kann sich negativ auf die Präzisionspositionierung auswirken. Dieses Dokument beschreibt die Herausforderung für GNSS-Anwender und -Hersteller und zeigt auf, wie die IonoGuard™-Technologie von Trimble die Auswirkungen in Empfängern mit ProPoint® GNSS-Technologie abmildert.

## Trimble IonoGuard Einführung

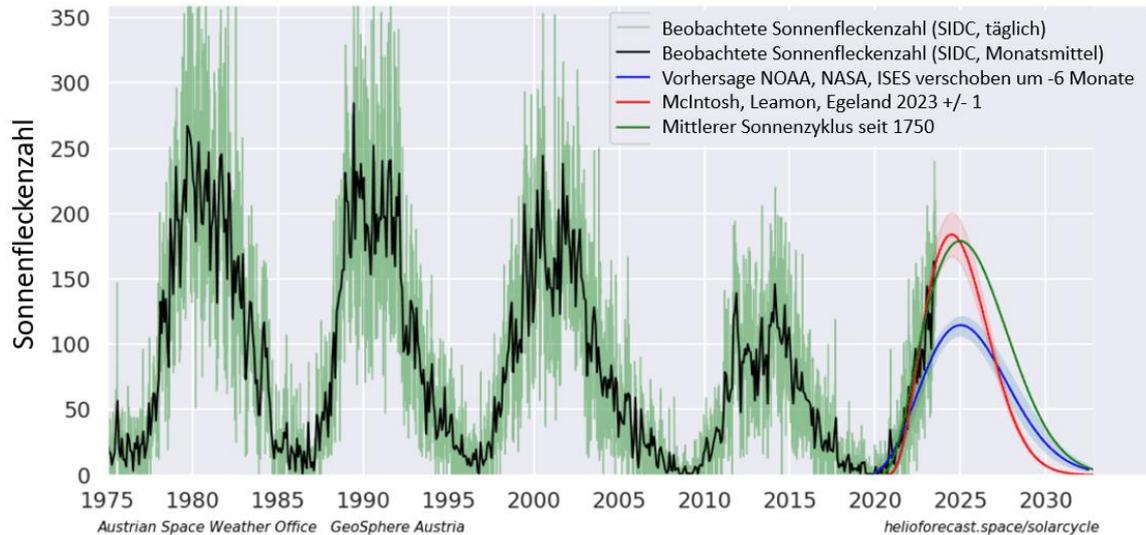
Nutzer von Hochpräzisions-GNSS, die in äquatorialen Regionen und hohen Breitengraden arbeiten, sind mit Positionsverschlechterungen durch ionosphärische Störungen vertraut. Der letzte Sonnenzyklus, der 2014 seinen Höhepunkt erreichte, war ein relativ milder Zyklus im Vergleich zu den jüngsten historischen Aufzeichnungen. Trimble ist sich darüber im Klaren, dass die folgenden Zyklen möglicherweise nicht so moderat oder geografisch begrenzt sein werden, und hat daher schon früh im aktuellen Zyklus mit der Datenerfassung und -entwicklung begonnen, um sicherzustellen, dass Hardware und Software bereit sind, um die Produktivität der Kunden zu maximieren. Das Ergebnis ist die Trimble IonoGuard-Technologie.

Wir werden einen Blick darauf werfen, wie die Ionosphäre die GNSS-Positionierung beeinflusst und wie Trimble IonoGuard heute in der Praxis eingesetzt wird, um die Genauigkeit, Verfügbarkeit und Integrität in kritischen Anwendungen zu optimieren.

## Was sind ionosphärische Störungen und wie wirken sie sich auf GNSS aus?

### Solarzyklus

Sonnenflecken sind vorübergehende Bereiche auf der Sonne, die durch einen aktiven magnetischen Fluss entstehen, der die Konvektion verringert. Je mehr Sonnenflecken, desto mehr Gebiete mit magnetischer Aktivität. Diese Gebiete können Partikel ausstoßen, die den Sonnenwind verstärken und zur Erde getragen werden können. Je mehr Teilchen auf die Erde treffen, desto stärker wird die als Ionosphäre bezeichnete Atmosphärenschicht aufgeladen, und die durch die Ionosphäre bedingte Verzögerung des GNSS-Signals nimmt zu. Das Magnetfeld der Sonne kippt einmal alle 11 Jahre, und die Sonnenfleckenaktivität ist mit diesem 11-Jahres-Zyklus korreliert. Es ist schwierig, das Ausmaß des Sonnenzyklus vorherzusagen. Frühe Modelle sagten voraus, dass das Maximum im Jahr 2025 ähnlich groß sein würde wie das vorherige. Siehe das NOAA-Modell unten. Neue Modelle und Messungen deuten jedoch auf einen Zyklus hin, der dem Zyklus ähnlicher ist, der um 2002 seinen Höhepunkt erreichte.



NOAA Modell des Solar Cycle in 2025

## Ionosphäre

Die Ionosphäre ist eine ionisierte Schicht der oberen Atmosphäre, die eine große Anzahl elektrisch geladener Atome und Moleküle enthält, die eine Verzögerung der GNSS-Signale beim Durchgang durch sie verursachen. Die Ionosphäre verändert sich im Laufe der Zeit, mit erheblichen Unterschieden zwischen Tag und Nacht, wenn die Sonnenenergiequelle vorhanden ist. Die Auswirkungen auf die Funkwellen sind frequenzabhängig. Die Verzögerung ist umgekehrt proportional zum Quadrat der Frequenz, was bedeutet, dass L1 (bei einer höheren Frequenz) eine geringere Verzögerung hat als L2. Eine gängige Kennzahl zur Beschreibung der Ionosphäre ist TEC oder der Gesamtelektronengehalt. Dabei handelt es sich um die Gesamtzahl der Elektronen, die zwischen zwei Punkten integriert sind, z. B. zwischen dem Empfänger und dem Satelliten in einer geraden Linie. Die Einheiten sind Elektronen pro Quadratmeter; mit der Frequenz eines Signals kann dies in eine entsprechende Signalverzögerung umgewandelt werden.

Die Verzögerung durch die Ionosphäre ist nicht festgelegt und ändert sich je nach Tageszeit, Jahr und Standort. Auch der Höhenwinkel zwischen dem Empfänger und dem Satelliten wirkt sich auf die Größe der Verzögerung aus. Ein Signal aus großer Höhe nimmt den kürzesten Weg durch die Ionosphärenschicht der Atmosphäre, da der Weg senkrecht zur Ionosphäre verläuft. Ein Signal mit geringer Höhe durchläuft die Ionosphäre in einem Winkel und erfährt dadurch eine viel größere Verzögerung. In Abwesenheit eines geomagnetischen Sturms korreliert die Ionosphäre mit der Sonnenaktivität, so dass die größte Verzögerung am frühen Nachmittag auftritt, während die Verzögerung über Nacht geringer ist.

## Äquatoriale Effekte

Während der Abendstunden in der Nähe des geomagnetischen Äquators steigt das Plasma in der Ionosphäre auf. Dies kann zu Instabilitäten in der Ionosphäre führen und Szintillation zur Folge haben. Dabei handelt es sich um einen Effekt, bei dem die GNSS-Signale durch schwankende Elektronendichten in der Ionosphäre beeinträchtigt werden, was zu sehr schnellen Phasen- und Amplitudenänderungen führen kann, was wiederum eine schlechte Verfolgung, einen vollständigen Verlust der Verriegelung und/oder einen Träger-Phasensprung zur Folge hat. Wenn die Instabilität auftritt, kann sie auf bestimmte Regionen oder Blasen in der Ionosphäre beschränkt sein, so dass nur eine Teilmenge der Satelliten betroffen sein kann. In Südamerika, wo viele unserer Kunden in der Landwirtschaft und im Bergbau tätig sind, tritt die Szintillation ein oder zwei Stunden nach Sonnenuntergang auf und dauert in der Regel 4-5 Stunden. Außerdem folgt sie einem jährlichen

Zyklus, wobei die meisten Störungen zwischen September und März auftreten und der Schweregrad vom 11-jährigen Sonnenzyklus abhängt.

## **Polare Effekte**

Sonnenflecken können Material aus der Sonne ausstoßen, das sich mit einer Geschwindigkeit von einigen 100 km/s bis zu einigen 1.000 km/s bewegt. Dieses Phänomen wird als koronaler Massenauswurf bezeichnet. Wenn das Material mit einer erdnahen Flugbahn ausgestoßen wird, dauert es in der Regel ein paar Tage, bis es die Erde erreicht. Aufgrund des Erdmagnetfeldes neigt es dazu, sich zu den Polen zu bewegen, wo es die Ionosphäre an beiden Polen erheblich beeinträchtigen kann. Dies hat nicht nur Auswirkungen auf die GNSS-Leistung, sondern kann manchmal auch als Nord- (oder Süd-) Licht beobachtet werden, ein Phänomen, das als Aurora borealis (oder Aurora australis) bezeichnet wird. Bei stärkeren Stürmen kann sich das Nordlicht bis auf das US-amerikanische Festland ausdehnen, und die Auswirkungen auf die Ionosphäre können GNSS-Signale in niedrigeren Breitengraden beeinträchtigen.

Während es in der Polarregion zu einem Verlust der Synchronisation und zu Zyklusverschiebungen kommen kann, zeigen die Daten in der Regel eine weniger starke Amplitudenzintillation als in den äquatorialen Regionen, mit begrenzten Zyklusverschiebungen und weniger Störungen.

## **Globale Effekte**

Obwohl die auffälligsten Störungen um den geomagnetischen Äquator und in den nördlichen Breiten auftreten, haben wir auch eine Zunahme der ionosphärischen Verzögerungsmessung weltweit beobachtet, während wir uns dem Maximum des Sonnenzyklus nähern. Zwar werden Zweifach- und Dreifachfrequenztechniken eingesetzt, um diese Effekte durch die Verwendung einer ionosphärenfreien Kombination abzuschwächen, doch erhöht dies auch das Mess- und Positionsrauschen. Da große Sonnenstürme den Betrieb in den mittleren Breitengraden stören können, ist der Schutz der Ionosphäre zu einer wichtigen globalen Anforderung für GNSS-Empfänger geworden.